

# Literaturübersicht

Im Rahmen des Projekts

**Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für  
TETRA genutzten Signalcharakteristik auf  
kognitive Funktionen**

22. März 2010

**Projektleitung:**

Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe, Dr.-Ing. Hans Dorn  
Kompetenzzentrum Schlafmedizin CC15  
Charité - Universitätsmedizin Berlin  
Eschenallee 3  
14050 Berlin

T +49 (0) 30 8445 8600 oder 8613

F +49 (0) 30 8445 8233

e-mail: heidi.danker-hopfe@charite.de

e-mail: hans.dorn@charite.de

**Literaturübersicht erstellt von:**

Dr. Cornelia Sauter

(Kompetenzzentrum Schlafmedizin CC15, Charité - Universitätsmedizin Berlin)

unter Mitwirkung der Projektleitung (s.o.) und von

Dipl.-Biol. Torsten Eggert

(Kompetenzzentrum Schlafmedizin CC15, Charité - Universitätsmedizin Berlin)

Dipl.-Ing Gernot Schmid

(Seibersdorf Laboratories, 2444 Seibersdorf, TechGate Vienna, Donau-City-Straße 1,  
A-1220 Wien, Österreich)

**Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.**

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	4
2. Eigenschaften und Verbreitung von TETRA .....	5
2.1 Technische Spezifikationen von TETRA .....	5
2.2 TETRA-Funk in Deutschland .....	8
2.3 Gesetzliche Grundlagen .....	10
3. Stand der Forschungsprojekte zu TETRA .....	12
3.1 Deutsche Forschungsprojekte zu TETRA .....	12
3.1.1 Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben und Bundesamt für Strahlenschutz (BDBOS) .....	12
3.1.2 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) .....	13
3.1.3 Forschungsgemeinschaft Funk (FGF) .....	13
3.1.4 Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) .....	13
3.2 Das Britische Mobilfunkforschungsprogramm .....	14
3.3 Das Dänische Mobilfunkforschungsprogramm .....	15
4. Ergebnisse aus Forschungsprojekten .....	15
4.1 Studien zu Exposition und Dosimetrie bei TETRA .....	15
4.2 In-vitro-Studien .....	20
4.3 In-vivo-Studien .....	23
4.3.1 Tier-Experimente .....	23
4.3.2 Studien zu berufsbedingter Nutzung von TETRA .....	27
4.3.3 Studien zu biologischen Effekten von TETRA auf das Herz-Kreislaufsystem .....	30
4.3.4 Studien zu biologischen Effekten von TETRA auf das Zentrale Nervensystem .....	31
4.3.4.1. Evozierte Potentiale und EEG .....	31
4.3.4.2 Kognitive Funktionen .....	34
4.3.5 Studien zu Elektrosensibilität .....	38
5. Zusammenfassung .....	40
6. Literaturverzeichnis .....	41
7. Abkürzungen .....	48

## 1. Einleitung

Die Einführung des digitalen Sprech- und Datenfunksystems für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (Digitalfunk BOS) in Deutschland, welches mit dem TETRA- (Terrestrial Trunked Radio) Standard arbeitet, hat in einem Teil der Bevölkerung und der (potenziellen) Nutzer Fragen zu möglichen Auswirkungen dieser Technologie auf den Menschen aufgeworfen. Im Gegensatz zur Mobilfunkforschung wurde schon vor dem Aufbau des TETRA-Netzes begonnen, mögliche biologische Effekte der daraus resultierenden elektromagnetischen Felder zu untersuchen. Die Anzahl der nationalen und internationalen Studien zu TETRA ist im Gegensatz zur Mobilfunkforschung allerdings noch wesentlich geringer und die wenigen Studien zu potenziellen Auswirkungen von TETRA auf die Gehirnfunktionen des Menschen sind bisher überwiegend in Abschlussberichten, jedoch nur in einem einzigen Fall in wissenschaftlichen Zeitschriften, bei denen eine Begutachtung durch Expertinnen und Experten erfolgt („peer-reviewed“), veröffentlicht worden.

Parallel zum Ausbau des TETRA-Funks in Deutschland hat die Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BDBOS) gemeinsam mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) eine Verwaltungsvereinbarung getroffen und zwei Forschungsprojekte zum TETRA-Funk in Auftrag gegeben, um wissenschaftliche Unsicherheiten bei der Bewertung der Exposition durch TETRA- Anwendungen weiter zu reduzieren.

Die vorliegende Literaturübersicht enthält einen kurzen Abriss über die technischen Spezifikationen von TETRA-Funk, sowie über die Verbreitung des BOS-Funk in Europa, mit besonderer Berücksichtigung der Lage in Deutschland. Darüber hinaus werden die bisher durchgeführten Forschungsaktivitäten nationaler und internationaler Forschergruppen zum TETRA-Funk vorgestellt und die Ergebnisse bereits abgeschlossener Studien werden diskutiert.

## 2. Eigenschaften und Verbreitung von TETRA

TETRA (Terrestrial Trunked Radio) ist ein Standard für die digitale Informationsübermittlung (Bündelfunk), der von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS: Landes- und Bundespolizei, Feuerwehren, Rettungsdienste – Deutsches Rotes Kreuz, Arbeiter-Samariter-Bund, Johanniter Unfallhilfe usw.- Technisches Hilfswerk, Zollbehörden und Verfassungsschutzämter) sowie von der Industrie, dem öffentlichen Personennahverkehr, Flughäfen und Militär zunehmend genutzt wird. Der in der Mitte der 1990er Jahre entwickelte TETRA-Standard löst das seit den 60er Jahren eingesetzte und bis Ende der 80er Jahre weltweit verwendete analoge Sprechfunknetz zunehmend ab (Linde, 2008). Die erste Version des Standards wurde im Jahr 1995 als ETSI-Standard (ETSI: Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen) veröffentlicht. Gegenüber den herkömmlichen, gegenwärtig von BOS zumeist noch genutzten analogen Funkgeräten, bietet TETRA eine Reihe von Vorteilen, wie z.B. hohe Abhörsicherheit, die Möglichkeit der simultanen Übertragung von Sprache und Daten, die Möglichkeit für Gruppen- und Prioritätsrufe und einen Direktmodus in Bereichen ohne Netzinfrastruktur.

### 2.1 Technische Spezifikationen von TETRA

TETRA Funknetze sind, sehr ähnlich wie die bekannten Mobilfunknetze von GSM (Global System for Mobile Communications) und UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), in einer zellularen Struktur mit Basisstationen organisiert. In Europa sind für TETRA mehrere Frequenzbänder im Frequenzbereich zwischen 380 MHz und 470 MHz vorgesehen. Konkret in Deutschland ist der Frequenzbereich 380-385 MHz für den BOS-Uplink (Kommunikation vom Endgerät zur Basisstation) und der Frequenzbereich 390-395 MHz für den BOS-Downlink (Kommunikation von der Basisstation zum Endgerät) vorgesehen. Private TETRA-Dienste arbeiten in anderen Frequenzbereichen, oberhalb von 400 MHz. In Abbildung 1 ist die Feldquellenansicht für TETRA-Geräte im Vergleich zu anderen elektromagnetischen Quellen dargestellt (aus: <http://www.emf-portal.de>).

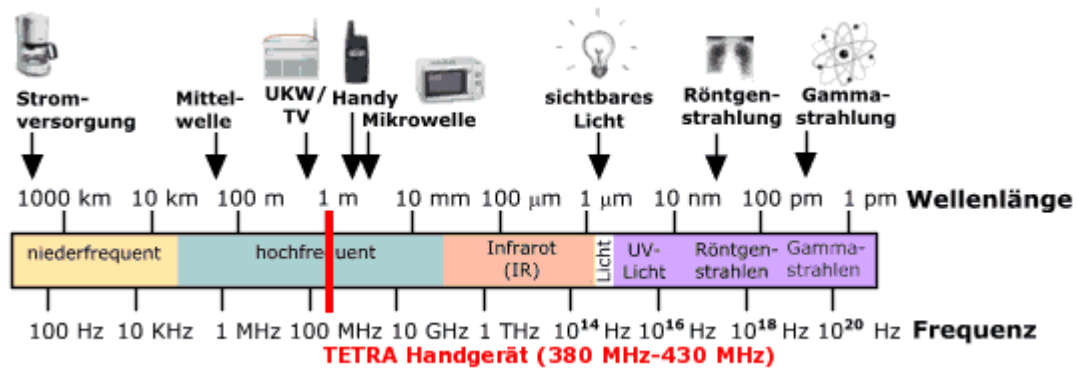


Abbildung 1: Feldquellenansicht für TETRA-Handgeräte (aus: <http://www.emf-portal.de>)

Wie aus den Angaben zum Uplink- und Downlink-Frequenzbereich ersichtlich, arbeitet TETRA, wie auch GSM und UMTS, mittels so genannten Frequenzduplex (FDD), mit einem Duplexabstand von 10 MHz. Ein TETRA-Funkkanal benötigt 25 kHz Bandbreite und es stehen damit innerhalb des für BOS reservierten 5 MHz breiten Frequenzbandes eine ausreichende Anzahl von Frequenzkanälen zur Verfügung, um ein effizientes zelluläres Netz unter Mehrfachausnutzung der Frequenzen aufzubauen. Als Zugriffsverfahren unterschiedlicher Gespräche innerhalb eines Funkkanals verwendet TETRA, wie auch GSM, ein Zeitschlitzverfahren (TDMA: Time Division Multiple Access bzw. Zeitmultiplexverfahren), wobei bei TETRA insgesamt 4 Zeitschlitze pro Frequenzkanal zur Verfügung stehen (im Gegensatz zu GSM, wo 8 Zeitschlitze pro Frequenzkanal verfügbar sind). Die Länge eines TETRA-Zeitschlitzes beträgt 14,167 ms, womit sich als Rahmenlänge  $4 \times 14,167 \text{ ms} = 56,67 \text{ ms}$  ergeben. Das von einem TETRA Funkgerät im Gesprächsmodus ausgesendete Signal folgt daher dem in Abbildung 2 schematisch dargestellten Timing. Das von einem TETRA Endgerät ausgesendete Signal (im Rahmen dieses Projekts von Interesse), ist daher ein gepulstes Hochfrequenzsignal. Aus diesem Zeitverlauf ergibt sich eine ausgeprägte 17,6 Hz Komponente in der Signaleinhüllenden im Gesprächsmodus, die teilweise (hypothetisch) als potenziell biologisch wirksam angesehen wird. Zusätzlich ist in der Einhüllenden des TETRA Uplink-Signals auch noch eine (weniger stark ausgeprägte) Frequenzkomponente bei ca. 1 Hz enthalten, die sich aus der Zusammenfassung von jeweils 18 Rahmen zu einem Multirahmen ergibt ( $18 \times 56,7 \text{ ms} = 1,02 \text{ s}$ ). Bei Übertragung von Daten können einer TETRA-Verbindung, ähnlich wie bei GPRS/GSM, zusätzliche Zeitschlitze (bis maximal 4) zugeordnet werden und es ergeben sich damit entsprechend andere Frequenzkomponenten in der Signaleinhüllenden.

Das Timing des TETRA Downlink-Signals ist sinngemäß davon abhängig, wie viele Zeitschlitze im jeweils betrachteten Frequenzkanal gerade belegt sind (durch Gespräche

oder Datenübertragung) und entspricht bei voller Kanalausnutzung (alle 4 Zeitschlitze belegt) daher eher einer kontinuierlichen HF-Aussendung. Bei Belegung von weniger als 4 Zeitschlitzen entspricht das Signal im jeweiligen Downlink-Frequenzkanal, wie auch das Uplink-Signal, einer gepulsten HF-Aussendung.

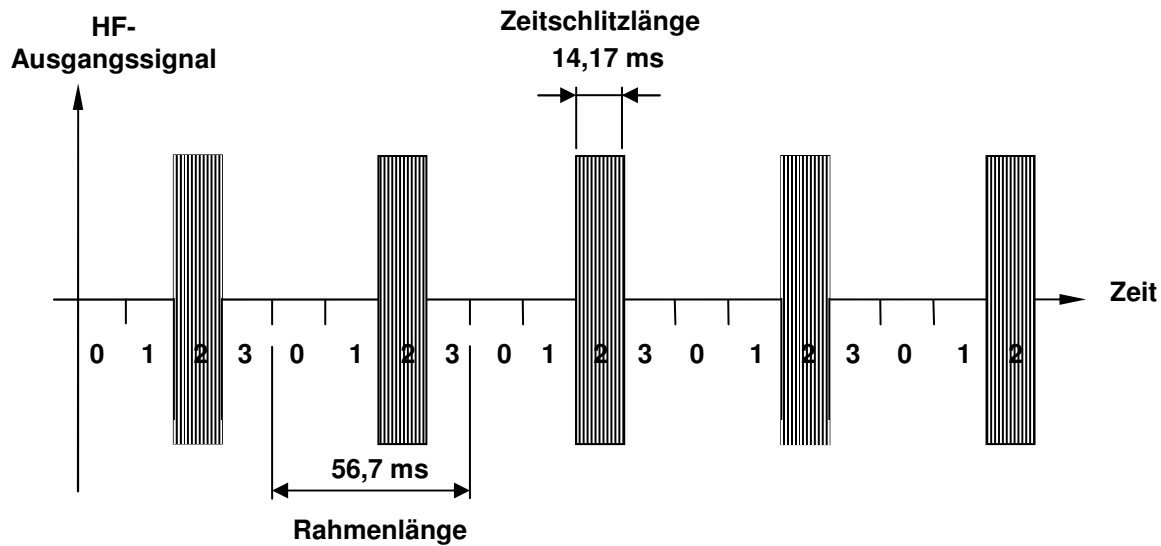


Abbildung 2: Schema des Zeitverlaufs des HF-Ausgangssignals eines TETRA Endgerätes (hier im Zeitschlitz 2 arbeitend) im Gesprächsmodus

Der TETRA-Standard definiert Funkgeräte unterschiedlicher Leistungsklassen mit Spitzensendeleistungen zwischen 0,3 W (Klasse 5) und 30 W (Klasse 1). Handgehaltene Geräte, die auch in der Nähe des Kopfes betrieben werden können, besitzen üblicherweise nicht mehr als 3 W Spitzensendeleistung und gehören damit den Leistungsklassen 3-5 an.

Weiters besitzt TETRA eine automatische Leistungsregelung in 5 dB-Schritten, die bei guter Funkverbindung zwischen Basisstation und Endgerät, die Sendeleistungen auf das notwendige Mindestmaß reduziert. Anders als bei GSM, entscheidet jedoch das TETRA Endgerät völlig autonom (d.h., nicht auf Befehl der Basisstation) über die von ihm gerade ausgesendete Sendeleistungsstufe. Die geringste Sendeleistungsstufe eines TETRA Endgerätes entspricht nominell 15 dBm (entsprechend ca. 30 mW Spitzensendeleistung).

## 2.2 TETRA-Funk in Deutschland

Für die Organisation des Netzaufbaus und dessen Wartung ist die Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BDBOS) zuständig, die am 2. April 2007 ihre Arbeit aufnahm und unter deren Verwaltung bis Ende 2012 ein flächendeckendes TETRA-Funknetz in Deutschland realisiert werden soll (BDBOS, 2010). Am 1. Juni 2007 wurde auf der Konferenz der Innenminister des Bundes und der Länder ein Verwaltungsabkommen für den Aufbau eines bundesweiten TETRA-Netzes unterzeichnet.

In Deutschland wird das TETRA-Netz der BOS für die Kommunikation von etwa 500.000 Nutzern ausgelegt werden (BDBOS, 2010). Die Umstellung auf einen digitalen Behördenfunk sieht bundesweit einen Aufbau von 4300-4500 Basisstationen sowie 64 Kernnetzstandorten (Vermittlungsstellen, Transitvermittlungsstellen, Netzverwaltungs-zentren) in insgesamt 45 Netzabschnitten vor (BDBOS, 2010). Gegenwärtig haben insgesamt 13 Bundesländer erste Basisstationen in Betrieb genommen. Dazu zählen u.a. die drei Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg, aber auch die Städte München (Bayern), Köln (Nordrhein-Westfalen) und Stuttgart (Baden-Württemberg) sowie weitere Stationen in Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Thüringen und Brandenburg (siehe Abbildung 3). Auch die zwei Netzverwaltungszentren in Berlin und Hannover haben ihren Dienst bereits aufgenommen.

In Deutschland soll in einer Frist von 10 Jahren, in denen beide Netze parallel betrieben werden, komplett von analoger auf digitale Kommunikation umgestellt werden.

Im privatwirtschaftlichen Bereich ist TETRA als universelles innerbetriebliches Kommunikationsmedium in der Industrie und bei Verkehrsbetrieben in Deutschland bereits länger im Einsatz.

Innerhalb Europas verfügen bereits Belgien, die Niederlande, Großbritannien, Finnland, Estland, Island und Ungarn über landesweite TETRA-Netze. Neben Deutschland befindet sich auch in vielen anderen europäischen Ländern der TETRA-Funk im Aufbau bzw. ist in der Planungsphase (BDBOS, 2010).

In Spanien, Frankreich, der Schweiz, Tschechien, der Slowakei ist ein in Europa parallel zu TETRA entwickelter Standard für die professionelle Telekommunikation in Sicherheitsnetzen im Einsatz, der TETRAPOL-Standard. Allerdings ist in diesen Ländern in einzelnen Landesteilen durchaus auch der TETRA-Standard im Einsatz (z.B. im Baskenland und in



Prag; BDBOS, 2010). Die deutsche Bundeswehr verwendet TETRAPOL Bw (TETRAPOL Bundeswehr) zur Kommunikation im Auslandeinsatz (Bundeswehr, 2010). Dabei handelt es sich um eine auf die speziellen Anforderungen zugeschnittene Variante des zivilen TETRAPOL Systems.

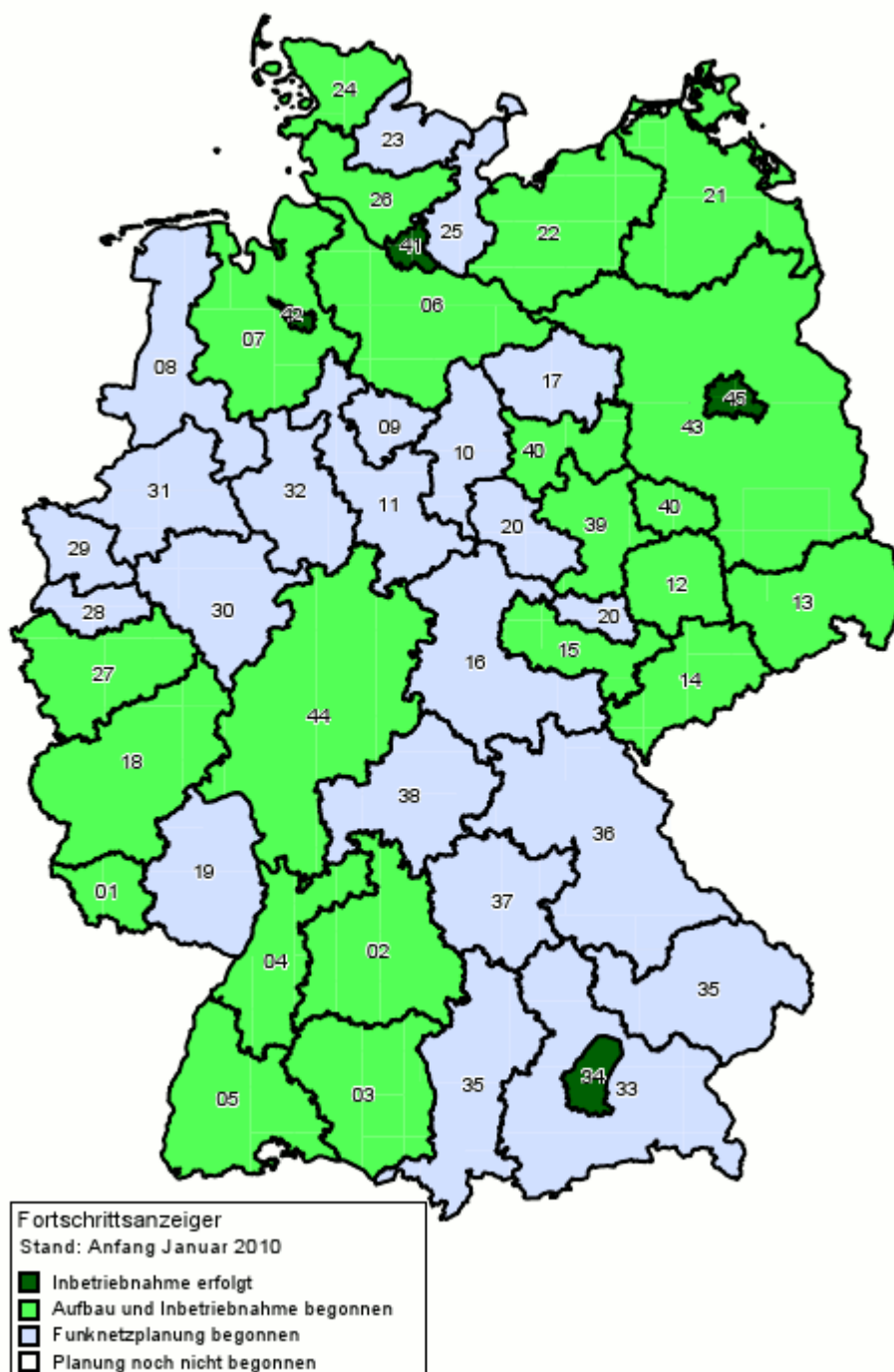


Abbildung 3: Aktueller Stand des TETRA-Funknetzes in Deutschland (aus: <http://www.bdbos.bund.de>)

### 2.3 Gesetzliche Grundlagen

Mit dem Schutz vor evtl. schädlichen Auswirkungen nicht-ionisierender elektromagnetischer Felder befasst sich die „*Empfehlung des EU-Ministerrates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern*“ (0 Hz bis 300 GHz) (1999/519/EG, ABL. L 199/59 vom 30.07.1999), die in den Mitgliedsstaaten weitgehend in nationales Recht umgesetzt worden ist. Hinsichtlich der Festlegung von Grenzwerten stützt sich die EU-Ratsempfehlung auf Empfehlungen der „*Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung*“ (ICNIRP, 1998).

Die Empfehlungen wurden im Jahr 2009 unter Berücksichtigung der in der Zwischenzeit erfolgten Forschung nochmals von der ICNIRP bestätigt (ICNIRP, 2009). Grundlage der Empfehlungen sind die wissenschaftlich nachgewiesenen gesundheitsrelevanten biologischen Wirkungen, die durch Feldeinwirkung ausgelöst werden können. In den Empfehlungen gibt es Basisgrenzwerte, die sich direkt auf die bekannten biologischen Wirkungen beziehen, sowie daraus abgeleitete Referenzwerte für die Messung von Immissionen (wie sie z.B. durch ortsfeste Sendeanlagen verursacht werden). Bei Immissionen unterhalb der Referenzwerte werden die Basisgrenzwerte nicht erreicht.

Basisgrenzwerte sind im betreffenden Frequenzbereich mittlere spezifische Ganzkörper- und Teilkörper-Absorptionsraten (SAR).

Tab. 1 Basisgrenzwerte und Referenzwerte (bei 400MHz) für zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich 10MHz bis 10GHz

Art der Exposition	Basisgrenzwerte			Referenzwerte
	Durchschnittliche Ganzkörper SAR (W/kg)	Lokale SAR (Kopf und Rumpf) (W/kg)	Lokale SAR (Gliedmaßen) (W/kg)	Elektrische Feldstärker (V/m)
Berufliche Exposition	0,4	10	20	61
Exposition der Bevölkerung	0,08	2	4	28

Für Basisstationen sind die Basisgrenzwerte der Ganzkörper-SAR und die sich daraus ableitenden Referenzwerte (Leistungsflussdichten bzw. Feldstärken) relevant. Für den Gebrauch der Endgeräte ist die maximale Teilkörper-SAR von Bedeutung.

Bei allen hier betroffenen Grenzwerten wird zwischen der Exposition der Allgemeinbevölkerung und der Exposition von Beschäftigten bzw. einer beruflich bedingten Exposition unterschieden. Beruflich exponierte Personen sind Erwachsene, die unter weitgehend kontrollierbaren Bedingungen maximal für die Dauer des Arbeitstages exponiert werden und zur Vermeidung von Risiken unterwiesen worden sind. Die Basisgrenzwerte (SAR-Werte) für Beschäftigte berücksichtigen einen Sicherheitsfaktor von 10. Die allgemeine Bevölkerung kann hingegen dauerhaft exponiert sein, und es handelt sich um Menschen unterschiedlichen Alters und Gesundheitsstatus. Den Grenzwerten für die Allgemeinbevölkerung wurde deshalb der noch höhere Sicherheitsfaktor von 50 zugrunde gelegt.

In Deutschland sind bezüglich der elektromagnetischen Felder, die von Geräten und Anlagen des TETRA-Funks ausgehen, vor allem folgende Rechtsvorschriften zu beachten: Die „*26. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) - Verordnung über elektromagnetische Felder*“ vom 16. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1996) gilt für ortsfeste Funksendeanlagen mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung von mindestens 10 W, die gewerblich oder in Unternehmen benutzt werden. Diese Verordnung gilt damit auch für Basisstationen des TETRA-Systems. Die Verordnung dient dem Schutz der Allgemeinheit bzw. der Nachbarschaft und gilt nicht für Beschäftigte, die bestimmungsgemäß Arbeiten an bzw. mit den Geräten und Anlagen durchführen. Für Beschäftigte gelten die Regelungen des Arbeitsschutzes, insbesondere die „*Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder*“ (BGI B11) (BAnz. Nr. 100 vom 31.5.2001 S. 10820; ber. 16310).

Die 26. BImSchV gilt nicht für ortsveränderliche Anlagen oder für Mobilgeräte. Anlagen, die zur Wahrnehmung hoheitlicher Aufgaben betrieben werden, sind bisher nicht betroffen. Damit bleibt das in Deutschland geltende Recht hinter der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG zurück. Ein Gesetzentwurf der Bundesregierung vom 27.04.2009 (Deutscher Bundestag Drucksache 16/12787) befasst sich u.a. mit der Schließung dieser Regelungslücke. Der Aufbau eines „neuen hoheitlichen Netzes für Sicherheitsbehörden“ wird in der Begründung explizit genannt.

Für den Schutz vor Störeinträgen auf andere Anlagen und Geräte ist das „*Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln*“ vom 26. Februar 2008 (BGBl. I S. 220), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2409) geändert worden ist, einschlägig. Für evtl. erforderliche Standortbescheinigungsverfahren gilt die Verordnung

über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) vom 20. August 2002 (BGBl. I, S. 3366). Darin wird auf die Grenzwerte nach der 26. BImSchV Bezug genommen. Es können auch Anlagen betroffen sein, die nicht direkt von der BImSchV erfasst werden.

### 3. Stand der Forschungsprojekte zu TETRA

Wie auch bei anderen mobilen Kommunikationsstandards (GSM, UMTS) werden von Teilen der Bevölkerung Befürchtungen hinsichtlich gesundheitlicher Beeinträchtigung durch TETRA-Basisstationen und TETRA-Handgeräte geäußert. Um etwaige biologische Effekte des TETRA-Funks zu untersuchen, sind bereits Simulationsstudien zur Verteilung der Exposition in biologischem Gewebe, zu Effekten auf zellulärer, histologischer, organischer und makroskopischer oder auf der Ebene des Individuums (Tier, Mensch) durchgeführt worden bzw. sind noch nicht abgeschlossen oder in Planung. Der aktuelle Stand der TETRA-Forschung national als auch international wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

#### 3.1 Deutsche Forschungsprojekte zu TETRA

In Deutschland laufen bereits seit Mitte der 90-Jahre Studien zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen von TETRA. Nachfolgend wird der aktuelle Stand der Aktivitäten unterschiedlicher Forschungsgruppen und Forschungsförderer erläutert.

##### 3.1.1 Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben und Bundesamt für Strahlenschutz (BDBOS)

Die Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BDBOS) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) haben eine Zusammenarbeit über Fragen gesundheitlicher Auswirkungen des Digitalfunks BOS und über damit verbundene Forschungsvorhaben vereinbart (BDBOS, 2008). Derzeit werden zwei Studien zu TETRA durchgeführt: Eine Studie, die vom BfS durchgeführt wird, befasst sich mit der Modellierung von SAR-Werten im gesamten Körper sowie im Kopfbereich unter besonderer Berücksichtigung des Auges. Die zweite Studie ist eine Probandenstudie zur Untersuchung des Einflusses der für TETRA genutzten Signalcharakteristik auf kognitive Funktionen, die von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt wird und deren erster Teil die hier präsentierte Literaturübersicht darstellt. Die Probandenstudie soll Ende 2013 abgeschlossen sein.

### 3.1.2 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

Im Rahmen des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms wurde eine dosimetrische Studie zur TETRA- Exposition durchgeführt. Die Ergebnisse der Studie von Schmid et al. (2006) zur Bestimmung der Expositionsverteilung von HF Feldern im menschlichen Körper, unter Berücksichtigung kleiner Strukturen und thermophysologisch relevanter Parameter werden im Kap. 4.1 näher ausgeführt.

Wie unter 3.1.1 erläutert, hat das BfS aktuell zwei Forschungsprojekte zur Risikobewertung von Feldern des TETRA-Standards in Auftrag gegeben, die von der BDBOS finanziert werden. Die Forschungsprojekte wurden im Jahr 2009 begonnen.

### 3.1.3 Forschungsgemeinschaft Funk (FGF)

Die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. (FGF) hat bereits in den 90-er Jahren drei Studien zu biologischen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder in Auftrag gegeben (FGF, 2010; Gollnick, 1997). An der Universität Bonn wurden Versuche zu analogen Funksystemen der BOS (180 MHz) durchgeführt (Linz et al., 1999). An der Freien Universität Berlin und an der Universität Gesamthochschule Essen wurden Experimente zum digitalen Funksystem (380 MHz, mit 17,65 Hz gepulst) unternommen (Antonopoulos et al., 1998; Fitzner et al., 1995). Der technische Aufbau und die reproduzierbare Feldexposition von Zellen wurden durch die Bergische Universität Wuppertal und die Universität Braunschweig gewährleistet (Hansen and Streckert, 1998). Die Ergebnisse der Studien zum digitalen BOS-Funk werden in Kap. 4.2 erläutert.

### 3.1.4 Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

Vom Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) wurde in Zusammenarbeit mit der Bundeswehr ein Projekt zu TETRAPOL und möglichen Auswirkungen auf das Befinden und die Aufmerksamkeitsleistung von Menschen in verschiedenen Anforderungssituationen durchgeführt, sowie eines zum Einfluss niederfrequenter gepulster elektromagnetischer Felder des kommerziellen Mobilfunkstandards TETRA (380 - 400 MHz) auf das Befinden und die Leistung in verschiedenen Anforderungssituationen (BAuA, 2007a, 2007b). Zu beiden Studien liegen bisher nur Tagungsberichte und ein Artikel zu Teilergebnissen in einer Zeitschrift vor, die keinen peer-review Prozess durchführt.

### 3.2 Das Britische Mobilfunkforschungsprogramm

1999 gab die britische Regierung eine Literaturanalyse zu möglichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder von Mobiltelefonen auf die Gesundheit in Auftrag. Im daraus resultierenden Bericht, auch bekannt als „The Stewart Report“, kam die „Independent Expert Group on Mobile Phones“ (IEGMP) zu dem Schluss, dass bei Einhaltung der Grenzwerte des National Radiological Protection Boards (NRPB, 1999) und der International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP, 1998), keine gesundheitliche Beeinträchtigung der Allgemeinbevölkerung zu befürchten sei (IEGMP, 2000). Die Autoren empfahlen allerdings als Vorsichtsmaßnahme eine Amplitudenmodulation um 16 Hz zu vermeiden, da einige, allerdings nicht alle Studien einen Einfluss von entsprechend modulierten Signalen auf die Kalzium-Ionen Aktivität in isoliertem Nervengewebe gefunden hatten (IEGMP, 2000).

In der Folge erstellte eine unabhängige Beratergruppe der britischen Strahlenschutzkommission (Advisory Group on Non-ionising Radiation, AGNIR der NRPB) eine ausführliche Analyse zu potenziellen Auswirkungen von TETRA auf die Gesundheit (NRPB, 2001). Der Bericht enthält Ausführungen zu technischen Aspekten von TETRA und zur Exposition. Ein Kapitel fasst die Forschungsergebnisse zu biologischen Effekten Amplituden-modulierter RF-Felder zusammen. Zum Thema TETRA-Exposition und menschliches Gehirn waren zum Zeitpunkt der Berichterstellung keine Studien bekannt, weshalb ein Forschungsbedarf für diesen Bereich geäußert wurde. Es wurde u.a. empfohlen, Studien zu kognitiven Funktionen bei Menschen unter Exposition von TETRA-Handgeräten („Handsets“) sowie Forschungsprojekte zur praktischen Anwendung und den Bedingungen, denen Berufsgruppen beim Gebrauch von TETRA ausgesetzt sind, durchzuführen.

Basierend auf diesen Empfehlungen wurden zehn Projekte zu TETRA vom Britischen Mobilfunk Forschungsprogramm (Mobile Telecommunications and Health Research Programme, UK MTHR I, 2003) bzw. vom Britischen Innenministerium (UK Home Office) finanziert. Eine Studie beschäftigte sich mit Gehirnfunktionen, sowie Gen- und Proteinexpression bei Mäusen (Sienkiewicz, 2006). Eine Studie wurde zur Thematik der Kalzium-Ionen Aktivität durchgeführt (Green et al., 2005; Smith et al., 2005) und drei zu Dosimetrie (Chadwick, 2003, 2006; Dimbylow et al., 2003b, 2003a). In vier Studien wurden Probanden in einem experimentellen Setting untersucht (Airwave Health Monitoring Programme, 2006; Barker et al., 2007; Butler, 2005; Wallace et al., 2010; Wessely, 2005) und im Rahmen von drei „Feldstudien“ wurde der Einsatz und die Auswirkung von TETRA-Geräten auf Polizeipersonal analysiert (Airwave Health Monitoring Programme, 2006;

Litchfield and Sorahan, 2004; van Tongeren et al., 2005). In einem Bericht zu den Ergebnissen des Britischen Mobilfunkforschungsprogramms (Mobile Telecommunications and Health Research Programme, 2007) wurde der Schluss gezogen, dass es einen Forschungsbedarf zu Elektrosensibilität unter TETRA-Funk gibt, der in einer zweiten Phase des Britischen Mobilfunkforschungsprogramms (MTHR II) mit einer Studie zu TETRA-Endgeräten (Wessely, 2005) und einer zu TETRA-Basisstationen (Wallace et al., 2010) abgedeckt werden sollte. Der aktuelle Stand und bereits vorliegende Ergebnisse aller Studien zu TETRA im Britischen Mobilfunkforschungsprogramm werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

### 3.3 Das Dänische Mobilfunkforschungsprogramm

Im Dänischen Mobilfunkforschungsprogramm wurde u.a. eine doppel-blinde Studie zu kognitiven Funktionen und Symptomen während TETRA-Exposition durchgeführt, die im März 2010 veröffentlicht wurde (Riddervold et al., 2010). Diese Studie wird im Kap. 4.3.4.2 näher beschrieben.

## 4. Ergebnisse aus Forschungsprojekten

Von den Ergebnissen aus den verschiedenen Forschungsprogrammen und -projekten ist bis dato nur ein relativ kleiner Teil in peer-reviewed Fachzeitschriften publiziert worden. Aus diesem Grund standen für die nachfolgende Beschreibung mancher Studien nur Informationen aus Endberichten, Abstracts von wissenschaftlichen Kongressen oder Präsentationen zur Verfügung.

### 4.1 Studien zu Exposition und Dosimetrie bei TETRA

Wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit Art und Ausmaß der Exposition von Personen durch die TETRA-Technologie befassen, liegen bisher in nur relativ geringem Umfang vor.

In einer ausführlichen, auf FDTD-Computersimulationen (Finite Difference Time Domain) beruhenden Arbeit befassen sich Dimbylow und Mitarbeiter konkret mit der Exposition des menschlichen Kopfes durch TETRA-Funkgeräte (Dimbylow et al., 2003b, 2003a). Als Kopfmodell diente ein MRI-basiertes Modell eines Mannes mit neun unterscheidbaren Gewebebereichen. In Anlehnung an die ersten kommerziell erhältlichen TETRA-Handgeräte (Simoco und Motorola MTP700) wurden zwei unterschiedliche vereinfachte numerische Quellenmodelle erstellt. Als Gerätegehäuse wurde für beide Quellenmodelle jeweils eine quaderförmige Metallbox (34 mm x 50 mm x 134 mm) mit 6 mm Kunststoffüberzug verwendet,

als Antenne einmal eine Helix- (8 mm Durchmesser, 4 mm Windungsabstand) und einmal eine Monopolantenne (15 cm lang). Die verwendeten Antennenmodelle wurden messtechnisch anhand der Nahfeldverteilung validiert. Als Expositionssituationen wurden Haltungen vor dem Gesicht und seitlich neben dem Kopf betrachtet. In der Situation mit dem TETRA-Funkgerät vor dem Gesicht betrug der Minimalabstand vom Gerätegehäuse zur Kopfoberfläche ca. 6 mm und die Gehäuseoberkante lag etwa auf Höhe der Augenbrauen (senkrechte Ausrichtung des Gerätes). Bezüglich der Lage des Antennenfußpunktes relativ zum Kopf wurden vier unterschiedliche Fälle betrachtet: Mittelachse des Gerätegehäuses mittig zum Kopf, Antennenachse mittig vor rechtem Auge, Antennenachse mittig vor linkem Auge und Antennenachse mittig zum Kopf, wobei im letzten Fall das Gerät ca. 5 cm tiefer angenommen wurde, d.h., mit der Gehäuseoberkante etwa auf Höhe der Nasenspitze. Für die Haltung der Geräte seitlich des Kopfes wurden die Standardpositionen „cheek“ und „tilt“ gemäß IEC 62209-1 gewählt, bei denen (in einer Seitenansicht) die Gerätemittelachse mit der gedachten Linie vom Gehörgang zur Mundöffnung zur Deckung gebracht und die Mitte des Lautsprechers auf Höhe des Gehörgangs platziert wird, sowie das Gerät die Ohrmuschel berührt. In „cheek“ berührt zusätzlich der untere Bereich des Gerätegehäuses die Wange (Antenne entfernt sich dabei im Allgemeinen von der Kopfregion unmittelbar hinter dem Ohr) und in „tilt“ wird das Gerätegehäuse gegenüber der Grundausrichtung um 15° von der Wange wegbewegt, sodass sich die Antenne der Kopfregion hinter dem Ohr stark annähert. Zusätzlich wurden in dieser Arbeit einige Gerätepositionen untersucht, bei denen die Lage des Gerätes entlang der gedachten Linie vom Gehörgang zur Mundöffnung um einige Zentimeter variiert wurde.

Zusammenfassend zeigen die Berechnungsergebnisse aller untersuchten Gerätepositionen und Gerätemodelle maximale, über 10g zusammenhängendes Gewebe gemittelte SAR-Werte (maxSAR10g) zwischen ca. 0,4 W/kg und 1 W/kg für ein TETRA-Funkgerät mit 1 W Spitzsendeleistung, wobei das Gerätemodell mit Helixantenne tendenziell zu höheren maxSAR10g Werten führte. Dies weist darauf hin, dass für 1W TETRA-Geräte davon ausgegangen werden kann, dass unter üblichen Gebrauchsbedingungen die ICNIRP Basiswerte sowohl für die Allgemeinbevölkerung als auch für berufliche Exposition nicht überschritten werden. Für (ebenfalls erhältliche) TETRA-Handgeräte mit 3 W Spitzsendeleistung kann diese Aussage im Hinblick auf die Allgemeinbevölkerung nur mehr für Geräte mit Monopolantenne aufrechterhalten werden. Bei 3 W Geräten mit Helixantenne sind demnach Überschreitungen des Basiswertes für die Allgemeinbevölkerung möglich, hinsichtlich der Basiswerte für berufliche Exposition kann aber auch für 3 W Geräte mit Helixantenne unter üblichen Gebrauchsbedingungen die Übereinstimmung mit den Schutzziele der ICNIRP Guidelines angenommen werden.



In einem 2006 abgeschlossenen Forschungsvorhaben im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms wurde die Absorptionsverteilung im menschlichen Kopf im Mobilfunkfrequenzbereich untersucht, wobei besonderes Augenmerk auf die Verhältnisse in kleinen, bis dahin noch nicht berücksichtigten Strukturen (Innenohr, Pinealdrüse, Augendetails) und auf die mit der Absorption einhergehende Gewebetemperaturerhöhungen unter Berücksichtigung thermophysiologicaler Parameter gelegt wurde (Schmid et al., 2006). Alle Analysen erfolgten auf Basis von FDTD-Berechnungen und eines detaillierten männlichen anatomischen Kopfmodells (57 unterschiedliche Gewebe- bzw. Organbereiche), wobei zum damaligen Zeitpunkt noch nicht verfügbare dielektrische und thermische Gewebeparameter der Pinealdrüse und des Innenohres in eigenen Messserien an menschlichem Gewebe ermittelt wurden (Schmid et al., 2007b; Schmid et al., 2007c). Neben Quellenmodellen repräsentativ für GSM900-, GSM1800- und UMTS-Mobiltelefone wurde auch konkret die Exposition durch ein Handfunkgerät bei 400 MHz mit Helixantenne analysiert, das als realistisches Modell eines TETRA Handgerätes angesehen werden kann. Das Quellenmodell bestand aus einem Metallquader als Gerätegehäuse (30 mm x 50 mm x 130 mm) mit Helixantenne (Durchmesser 8,6 mm, axiale Länge 61 mm, Drahtdurchmesser 1 mm, 14 Windungen). Zur Abdeckung realistischer worst case Gebrauchshaltungen wurde einerseits die Positionierung des Gerätes mit dem Antennenfußpunkt vor dem (geschlossenen) linken Auge (Distanz zwischen Augenlid und Antennenfußpunkt ca. 2,5 cm) und andererseits die Positionierung seitlich neben dem Kopf in „tilt“ Position gemäß IEC 62209-1 gewählt.

Aus den Berechnungsergebnissen in Schmid et al. (2006) können für reale TETRA Handgeräte mit 1 W Spitzensendeleistung maxSAR10g Werte im Bereich zwischen 0,25 W/kg (Positionierung vor dem Auge) und 1 W/kg (seitliche Positionierung) abgeleitet werden, die sehr gut mit den oben genannten Befunden von Dimbylow et al. (2003a) übereinstimmen. Bei der Haltung des Gerätes vor dem Auge liegt bei den TETRA-Frequenzen das Absorptionsmaximum in der Haut, sowie in den vorderen Bereichen des Glaskörpers. Bei der seitlichen Positionierung des Gerätes, sind die Ohrmuschel, die angrenzende Kopfhaut und im Gehirn vor allem der Temporallappen die Bereiche mit der größten Absorption. Die maximalen bei den betrachteten Expositionssituationen zu erwartenden Temperaturanstiege im Gewebe, wurden unter der Annahme einer Ausschöpfung des ICNIRP-Basiswertes für die Allgemeinbevölkerung (d.h., SAR10g = 2W/kg) berechnet (Schmid et al., 2006; Schmid et al., 2007a). In peripheren Gehirnbereichen zeigten sich maximale Temperaturanstiege von bis zu ca. 0,15°C, im Innenohr bis zu ca. 0,08°C, sowie in tiefer liegenden Gehirnarealen bis zu ca. 0,05°C. Höhere maximale Temperaturanstiege ergaben sich in peripheren Gewebeschichten, z.B. der Haut mit bis zu ca. 0,9°C. Auch im Auge können, bei Haltung der

Quelle ca. 2,5 cm vor dem Auge, unter ungünstigen thermophysiologischen Bedingungen Temperaturerhöhungen im Auge bis zu ca. 0,9°C auftreten. Zu beachten ist, dass die genannten Temperaturanstiege für einen maxSAR10g Wert von 2 W/kg berechnet wurden und sich nur bei ausreichend langer Exposition (> ca. 20 Minuten) einstellen. Bei geringerer Befeldung (geringerer maxSAR10g) bzw. kürzerer Befeldungsdauer ergeben sich entsprechend geringere Temperaturanstiege.

Speziell mit dem Temperaturanstieg im Auge bei Befeldung mit Frequenzen des Mobilfunks (380 MHz, 900 MHz und 1800 MHz) befasst sich Wainwright (2007). Der Autor verwendet dabei die gleichen Abmessungen für das Gerätegehäuse wie Dimbylow et al. (2003a, 2003b), betrachtet bei 380 MHz jedoch unterschiedliche Monopol- und Helixantennen. Auch das verwendete Kopfmodell ist grundsätzlich das gleiche wie das von Dimbylow et al. (2003a, 2003b) verwendete, wobei jedoch die Augen bei Wainwright (2007) manuell als Kugelmodelle hinzumodelliert wurden, da die Augen im Originalkopfmodell nur sehr grob aufgelöst waren. Das verbesserte Augenmodell berücksichtigte schließlich Cornea, Sclera, Glaskörper und Linse. Im Unterschied zu den Berechnungen von Schmid et al. (2006; 2007a) entspricht die Situation bei Wainwright (2007) einem geöffnetem Auge (kein Lid vor dem Augapfel). Für die Berechnungen wurde eine worst case Expositionssituation mit dem senkrecht ausgerichteten Gerät vor dem Gesicht und einer Distanz von 24 mm vom Auge zum Antennenfußpunkt gewählt.

Für ein TETRA-Handgerät mit 1 W Spitzsendeleistung zeigen die Berechnungsergebnisse, je nach verwendetem Antennenmodell, maxSAR10g Werte im Bereich von 0,2 bis 1 W/kg (Maximum mit einer Helixantenne), was wieder sehr gut mit den von Dimbylow et al. (2003a, 2003b) und Schmid et al. (2006; 2007a) berichteten Werten übereinstimmt. Bezüglich des maximal im Auge auftretenden Temperaturanstieges bezogen auf die maxSAR10g, liegen die von Wainwright (2007) publizierten Ergebnisse bei maximal 0,11°C/W/kg, und damit deutlich (um ca. einen Faktor vier) geringer als bei Schmid et al. (2006; 2007a). Dieser Unterschied ist wahrscheinlich vor allem auf die beiden folgenden Unterschiede in der thermischen Modellierung der beiden Arbeiten zurückzuführen: Erstens betrachtet Wainwright (2007) ein geöffnetes Auge, d.h., über die feuchte Augenoberfläche ist bei Wainwright (2007) effizienter Wärmeaustausch mit der Umgebung (20°C), und damit zusätzliche Kühlung möglich, was bei Schmid et al. (2006; 2007a) aufgrund der Annahme geschlossener Augen nicht gegeben ist. Zudem wurde bei Schmid et al. (2006; 2007a) eine Umgebungstemperatur von 25°C angenommen. Zweitens unterscheiden sich die durch den Blutfluss in der Sclera gegebenen (und den Wärmeabtransport bestimmenden) Wärmetransferkoeffizienten zwischen den genannten Arbeiten.

Die einzigen bisher zumindest in Form von Projektberichten veröffentlichten Arbeiten, die auch von messtechnischen Untersuchungen an einem realen TETRA-Handgerät berichten, wurden im Rahmen des Britischen Mobilfunkforschungsprogramms durchgeführt (Chadwick, 2003, 2006). Es wurden dabei umfangreiche Messungen und numerische Berechnungen mit einem Modell des Motorola MTP700 Funkgerätes durchgeführt und auch die Exposition durch auf Fahrzeugen montierte TETRA-Antennen untersucht. Eine Vielzahl von Expositionssituationen im Auto, auf dem Motorrad, sowie unterschiedliche Trageweisen und Benützungsbedingungen (vor dem Gesicht, seitlich zum Kopf, am Rumpf, an einem Gürtel und an der Schulter, montiert auf einer Einsatzweste für Polizeibeamte) wurden berücksichtigt. Weiterhin wurde die Veränderung der Exposition (SAR) bei Benützung von Freisprecheinrichtungen untersucht. Die umfangreichen Ergebnisse dieser Arbeiten lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die maximalen SAR<sub>10g</sub> Werte, gemessen in einem homogenen Körperphantom unter Berücksichtigung unterschiedlicher realistischer Trageweisen und Positionierungen am Rumpf lagen für das untersuchte Gerät (1 W Spitzsendeleistung) im Bereich 0,2-0,9 W/kg. Die maximalen SAR<sub>10g</sub> Werte, gemessen in einem homogenen Kopfphantom unter Berücksichtigung unterschiedlicher Trageweisen und Positionierungen lagen für das untersuchte Gerät (1 W Spitzsendeleistung) im Bereich 0,2-0,7 W/kg. Die Exposition der Besatzung durch auf Fahrzeugen (Einsatzfahrzeuge, Polizeimotorräder) montierten TETRA-Antennen liegt typischerweise unterhalb von 0,1 W/kg, auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass auf Fahrzeugen montierte Antennen teilweise mit mehr als 1 W Spitzsendeleistung arbeiten. Die Verwendung von Zubehör zu Handgeräten (z.B. hands free kits) führt unter üblichen Bedingungen zu kleineren maxSAR<sub>10g</sub> Werten als dies ohne Verwendung des Zubehörs der Fall wäre. Bei gleichzeitiger Verwendung mehrerer TETRA Geräte innerhalb eines (teilgeschirmten) Raumes sind Beiträge der Geräte anderer Personen für die resultierende maxSAR<sub>10g</sub> eines Benutzers vernachlässigbar, d.h. der bestimmende Faktor ist stets die Exposition durch das eigene Gerät.

Im Hinblick auf die Exposition durch TETRA-Handgeräte zeigen daher alle bisher vorliegenden Arbeiten übereinstimmend, dass für übliche Nutzungsszenarien die ICNIRP Basiswerte für berufliche Exposition nicht überschritten werden, selbst wenn man die Benutzung leistungsstarker Geräte (mit 3 W Spitzsendeleistung) betrachtet. Für die am häufigsten eingesetzten Geräte mit 1 W Spitzsendeleistung ist im Allgemeinen sogar die Übereinstimmung mit den Basiswerten für die Allgemeinbevölkerung anzunehmen.

Bezüglich der Exposition durch TETRA-Basisstationen, bzw. der Exposition im Fernfeld von TETRA-Geräten im Allgemeinen, liegen bisher nur sehr wenige Arbeiten vor, nicht zuletzt

deshalb, weil die Immissionen erwartungsgemäß vergleichsweise gering sind und sich die TETRA-Netze in Europa derzeit noch im Ausbau befinden.

Eine Forschungsarbeit, die als Poster auf dem BioEM-Kongress 2009 in Davos vorgestellt wurde (Valic et al., 2009), befasst sich ganz allgemein mit der Belastung der slowenischen Bevölkerung durch elektromagnetische Felder des Mobilfunks. Dazu wurden unter anderem auch Messwerte für TETRA angegeben. Die Messungen erfolgten mittels Personendosimeter (EME SPY 120, Antennessa), die von insgesamt 54 Freiwilligen im Zeitraum Juli 2007 bis November 2008 getragen wurden. Für TETRA-Immissionen wurden Maximalwerte von 0,79 V/m im städtischen Außenbereich, 0,24 V/m am Arbeitsplatz und 0,14 V/m im städtischen Heimbereich (Innenraum) angegeben. Alle Mittelwerte dieser Ortskategorien, sowie auch alle Maximalwerte der weiteren Kategorien ländlicher Wohnraum (Innenraum) und ländlicher Außenbereich lagen an oder unterhalb der Nachweisgrenze des eingesetzten Dosimeters (0,05 V/m). Im Vergleich zu den ICNIRP-Referenzwerten für die Allgemeinbevölkerung sind die gemessenen Maximalwerte der TETRA-Immissionen daher sehr gering (< 3% der Grenzwerte).

Neubauer und Freudenthaler (2008) berichteten auf dem Kongress der Bioelectromagnetics Society 2008 in Kalifornien von der Erfassung der Immissionen von TETRA-Basisstationen in Wien. Zur Immissionserfassung wurde auch hier das Personendosimeter EME SPY 120 von Antennessa verwendet. Die dabei aufgetretenen Maximalwerte lagen bei 0,29 V/m im U-Bahnbereich und bei 0,78 V/m im städtischen Außenbereich und waren damit wesentlich geringer als die Immissionen der etablierten GSM- und UMTS-Mobilfunknetze.

#### 4.2 In-vitro-Studien

In den von der FGF geförderten Projekten zu biologischen Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (380 MHz; mit 17,65 Hz Pulsung) auf die Mutationsrate und die Rate der Zellproliferation bei menschlichen Lymphozyten (Antonopoulos et al., 1997; Antonopoulos et al., 1998; Gollnick, 1997) und auf das Wachstumsverhalten menschlicher Leukämie-Zellkulturen (Fitzner et al., 1997; Gollnick, 1997) fanden sich keine Unterschiede zwischen befeldeten und unbefeldeten Zellen.

In der Studie von Antonopoulos et al (1997; 1998) wurden die Geschwindigkeit des Zellzyklus und die Frequenz des Schwesterchromatid-Austauschs (Chromosomenmutation) bei menschlichen Lymphozyten unter Befeldung mit drei unterschiedlichen Feldern

untersucht (1800 MHz gepulst; 900 MHz gepulst; 380 MHz mit 17,65 Hz gepulst). In der TETRA-Expositionsbedingung betrug die SAR im Mittel 82,9 mW/kg und die maximale Leistung 90 W. Die Zellkulturen wurden kontinuierlich 48, 52, 56, 64 und 68 Stunden lang exponiert und mit scheinexponierten Zellkulturen verglichen. Angaben zur Verblindung fehlen. Es zeigten sich keine Effekte der unterschiedlichen Expositionen auf die untersuchten Parameter.

Zur Studie von Fitzner und Mitarbeiter ist zum Teilaspekt TETRA und Auswirkung auf das Wachstumsverhalten menschlicher Zellkulturen derzeit nur der Endbericht mit unbekanntem Erstellungsdatum auf der FGF-Homepage (Fitzner et al., 1997) abrufbar, sowie weitere Informationen zu dieser Studie, die in einem Teilbericht zum Verbundvorhaben „Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder“ ebenfalls auf der Homepage der FGF zum Download bereitgestellt werden (Gollnick, 1997). In dieser Studie wurde untersucht, ob eine Exposition mit unterschiedlichen Hochfrequenz-Feldern das Wachstumsverhalten von menschlichen Zellen eines humanen Leukämie-Stammes (HL-60 Zellen) beschleunigen und daher eine krebsfördernde Wirkung haben könnte. Das TETRA-Signal wurde 24 Stunden lang mit einem 380 MHz-Signal (17,65 Hz gepulst; SAR-Zielwert: 80 mW/kg; mittlerer SAR-Wert: 77,7 mW/kg) appliziert. Der Vergleich von 48 Testserien zwischen den exponierten Zellen und den unbefeldeten Kontrollzellen zeigte weder einen Unterschied in der Vermehrungsgeschwindigkeit, gemessen anhand der Verdopplungszeit, noch in der Synthese und Freisetzung des Enzyms Thymidinkinase.

In einer In-vitro Studie, die am „Defence Science and Technology Laboratory“ (Dstl) in Großbritannien durchgeführt wurde, wurde untersucht, ob TETRA-Hochfrequenz-Felder neben den bekannten Erwärmungseffekten auch „nicht-thermale“ Auswirkungen auf biologische Systeme besitzen (Green et al., 2005; Smith et al., 2005).

Der Beweggrund für diese Studie basierte auf den Ergebnissen zweier unabhängiger Arbeitsgruppen, die in den 1970er und 1980er Jahren Effekte von elektromagnetischen Feldern auf die  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen Aktivität nachweisen konnten. So fanden beispielsweise Bawin et al. (1975) heraus, dass in Folge einer zwanzigminütigen amplitudenmodulierten (0 – 35 Hz) VHF-Befeldung (VHF= very high frequency bzw. Ultrakurzwellen; 147 MHz, ca. 1 mW/cm<sup>2</sup>) von histologischen Hirnpräparaten (Vorderhirnhälften von frisch geschlüpften Kücken) ein erhöhter  $\text{Ca}^{2+}$ -Efflux bei Amplitudenmodulationen zwischen 6 und 20 Hz mit einem maximalen Effekt bei 16 Hz auftritt. Blackman et al. (1979) konnten dieses Ergebnis in einem vergleichbaren Versuchdesign (angewandte Energiedichten: 0,5 – 2 mW/cm<sup>2</sup>) nicht nur bestätigen, sondern zusätzlich noch ein schmales „Energiedichtefenster“ mit einer spezifischen Energiedichte von 0,75 mW/cm<sup>2</sup> beobachten. Ähnliche Befunde konnten auch

bei einer 50Hz-Trägerfrequenz (Blackman et al., 1980) und bei einer 450 MHz-Trägerfrequenz (Bawin et al., 1978) erzielt werden.

In der Studie von Green et al. (2005) wurde untersucht inwieweit TETRA-Signale mit einer Trägerfrequenz von 380,9 MHz und mit einer Pulsung von 17,6 Hz (Tastgrad 25%), welche einer 16 Hz-Modulation nahekommt, die intrazelluläre Ca<sup>2+</sup>-Signalgebung erregbarer Zellen beeinflussen. Für die Messung der intrazellulären Ca<sup>2+</sup>-Konzentration wurden die Versuchspräparate, kultivierte Kleinhirn-Körnerzellen und Herz-Myozyten der Ratte, vor der Exposition im Gegensatz zu den früheren Experimenten nicht mit radioaktivem Ca<sup>2+</sup>, sondern mit den Ca<sup>2+</sup>-sensitiven fluoreszierenden Sonden Fura-PE3, Fluo-3 (Körnerzellen) und Fluo-4 (Herz-Myozyten) beladen. Die Studie gliederte sich in drei Teilerperimente, bei denen neben der modulierten TETRA-Exposition (SAR-Werte zwischen 5 mW/kg und 400 mW/kg) jeweils auch eine Sham-Exposition durchgeführt wurde. Die Befeldung der Zellkulturen sowie die Auswertung wurden blind durchgeführt.

Beim ersten Teilversuch wurde das Hauptaugenmerk auf die intrazelluläre Ca<sup>2+</sup>-Konzentration der Körnerzellen während des Ruhezustandes gelegt. Doch weder eine kontinuierlich über 20 min andauernde Exposition mit einer SAR von 400 mW/kg noch eine vierzigminütige Exposition mit vier verschiedenen aufeinander folgenden SARs (5 mW/kg, 10 mW/kg, 20 mW/kg, 50 mW/kg – jeweils 10 min) führten, verglichen mit der jeweiligen Sham-Bedingung, zu signifikanten Veränderungen des Ruhezustandes der Körnerzellen. Eine im Anschluss an die Exposition experimentell durch K<sup>+</sup>-Zugabe ausgelöste Depolarisation sollte die funktionale Viabilität der Körnerzellen sicherstellen.

Mit Hilfe des zweiten Teilversuches wurde untersucht, ob eine Exposition die intrazellulären Ca<sup>2+</sup>-Konzentrationen der Körnerzellen während einer Depolarisation beeinflusst. Diesbezüglich wurde innerhalb eines 20-minütigen Expositionsintervalls (SAR 400 mW/kg) nach 10 min erneut durch K<sup>+</sup>-Zugabe eine Depolarisation ausgelöst. Dieses Teilerperiment wurde zusätzlich noch mit der Ca<sup>2+</sup>-sensitiven fluoreszierenden Sonde Fluo-3 durchgeführt. Obwohl unter beiden Versuchsbedingungen signifikant größere maximale Ca<sup>2+</sup>-Konzentrationen gemessen werden konnten, scheint dieser Effekt eher auf einer biologischen Streuung zwischen einzelnen Zellkulturen zu beruhen.

Das dritte Teilerperiment diente der Überprüfung von Expositionsauswirkungen auf Frequenz und Amplitude spontaner Ca<sup>2+</sup>-Einströme in Herz-Myozyten. Die jeweils 11-minütigen Expositionen wurden sowohl mit einer SAR von 400 mW/kg als auch mit einer SAR von 50 mW/kg durchgeführt. Bei einem Teil der Versuche wurde die Exposition durch

eine pharmakologische Behandlung mit Salbutamol oder Acetylcholin ersetzt. Es konnten unter beiden Expositionsbedingungen keine signifikanten Unterschiede zwischen Verum und Shamexposition gefunden werden. Wie erwartet führte die Zugabe von Salbutamol zu einer Zunahme der Frequenz und der Amplitude spontaner  $\text{Ca}^{2+}$ -Einströme, während unter Acetylcholineinfluss eine verringerte Frequenz und eine leichte Veränderung der Amplitude spontaner  $\text{Ca}^{2+}$ -Einströme beobachtet werden konnte.

Zusammenfassend liefern die Ergebnisse aller drei Teilerperimente keine Hinweise für einen Zusammenhang zwischen TETRA-Exposition mit den verwendeten SAR-Werten und einem biologisch relevanten Effekt in Bezug auf die intrazelluläre  $\text{Ca}^{2+}$ -Signalgebung erregbarer Zellen.

### 4.3 In-vivo-Studien

#### 4.3.1 Tier-Experimente

Im Rahmen des Britischen Mobilfunkforschungsprogramms wurden Effekte unterschiedlicher elektromagnetischer Quellen (GSM 900 MHz, UMTS 2200 MHz, TETRA 400 MHz) auf Gehirnfunktionen sowie auf die Gen- und Proteinexpression bei erwachsenen männlichen Mäusen untersucht (Sienkiewicz, 2006). Einfache oder wiederholte Exposition des Kopfes der Tiere führten zu keinen lang anhaltenden Einflüssen auf die Physiologie und die Funktion des Gehirns. Die Tiere wurden in einer speziellen Vorrichtung fixiert und entweder exponiert (TETRA 400 MHz: mittlere SAR im Gehirn für niedrige Exposition:  $2.6 \pm 0.4 \text{ W kg}^{-1}$ ; mittel:  $13.0 \pm 0.3 \text{ W kg}^{-1}$ ; hoch:  $26.0 \pm 0.6 \text{ W kg}^{-1}$ ) oder scheinexponiert. Die Mäuse wurden entweder pulsmodulierten oder unmodulierten Signalen ausgesetzt. Pro Expositionsbedingung wurden acht Mäuse untersucht. In der einfachen „akuten“ Expositionsbedingung wurden die Tiere für die Dauer einer Stunde verum- oder scheinbefeldet. Zur Überprüfung eines möglichen Einflusses von RF-EMF (radiofrequente elektromagnetische Felder) auf räumliches Lernen und Arbeitsgedächtnis diente das Morris Wasserlabyrinth für Mäuse. Dabei mussten die Mäuse den Weg vom Beckenrand zu einer unter dem Wasser versteckten Plattform finden. Sowohl die Strecke als auch die Zeit, die zum Erreichen des Ziels benötigt wurde, wurden analysiert. Die Exposition fand jeweils direkt vor Durchführung dieser Aufgabe statt. Es zeigten sich keine Unterschiede in den Testparametern im Morris Wasserlabyrinth zwischen den Schein- und den verschiedenen Expositionsbedingungen.

In einem weiteren Experiment wurden erwachsene männliche Mäuse für eine Stunde entweder gepulsten 400, 900 oder 2200 MHz Signalen ausgesetzt oder den entsprechenden

unmodulierten Frequenzen. Die SAR betrug unter TETRA in etwa  $20 \text{ W kg}^{-1}$ . Direkt nach der Befeldung wurde hippocampales Gewebe entnommen und bei konstanter Temperatur und unter Beigabe von künstlicher Gehirn- und Rückenmarksflüssigkeit wurden extrazelluläre Feldpotentiale abgeleitet. Pro Tier wurde eine Gewebeprobe untersucht. Die Untersucher waren bezüglich der Expositionsbedingung bei Durchführung und Auswertung blind. Es konnten zwischen 8 und 13 Potentiale pro Bedingung analysiert werden. Während für GSM900 und UMTS keine Unterschiede zur Scheinbedingung bei den exzitatorischen postsynaptischen Potentialen (EPSP) und beim Summenaktionspotential auftraten, wurden unter pulsmodulierter 400 MHz-Exposition geringere Amplitudenanstiege beim Summenaktionspotential im Vergleich zu unmodulierter oder Scheinexposition gefunden. Konkrete p-Werte sind im Endbericht nicht angegeben. Die Reizschwellen unterschieden sich hingegen nicht. Bei Betrachtung des Verhältnismaßes zwischen EPSP und Summenaktionspotential zeigte sich kein Unterschied zwischen den einzelnen Expositionsbedingungen und der Scheinexposition. Auch bei der Untersuchung der Langzeitpotenzierung, unter welcher länger andauernde Veränderungen in der synaptischen Übertragung verstanden werden und die mit Gedächtnisprozessen auf zellulärer Ebene vergleichbar sind, konnten keine Einflüsse der verschiedenen RF-Expositionen beobachtet werden. Der Autor schloss daher, dass der signifikante Einzelbefund unter pulsmodulierter TETRA-Exposition auf experimentelle Schwankungen zurückzuführen sei, und dass dieses Ergebnis nicht als tatsächlicher RF-Effekt zu interpretieren ist.

Zur Untersuchung möglicher RF-Effekte auf die Gen- bzw. Proteinexpression im Gehirn wurden die umfassenden Möglichkeiten der Microarraytechnologie genutzt. Zum Ausschluss falsch positiver Befunde wurden Western Blots und/oder Real Time PCRs (Polymerase Kettenreaktion) mit einer TaqMan Sonde durchgeführt. Zur Kontrolle von temperaturbedingten Veränderungen wurden zusätzlich die Konzentrationen von Hitzeschockproteinen mitbestimmt. In Vorversuchen wurde geklärt, welche von drei verschiedenen RNA-Extraktionsmethoden (RNA=Ribonukleinsäure) den höchsten Ertrag für das spezifische Hirngewebe (Hippocampus) lieferte und ob die Expositionsprozedur als solches, die für das Tier mit einem einschränkenden Stress verbunden ist, einen Einfluss auf die Genexpression hat. Um letzteres zu überprüfen, wurden in einer verblindeten Studie je 4 Tiere in folgenden Experimentalgruppen untersucht: Käfigkontrollen (nicht gestresst), akute Stressgruppe ohne Erholung und eine über 10 Tage an den Stress adaptierte Gruppe. Zwischen der akut gestressten Gruppe und der habituierten Gruppe ließen sich keine Unterschiede in der Expression von Genen im Hippocampus beobachten. Beim Vergleich der gestressten Gruppen gegen die Käfigkontrollen waren jedoch Unterschiede im Expressionsprofil von weniger als 20 Genen, deren Expression und Funktion möglicherweise



mit der Regulation von Stress im Gehirn zusammenhängen, zu beobachten. Da nur eine relativ geringe Anzahl von Genen aufgrund der experimentellen Bedingung Veränderungen aufwies, wurde geschlussfolgert, dass daraus keine Probleme hinsichtlich der Erkennung von RF bedingten Effekten auf die hippocampale Genexpression resultieren sollten.

Nach akuter Exposition mit 400, 900 oder 2200 MHz Feldern sowie wiederholter Exposition mit 900 MHz Feldern wurden Gehirnproben vom Hippocampus, Cerebellum, vom Thalamus sowie vom frontalen und lateralen Kortex entnommen und bei -80 °C gelagert. Von je drei Tieren wurde unter Wahrung der Verblindung RNA aus dem hippocampalen Gewebe gewonnen und mit dem Affymetrix Mouse 430 2.0 Genchip hybridisiert, der mehr als 39.000 transkribierte Gene erfasst, von denen mehr als 34.000 gut charakterisiert sind. Es wurden interne Kontrollen (22 unabhängige Indikatoren - Flags - des Hybridisierungsprozesses) als Marker der Reliabilität der individuellen Gene-mRNA Interaktion mitberücksichtigt, um die Reliabilität der nachfolgenden statistischen Analyse zu gewährleisten, welche eine Varianzanalyse (ANOVA) und den Student-Newman-Keuls Test als Post-Hoc Testverfahren umfasste. Alle statistischen Tests wurden mit dem Programm GeneSpring durchgeführt. Die Analyse wurde mit unterschiedlichen Filterbedingungen (Anwesenheit von Flags in 0 bis 75% der Proben) durchgeführt. Lediglich unter der Bedingung Abwesenheit von Flags und bei veränderter Gruppengröße, d.h. bei Ausschluss einiger Proben (eine Vorgehensweise, die anfälliger für die Erzeugung falsch positiver Ergebnisse ist), wurde unter gepulster 900 MHz Exposition eine kleine Anzahl von Genen identifiziert, die möglicherweise in die Regulation des Zellzyklus involviert sind und die mittels RT-PCR mit TaqMan Sonde genauer untersucht wurden. Eine Veränderung unter 400 MHz Exposition wird in dem vorliegenden Projektbericht nicht erwähnt.

Lerchl et al. (2008) haben untersucht, ob eine chronische Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern sowohl im TETRA- als auch im GSM- Bereich Auswirkungen auf das Körpergewicht von Hamstern als Indikator metabolischer Veränderungen hat. Im Zuge eines Experiments zum Einfluss von EMF auf die Lymphombildung bei weiblichen AKR/J-Mäusen konnten Sommer et al. (2004) feststellen, dass in Folge einer ca. ein Jahr dauernden Exposition mit modulierten GSM 900 MHz Signalen (Up- und Downlink: 2,1 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 1733 Hz; SAR: 0,4 W/kg) das Gewicht der Mäuse über den Versuchszeitraum hinweg zunahm. Nachdem AKR/J-Mäusen mit UMTS-Signalen exponiert wurden, konnte dieser Befund allerdings nicht bestätigt werden (Sommer et al., 2007). Eine zweijährige 650 MHz-Befeldung von Kaninchen hatte ebenfalls keine Auswirkungen auf das Gewicht der Tiere (Tarantino et al., 2005), wobei bei dieser Studie die Anzahl der Tiere mit acht Individuen pro Gruppe möglicherweise auch zu gering war, um signifikante Gewichtszunahmen feststellen zu können.

In der Studie von Lerchl et al. (2008) wurde mittels eines Radioimmunassays (RIA) zusätzlich zum Gewicht auch der Melatoningehalt im Serum und im Epiphysen-Homogenat gemessen. Es ist bekannt, dass Melatonin u.a. onkostatistische Wirkungen besitzt. So konnte beispielsweise in Tierexperimenten gezeigt werden, dass eine Melatonininjektion bei Ratten die Entwicklung eines chemisch induzierten Brustkrebses hemmen konnte. Eine chirurgische Entfernung der Epiphyse führte hingegen zu einer gesteigerten Entwicklung des chemisch induzierten Brustkrebses (Blask et al., 1991; Tamarkin et al., 1981). Stevens und Davis (1996) äußern in der sog. „Melatonin-Hypothese“ die Vermutung, dass es in Folge von EMF zu einer Reduktion der Melatoninsynthese kommen könnte und somit ein erhöhtes Brustkrebsrisiko vorliegen kann. Sowohl der Nachweis von EMF-Effekten auf die Melatoninsynthese (beim Tier und Menschen) als auch ein erhöhtes Brustkrebsrisiko in Folge eines veränderten Melatoninniveaus (beim Menschen) beruhen bisher erst auf einzelnen Beobachtungen, und ein direkter Zusammenhang konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Studie von Lerchl et al. (2008) gliederte sich in drei Telexperimente, in denen männliche Dsungarische Zwerghamster (3-7 Monate alt) unterschiedlichen elektromagnetischen Feldern ausgesetzt wurden. Im ersten Teilversuch wurde eine standard-modulierte TETRA-Befeldung (383 MHz Trägerfrequenz, 17,6 Hz Pulsmodulation) verwendet. Die Teilversuche zwei und drei umfassten Expositionen, deren Modulationen ein typisches GSM-Szenario mit verschiedenen Up- und Downlink-Frequenzen (2,1 Hz, 8,3 Hz, 217 Hz, 1733 Hz) simulieren sollten. Dabei wurde der zweite Versuch mit einer 900 MHz Trägerfrequenz und der dritte Versuch mit einer 1800 MHz Trägerfrequenz durchgeführt. Die Exposition dauerte jeweils kontinuierlich 60 Tage an. In den Experimenten wurden je 120 Hamster mit einer spezifischen Absorptionsrate von 80 mW/kg exponiert. Zusätzlich wurden jeweils 120 Hamster scheinexponiert. Die Studie wurde verblindet durchgeführt. Die Tiere wurden in allen drei Teilversuchen randomisiert den Expositionsbedingungen zugeteilt. Die TETRA-Exposition führte verglichen mit der Scheinexposition zu einem signifikanten transienten Anstieg des Körpergewichts (bis zu 4 %), der jedoch nur zwischen dem 20. und 30. Versuchstag beobachtet werden konnte. Die Exposition bei 900 MHz hatte einen deutlicheren Anstieg des Körpergewichts zur Folge (bis zu 6 %), der auch bis zum Ende des Versuchs andauerte. Bei der 1800 MHz-Befeldung konnten hingegen keine Veränderungen im Körpergewicht der Zwerghamster beobachtet werden. Der Melatonin-Gehalt der Epiphyse und im Serum wurde unter keiner der drei Bedingungen beeinflusst. Ebenso wiesen auch das Gewicht des Gehirns, der Leber, der Nieren und der Hoden unter keiner der drei verwendeten Expositionen Veränderungen auf.

Diese Ergebnisse eines unveränderten Melatoningehalts in Folge von EMF-Expositionen stehen im Einklang mit Studien, die ebenfalls sowohl in Tierversuchen in vivo (Vollrath et al., 1997) und in vitro (Sukhotina et al., 2006) als auch beim Menschen (de Seze et al., 1999) keine Zusammenhänge zwischen EMF-Befeldung und Melatoninproduktion fanden. Obwohl die Ergebnisse der Gewichtszunahme in Folge einer EMF-Exposition noch weiter untersucht werden müssen, ist es nach der Ansicht der Autoren möglich, dass die aufgrund einer EMF-Befeldung absorbierte Energie zur Wärmeproduktion beitragen kann, woraus Veränderungen im Energiestoffwechsel und folglich eine Gewichtszunahme resultieren können. Dieser Effekt scheint aber abhängig von der Frequenz der EMF zu sein, da EMF mit geringeren Frequenzen tiefer ins Gewebe eindringen als EMF mit höheren Frequenzen und somit eher die Körpertemperatur beeinflussen können (Gabriel et al., 1996).

#### 4.3.2 Studien zu berufsbedingter Nutzung von TETRA

In einer Pilotstudie, die im Rahmen des „Airwave Health Monitoring Programme“ des Imperial College, London (Airwave Health Monitoring Programme, 2006) durchgeführt wurde, wurden in einem ersten Schritt Informationen zur beruflichen Nutzung von TETRA-Geräten durch Polizisten unterschiedlichen Dienstgrades in verschiedenen Regionen Großbritanniens (West Mercia, Leicestershire, Lancashire) erhoben und die Machbarkeit einer Langzeitstudie (Beobachtungszeitraum: 15 Jahre) überprüft. In der Pilotphase bearbeiteten 4.096 Polizisten einen Fragebogen zum Gesundheitszustand und zum Gebrauch von TETRA und davon nahmen 2.903 Polizisten an einem Gesundheits-Screening teil. In der bis 2018 dauernden Längsschnittstudie werden sowohl der Fragebogen und das Gesundheits-Screening sowie die Auswertung von Anruf-Protokollen analysiert werden. Es ist geplant, die Studie auf alle Polizeidistrikte in Wales, Schottland und England auszuweiten. Konkrete Ergebnisse wurden in diesem Bericht noch nicht präsentiert.

In dem Bericht zur Pilotstudie wurde auch über die Vorbereitungen für eine Laborstudie informiert. Bei einem Subsample von 150 Polizeibeamten soll ein potenzieller Einfluss von TETRA-Handgeräten auf das EEG (Elektroenzephalogramm), auf EKG (Elektrokardiogramm), auf kognitive Funktionen und auf das Befinden im Vergleich zu Scheinexposition mit einem doppel-blinden randomisierten cross-over Design untersucht (Airwave Health Monitoring Programme, 2006). Dabei wird zwischen Polizeiangehörigen differenziert, für die in der zuvor genannten Feld- bzw. Pilotstudie eine hohe TETRA-Exposition festgestellt wurde und Personen, die einer niedrigen Exposition ausgesetzt waren. Zusätzlich wird zwischen elektrohypersensitiven („symptomatische“) und nicht-elektrohypersensitiven („asymptomatische“) Polizisten unterschieden. Das Studiendesign

sieht den Vergleich dreier Gruppen vor: 1. Gruppe hohe berufliche Exposition bei „asymptomatischen“ Beamten, 2. Gruppe: niedrige berufliche Exposition bei „asymptomatischen“ Beamten, 3. Gruppe: „symptomatische“ Beamten. Ergebnisse aus dieser Studie liegen noch nicht vor.

Im Rahmen des Airwave Health Monitoring Programms wurden auch Informationen zur Art und Häufigkeit der Benutzung von TETRA-Geräten durch Polizeibeamte untersucht (Litchfield and Sorahan, 2004, 2005). Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden in einem Endbericht und einem Kongressbeitrag publiziert. Polizeibeamte aus zwei britischen Bezirken wurden mittels Protokoll zu einer Vielzahl von Parametern zur Nutzung von TETRA Geräten befragt. Insgesamt wurden über 1705 Fragebögen (330 aus städtischem Gebiet in Leicestershire; 1375 aus ländlichem Gebiet in West Mercia) ausgewertet. Es wurden unter anderem der Dienstrang, Tageszeiten, die Anzahl der Gespräche, in welcher Benutzungsbedingung die Gespräche geführt wurden (z.B. im Auto oder auf der Straße) und von wo aus die Gespräche geführt wurden (städtisches oder ländliches Gebiet) erhoben. Alle teilnehmenden Beamten führten während eines 5-tägigen Beobachtungszeitraums ein Protokoll. Als Median der Anzahl der Gespräche wurde ein Wert von 2,2 Gesprächen pro Stunde pro Schicht erhoben. Die Haltung des Gerätes relativ zum Körper und die Gesprächsdauer wurden nicht erhoben. In einer Kurzfassung der Studienergebnisse bezeichnen die Autoren Beamten des Dienstgrades der Police Constables („Wachtmeister“) in der Nachtschicht im ländlichen Gebiet als die potenziell am höchsten exponierte Benutzerkategorie innerhalb aller erhobenen Klassen und damit als die im Rahmen von zukünftigen epidemiologischen Studien zu Auswirkungen der elektromagnetischen Feldern von TETRA besonders zu beachtende Population. Aus den zusätzlich erhobenen automatischen Aufzeichnungen über die Anzahl von Verbindungen (CDR=call data records) wurde analysiert, mit wem bzw. zu welchen Zwecken („Gruppenanruf“; Zweiergespräch oder Notfall) die Geräte verwendet wurden. Die überwiegende Mehrzahl (>90%) diente zur Kommunikation innerhalb der Gruppe, gefolgt von Zweiergesprächen (<9%) und weniger als 1% der Verbindungen diente der Kommunikation im Notfall.

In einer weiteren britischen Studie aus dem Airwave Health Monitoring Programm wurden zu beruflichen Nutzungsdaten von TETRA durch Polizeibeamte, ebenfalls Fragebogen eingesetzt, sowie Anrufprotokolle (CDR= call data records) aufgezeichnet, die Informationen zur Dauer von aktiven und passiven Anrufen erfassten (van Tongeren et al., 2005). Bei acht Beamten wurden mit speziell modifizierten TETRA-Geräten die Dauer, die Sendeleistung und die Position des Geräts (linke Seite, rechte Seite, vor dem Kopf) erhoben. Es konnten 216 Fragebogen von 89 Teilnehmern ausgewertet werden. 67,8% der Polizeibeamten trugen

das TETRA-Gerät am Gürtel, 18,2% abdominal in der Schutzweste, 5,9% am Ärmel und 5,8% in einer nicht weiter differenzierten anderen Position. Die durchschnittliche Anzahl von Verbindungen während einer Schicht betrug 39 mit einer Gesamtdauer von 1107 Sekunden. 25 Anrufe wurden von Handgeräten aus getätigt, 10,5 von Endgeräten, die im Auto angebracht waren und 3,2 von Tischgeräten. Die Mehrzahl der Gespräche wurde über Freisprecheinrichtungen oder Mikrophone geführt. Die Anzahl von Anrufen, bei denen das TETRA-Endgerät wie ein Mobiltelefon, oder vor, oder in der Nähe des Kopfes gehalten wurde, lag bei lediglich 3-4 pro Tag mit einer durchschnittlichen Dauer von 149 Sekunden. Die Seite der Exposition (links oder rechts) wurde mit dem Fragebogen nicht erhoben. Der Rang und die Funktion der Polizisten hatten einen großen Einfluss auf die Art und Häufigkeit der Nutzung, wobei die Autoren darauf hinwiesen, dass in manchen Kategorien nur eine geringe Anzahl von Beamten zur Verfügung stand. Die Anrufprotokolle (CDR= call data records) zeigten eine Zunahme der Verbindungen über Sprechtaete (Taste für die Umschaltung von Empfang auf Senden für wechselseitiges Sprechen der Teilnehmer) während des Tages, mit einem Maximum am Abend und einem Rückgang während der Nacht. Die Anzahl der Verbindungen über Sprechtaete nahm im Laufe der Woche zu und erreichte ein Maximum am Wochenende. Hereinkommende und ausgehende Gespräche (wie Telefonanruf) wiesen wiederum an Werktagen am Morgen ein Maximum auf.

Im Vergleich der Daten aus den Aufzeichnungsprotokollen und den Angaben in den Fragebögen zeigte sich, dass die Anzahl und Dauer der ein- und ausgehenden Anrufe mit TETRA-Endgeräten überschätzt wurde. Die Anzahl von Übertragungen über Sprechtaete wurde deutlich unter-, die Dauer hingegen häufig überschätzt. Die Analyse von Verbindungsdaten aus 45 Arbeitsschichten von acht Beamten, die ein modifiziertes TETRA-Endgerät verwendeten, zeigte eine durchschnittliche Anzahl von 30 Übertragungen pro Schicht und eine durchschnittliche Gesamtdauer von 110 Sekunden pro Schicht. Dieses Ergebnis stimmt, auch wenn es etwas niedriger liegt, in etwa mit den Anrufprotokollen (CDR) überein. Es wurde kein einziger Telefonanruf während der 45 Schichten getätigt, lediglich Verbindungen über Sprechtaete. In nur 3% der Verbindungen wurde das Gerät ohne Freisprecheinrichtung benutzt. Für diese Fälle wurde die Position beim Benutzen des Geräts (links, rechts und vor dem Kopf) über die Neigungswinkel des Geräts erfasst. Die Ergebnisse wurden so interpretiert, dass die Mehrheit der acht Beamten das Gerät überwiegend an der rechten Seite verwendet hatte (konkrete Anzahl fehlt), lediglich ein Beamter trug das Gerät meist vor dem Gesicht. Diese Resultate sind nicht nur aufgrund der kleinen Stichprobe, sondern auch aus weiteren methodischen Gründen sehr bedingt aussagekräftig: In Testdurchgängen zur Überprüfung der Geräteposition, die von einem Beamten jeweils zu Beginn jeder Schicht in gleicher Reihenfolge durchgeführt wurden, wurde das Gerät je drei Sekunden links, rechts und vor dem Kopf gehalten und mit den automatisch registrierten

Neigungswinkeln abgeglichen. Dabei zeigten sich inkonsistente Ergebnisse in Bezug auf die intendierten Positionen und die tatsächlich registrierten. Als mögliche Ursachen wurden von den Autoren angegeben, dass der Beamte entweder die Anweisungen nicht korrekt durchgeführt hatte, die Neigungswinkel sich in ähnlicher Position nennenswert unterscheiden oder die Aufzeichnungen nicht die intendierten waren. Aufgrund dieser unklaren Ergebnisse empfahlen die Autoren, Labortests durchzuführen, bevor die modifizierten Geräte in Feldversuchen weiter eingesetzt werden. Die durchschnittliche Leistung für alle Übertragungen erreichte 825,2 mW, wobei die Leistung in Handposition geringer war als bei Verwendung von Kopfhörern oder Mikrofonen und Tragen des Gerätes am Körper, was noch durch andere Studien bestätigt werden muss. Die Autoren weisen darauf hin, dass das Tragen der Endgeräte an Gürtel oder der Weste in Kombination mit Mikrofonen und Kopfhörern, wie das die überwiegende Mehrzahl der Polizisten praktiziert, dazu führt, dass die Exposition des Kopfes und auch Gehirns wesentlich geringer ist als bei Halten des Geräts nahe bzw. am Kopf. Diese Information zur Position des Geräts müsste unbedingt bei Gebrauch von subjektiven Angaben abgefragt werden, da sonst die tatsächliche Exposition des Kopfes deutlich überschätzt wird.

#### 4.3.3 Studien zu biologischen Effekten von TETRA auf das Herz-Kreislaufsystem

In einer doppel-blinden randomisierten cross-over Studie, die im Rahmen des Britischen Mobilfunkforschungsprogramms durchgeführt wurde, wurden mögliche Auswirkungen einer Exposition mit Signalen von TETRA-Endgeräten auf das Herz-Kreislaufsystem (Blutdruck und Herzratenvariabilität) und auf die Katecholamin-Konzentration (Adrenalin und Noradrenalin als Marker für die Aktivität des sympathischen Nervensystems) untersucht (Barker et al., 2007). 120 gesunde Personen (77 Frauen, 43 Männer; Alter: 18 – 65 Jahre) wurden unter sechs Expositionsbedingungen (gepulste GSM- und TETRA- Signale, kontinuierliche GSM- und TETRA- Signale und zwei Scheinexpositionen: einmal mit TETRA und einmal mit GSM-Endgerät) für je 40 Minuten auf der linken Kopfseite exponiert. Die peak SAR (Spezifische Absorptionsrate) erreichte 70% des von der ICNIRP zulässigen Grenzwerts von 2W/kg für die allgemeine Bevölkerung (gemittelt über 10g bezogen auf Kopf und Rumpf). Weder die Herzratenvariabilität, noch die Adrenalin- und Noradrenalin- Werte und der Blutdruck unterschieden sich während und bis zu 24 Stunden nach Exposition zwischen den TETRA-Expositionsbedingungen und der Scheinexposition. Lediglich unter der GSM-Scheinbedingung kam es zu einer signifikanten Abnahme des Blutdrucks, was auf eine Zunahme der Temperatur des Endgeräts in diesem Modus zurückgeführt wurde.

#### 4.3.4 Studien zu biologischen Effekten von TETRA auf das Zentrale Nervensystem

In den nachfolgenden Kapiteln werden Studien zu möglichen Einflüssen auf evozierte Potentiale und das Elektroenzephalogramm (EEG), sowie auf kognitive Funktionen, die anhand verschiedener Tests untersucht wurden, erläutert.

##### 4.3.4.1. Evozierte Potentiale und EEG

In einer bis dato nur als Endbericht veröffentlichten doppel-blinden randomisierten cross-over Studie unter der Projektleitung von Stuart Butler wurden am Burden Neurological Institute in Bristol vier Experimente zum Einfluss von TETRA auf die Gehirnaktivität bei 18 Personen im Alter zwischen 18 und 39 Jahren durchgeführt (Butler, 2005). In den ersten drei Experimenten wurden die Tests jeweils unter folgenden Expositionsbedingungen absolviert: a) 400 MHz Trägerwelle (0,75 W mittlere Power), b) TETRA moduliertes 400 MHz Signal (0,75 W mittlere Power; 3 W Peak) und c) Scheinexposition. Die Expositionsseite wurde nicht erwähnt.

Im ersten Experiment wurden visuell, akustisch und somato-sensorisch evozierte Potentiale, wie sie auch in der neurophysiologischen Diagnostik des Gehirn- und Nervensystems überprüft werden, unter den drei verschiedenen Expositionsbedingungen abgeleitet. Zusätzlich wurden ereigniskorrelierte Potentiale, die durch die Ausführung akustischer und visueller Aufgaben hervorgerufen werden, unter den drei genannten Bedingungen untersucht. Es wurde die P300, eine positive („P“) Welle, die im EEG zu sehen ist, wenn sich eine Person auf einen selten auftretenden Zielreiz konzentriert, abgeleitet. Die P300 tritt ca. 300ms nach der Darbietung des Zielreizes auf und wird in die zwei Komponenten P3a und P3b unterteilt. Die P3a ist mit einer unwillkürlichen Verschiebung der Aufmerksamkeit auf neue zu ignorierende Reize assoziiert, die P3b gilt als Korrelat der Aufmerksamkeit auf den Zielreiz bzw. der perzeptuellen Unterscheidungsfähigkeit zwischen unterschiedlichen Reizen. In der Studie von Butler et al. (2005) wurden sowohl visuell als auch akustisch evozierte P3a und P3b gemessen. In der visuellen Aufgabe mussten die Probanden auf einen bestimmten optischen Zielreiz reagieren und andere Reize ignorieren. Bei der akustischen Aufgabe war der Zielreiz ein Ton in einer bestimmten Höhe und die zu ignorierenden Reize bildeten Umgebungsgeräusche. Sowohl die Latenzen und Amplituden der P3a und P3b als auch die Verhaltensparameter in Form der Reaktionsgeschwindigkeit auf den Zielreiz wurden erfasst.

In einem zweiten Experiment mussten die Probanden einen verbalen Wahlreaktionstest sowie einen Test zum visuellen Arbeitsgedächtnis bearbeiten. Der verbale Wahlreaktionstest

wurde gewählt, da die Forschergruppe in einer früheren Studie unter GSM 900 MHz-Exposition verkürzte Reaktionszeiten gefunden hatte (Preece et al., 1999). In diesem Test mussten die Probanden auf das Erscheinen der Worte „ja“ bzw. „nein“ auf einem Bildschirm mit entsprechend bezeichneten Tasten reagieren. Es wurden die Reaktionszeiten, sowie die Latenzen und Amplituden der dabei abgeleiteten P3b ermittelt. Im Test zum visuellen Arbeitsgedächtnis mussten sich die Probanden merken, welche fünf Fenster eines Hauses mit neun Fenstern auf einem Bildschirm beleuchtet sind. Bei den nachfolgenden Bildern, auf denen jeweils nur ein Fenster erhellt war, mussten die Probanden entscheiden, ob es sich um ein Fenster handelte, welches in der Ausgangsversion ebenfalls beleuchtet war oder nicht und durch Betätigen der zugeordneten Antworttaste („ja“ oder „nein“) reagieren. In der GSM-Studie konnten bei der Durchführung dieser Aufgabe keine Veränderungen der Reaktionszeiten unter Exposition beobachtet werden. Parallel dazu wurden die P3b und die N2b (bei aktivem Richten der Aufmerksamkeit auf seltene, andersartige Reize) abgeleitet. In beiden Tests des zweiten Experiments wurden die ereigniskorrelierte Potentiale über 16 Elektroden abgeleitet.

Im dritten Experiment wurde ein Spontan-EEG für jeweils 40 Sekunden bei geschlossenen Augen und bei offenen Augen unter jeder Expositionsbedingung aufgezeichnet und es wurde die spektrale Power in den Frequenzbändern berechnet.

Im vierten Experiment wurde das TETRA-Endgerät so umgestaltet, dass der Testleiter kurze 400 MHz Impulse (Dauer 1ms und 14 ms) applizieren konnte. An diesem Versuch nahmen nur 12 Probanden teil. Es wurden etwaige Reaktionen des Gehirns auf 500 TETRA-Impulse (400 MHz) und auf Scheinimpulse untersucht und parallel dazu das EEG abgeleitet. Damit wurde die Hypothese überprüft, wonach Impulse von 14 ms Dauer, die TETRA-modulierten Signalen entsprechen, elektrische Reaktionen im Gehirn auslösen und dadurch über eine Beschleunigung der Entladung von Nervenzellen kürzere Reaktionszeiten zur Folge haben. Diese Hypothese konnte nicht bestätigt werden. Auch in keinem der anderen Experimente zeigte sich ein Effekt von TETRA auf die spontane oder auf die ereigniskorrelierte Gehirnaktivität und auch nicht auf die Reaktionsfähigkeit.

In einer Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin zu möglichen Effekten des TETRA-Funks auf kognitive Funktionen bei Menschen wurden in einem Kongressbeitrag Ergebnisse einer einfach-blinden Pilotstudie zum Einfluss von linksseitiger Exposition mit TETRA (380,25 MHz; 17,65 Hz gepulst; maximale SAR: 1,35 mw/g) auf motorisch evozierte langsame Potentiale, die während einer visuellen Beobachtungsaufgabe bei zehn jungen rechtshändigen Männern abgeleitet wurden, präsentiert (Ullsperger et al., 2003). In früheren Studien dieser Forschergruppe nahmen unter GSM-Exposition die



Amplituden der langsamen Potentiale während derselben Aufgabenstellung im Vergleich zur Scheinexposition ab (Freude et al., 1998, 2000). Bei der visuellen Beobachtungsaufgabe muss ein sich schnell fortbewegender Zeiger, der sich gegen den Uhrzeigersinn drehte, nach dreimaliger Umdrehung in der 12-Uhr-Position mit Druck auf die rechte Maustaste gestoppt werden. Es wurde die Abweichung der Endposition von der 12-Uhr Position ermittelt. Die langsamen Potentiale wurden an 30 Elektrodenpositionen abgeleitet. Es zeigten sich bei diesem Sample keine Unterschiede in den untersuchten EEG- und Leistungsparametern zwischen der TETRA-Expositions- und der Scheinbedingung.

Weitere Ergebnisse dieser Arbeitsgruppe stammen aus einer einfach-blinden randomisierten cross-over Pilotstudie an 10 jungen Probanden (6 Männer, 4 Frauen; Alter: 18 – 28 Jahre; mittleres Alter: 22,3 Jahre), die ebenfalls die visuelle Beobachtungsaufgabe durchführten (Freude et al., 2006). Die Exposition mit TETRA (380,25 MHz; 17,65 Hz gepulst; effektive Sendeleistung: 2 W (puls), effektiv: 500 mW; peak SAR, gemittelt über 1 g bzw. 10 g Gewebe, betrug 1,35 mW/g bzw. 0,83 mW/g.) und die Scheinexposition erfolgten randomisiert. Jede Versuchsperson absolvierte die Aufgabe je vier Mal. Die Dauer pro Versuchsabschnitt betrug acht Minuten. Während der Bearbeitung der Aufgabe wurde das Bereitschaftspotential abgeleitet. In früheren Arbeiten zur Auslösung eines Bereitschaftspotentials verwendeten Freude et al. (1998; 2000) eine einfache Finger-Tapping-Aufgabe, bei welcher die Probanden selbst entscheiden konnten, wann sie eine Taste drücken wollten, was auch der Definition eines Bereitschaftspotentials besser entspricht, wonach das Bereitschaftspotential durch spontane motorische Reaktionen bzw. in der Finger-Tapping-Aufgabe durch eine willkürliche Fingerbewegung, die zu einem vom Proband selbst gewählten Zeitpunkt durchgeführt wird, ausgelöst wird. Die von Freude et al. (2006) beschriebene Auswertung des Bereitschaftspotentials berücksichtigte das Zeitintervall von 2500 ms vor bis 500 ms nach Tastendruck, wobei die Amplitude des Bereitschaftspotentials zwischen 500 ms vor bis zum Betätigen der Taste gemessen und gemittelt wurde. Die Leistungsparameter (Reaktion und Fehlerhäufigkeit) unterschieden sich nicht zwischen der TETRA- und der Scheinexposition. Auch die langsamen Potentialänderungen des Bereitschaftspotentials, sowie die topografische Verteilung über 56 Elektrodenpositionen zeigten keine Veränderungen unter TETRA im Vergleich zur Scheinexposition.

#### 4.3.4.2 Kognitive Funktionen

Am „Defence Science and Technology Laboratory“ (Dstl) wurden in einer vom Britischen Home Office finanzierten Studie mit doppel-blindem randomisierten cross-over Design die Effekte niedriger TETRA-Exposition auf kognitive Funktionen bei 40 Männern im Alter von 21 bis 45 Jahren (Mittelwert: 28 Jahre) untersucht (Smith et al., 2005). Alle Probanden waren rechtshändig und Angestellte des Dstl. Sowohl die TETRA-Exposition als auch die Scheinexposition erfolgte über ein am Kopf fixiertes TETRA-Handgerät jeweils links oder rechtsseitig (d.h. vier Expositionsbedingungen pro Proband). Die TETRA-Signalcharakteristik war analog zu jener, wie sie vom britischen Militär verwendet wird (381 MHz UHF Signal, 17,6 Hz moduliert; SAR: 1,4 W/kg, gemittelt über 10g Gewebe). Die Probanden durchliefen die vier Expositionsbedingungen (TETRA links/rechts; Scheinexposition: links/rechts) in randomisierter Reihenfolge im Abstand von jeweils einer Woche immer zwischen 9:30 bis 11:30 Uhr. Während der Exposition absolvierten sie eine 1,5 Stunden dauernde Testbatterie mit insgesamt 22 Tests zu psychomotorischer Schnelligkeit, Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit. Die Reihenfolge der Tests war über die Testpersonen ausgeglichen. Es wurden v.a. Tests ausgewählt, bei denen in anderen Studien unter Mobilfunk-Exposition Veränderungen in der Leistung beobachtet worden waren. Vor und nach jeder Testung wurden etwaige körperliche Symptome (Koivisto et al., 2001), die aktuelle Befindlichkeit sowie Angstsymptome (State-Trait Anxiety Inventory - STAI, Spielberger, 1983; Positive and Negative Affect Scales - PANAS, Watson et al., 1988) erfasst. Es fanden sich in folgenden drei der 22 Tests signifikante Unterschiede zwischen der Schein- und der TETRA-Exposition: In der semantischen und in der visuellen Wiedererkennungsaufgabe, sowie im verbalen 0-back Task (Arbeitsgedächtnisaufgabe auf einfachster Stufe). Die Aufgabe in der semantischen Wiedererkennungsaufgabe bestand darin, zu entscheiden, ob ein Wort, welches auf dem Monitor präsentiert wurde, in der vorangegangenen semantischen Klassifikationsaufgabe auch vorgekommen war, oder nicht. Unter rechtsseitiger TETRA-Exposition machten die Probanden im Vergleich zu rechts- und zu linksseitiger Scheinexposition mehr Fehler. Bei der visuellen Wiedererkennungsaufgabe erkannten die Probanden unter linksseitiger TETRA-Exposition weniger häufig Farben korrekt wieder, die zuvor in der visuellen Klassifikationsaufgabe präsentiert wurden, als unter rechtsseitiger TETRA-Exposition. Es zeigten sich bei dieser Aufgabe keine Unterschiede zwischen den zwei TETRA- (links/rechts) und den Scheinbedingungen (links/rechts). In der verbalen 0-back Task mussten die Probanden auf der einfachsten Stufe des Tests keine Arbeitsgedächtnisleistung (=0-back) erbringen, sondern lediglich einen präsentierten Reiz (Buchstabe) mit einem Zielreiz (bestimmter Buchstabe) vergleichen und bei Übereinstimmung eine Ja-Taste („Y“) und bei Abweichen eine Nein-Taste („N“) drücken. In

dieser Aufgabe reagierten die Probanden unter linksseitiger TETRA-Exposition im Vergleich zu linksseitiger Scheinexposition signifikant langsamer. Die Reaktionszeiten unterschieden sich nicht im Vergleich links- zu rechtsseitiger TETRA-Exposition oder links- zu rechtsseitiger Scheinexposition und auch nicht zwischen rechtsseitiger TETRA- und rechtsseitiger Scheinexposition. Weder bei der Bearbeitung der schwierigeren Stufen des Tests (1-, 2-, 3-back), noch in einem der vier Untertests des räumlichen n-back task waren die Leistungen zwischen den vier Expositionsbedingungen verschieden. Nach Korrektur für multiples Testen blieb lediglich eines der drei Ergebnisse signifikant: bei rechtsseitiger TETRA-Exposition kam es im Vergleich zu rechtsseitiger Scheinbefeldung zu einer Zunahme der Fehler in der semantischen Wiedererkennungsaufgabe. Da sich die Leistungen in anderen Tests, die ebenfalls die verzögerte Wiedergabe bzw. das Kurzzeitgedächtnis überprüften (Inzidentielles Lernen beim Zahlen-Symbol-Test und Visuelle Zahlenspanne) zwischen Exposition und Scheinexposition nicht unterschieden, schlossen die Autoren daraus, dass das signifikante Ergebnis in der semantischen Wiedererkennungsaufgabe mit Vorsicht betrachtet werden muss. Die Ergebnisse dieser Studie sind noch nicht in peer-reviewed Fachzeitschriften publiziert worden, sind aber in einem ausführlichen Endbericht veröffentlicht worden.

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat ein Forschungsprojekt zu möglichen Effekten des TETRA-Funks auf kognitive Funktionen bei Menschen in verschiedenen Anforderungssituationen durchgeführt, sowie eines zu potenziellen Auswirkungen elektromagnetischer Felder des TETRAPOL-Standards (BAuA, 2007a, 2007b). Von der Studie der BAuA zum Einfluss von TETRA auf kognitive Funktionen beim Menschen sind bisher drei Tagungsberichte und ein Artikel (ohne Peer-Review) veröffentlicht worden. Darin werden Teilergebnisse von unterschiedlichen Probandengruppen beschrieben.

In einem Abstract, welches für die Jahrestagung der Bioelectromagnetics Society in Quebec, Kanada, 2002 eingereicht wurde, wurden Ergebnisse einer doppel-blinden Studie an 30 Männern zum Einfluss von TETRA-Endgeräten auf kognitive Funktionen (Wiener Testsystem, „Number-show-Test“, autokinetischer Lichttest) und das Wohlbefinden angekündigt (Eggert et al., 2002b). Die Charakteristik des TETRA-Signals, sowie der SAR-Wert und auch weitere Details zum Ablauf wurden nicht genannt. Es zeigten sich keine Einflüsse auf das Befinden (ohne Angabe des verwendeten Verfahrens). Die Probanden waren außerdem nicht in der Lage, den Zustand der Exposition (Schein vs. Verum) richtig zu erkennen. In einer ausführlicheren Zusammenfassung zur Posterpräsentation in Quebec, 2002, wurden Ergebnisse der Testung von 24 jungen Männern (Alter: 20-30 Jahre), allerdings aus einem einfach-blinden cross-over Design berichtet (Eggert et al., 2002a). Die

Exposition erfolgte mit TETRA-Handgeräten (TETRA 380,25 MHz; 17,65 Hz; max. SAR: 1,35 mW/g), die an einem Helm links- und rechtsseitig angebracht waren und wechselweise eingesetzt wurden. Es zeigte sich kein Einfluss auf die Ergebnisse im autokinetischen Test zur Untersuchung der „psychologischen Grundaktivität“. Ergebnisse zu den ebenfalls durchgeführten Tests aus dem Wiener Testsystem und zu einem nicht näher beschriebenen „Number Search Test“ wurden nicht berichtet.

Wie bereits in Kap. 4.3.4.1 dargestellt, wurden aus dieser Arbeitsgruppe in einem weiteren Kongressbeitrag die Ergebnisse zum Einfluss von linksseitiger Exposition mit TETRA (380.25 MHz; 17.65 Hz; maximale SAR: 1,35 mw/g) auf motorisch evozierte langsame Potentiale während einer visuellen Beobachtungsaufgabe bei zehn jungen rechtshändigen Männern präsentiert (Ullsperger et al., 2003). Beim dabei erhobenen Leistungsparameter zeigte sich kein Unterschied in der Winkelabweichung der Endposition des Zeigers zwischen der Expositions- und der Scheinbedingung.

In einer weiteren Pilotstudie mit identischer Befeldung und gleicher Aufgabenstellung bei einem anderem Sample, zeigten sich ebenfalls keine Effekte auf die erhobenen Leistungsparameter (Fehlerhäufigkeit und Genauigkeit) (Freude et al., 2006). Auch diese Studie wurde bereits unter Kap. 4.3.4.1 genauer ausgeführt. Ergebnisse zu Befindlichkeit, die in der Projektbeschreibung als Zielparameter angegeben wurden, wurden nicht präsentiert. Endberichte oder peer-reviewed Artikel liegen noch nicht vor. Die bisher berichteten Ergebnisse sind aufgrund der geringen Anzahl der Probanden (N=10) bzw. der Einfach-Verblindung in der Studie mit 24 Probanden mit Vorbehalt zu bewerten bzw. aufgrund fehlender Informationen nicht zuverlässig interpretierbar.

In der doppel-blinden cross-over TETRAPOL-Studie der BAuA wurden 36 Personen mit elektromagnetischen Feldern mit TETRAPOL-Signalen links- oder rechtsseitig über am Helm angebrachte Telefone, wie sie von der Deutschen Bundeswehr genutzt werden, exponiert (unmoduliertes Signal; um 400 MHz; SAR lag unter dem Grenzwert für berufliche Nutzer). Es wurden der Hautwiderstand während verschiedener Tests (Reaktionszeittest, Vigilanztest, Signal-Detection-Test, Autokinetischer Test) und die Testleistungen während einer Gesamtexperimentdauer von 3 Stunden gemessen. Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen TETRAPOL (linksseitig), TETRAPOL (rechtsseitig) und Scheinexposition in den untersuchten Parametern. Weitere Details zu Exposition und Studiendesign liegen noch nicht vor. Die hier präsentierte Studie stammt von einer Projektbeschreibung der Homepage der BAuA und von einem Tagungsbeitrag (BAuA, 2007b; Neuschulz, 2009).

In einer Studie aus dem Dänischen Mobilfunkforschungsprogramm wurden potenzielle Effekte von TETRA-Handgeräten auf kognitive Funktionen und körperliche Symptome von 53 männlichen Erwachsenen (Alter:  $36.41 \pm 8.35$  Jahre) mit einem balanciert randomisierten, doppel-blinden cross-over Design untersucht (Riddervold et al., 2010). Alle Probanden waren im dänischen Notfalldienst (Rettung, Polizei, Feuerwehr) beschäftigt, Rechtshänder und wurden an zwei mindestens 24 Stunden auseinander liegenden Testtagen zur annähernd gleichen Zeit untersucht. Die Testung umfasste vier verschiedene Testverfahren, die jeweils unter 45 Minuten dauernder TETRA-Exposition bzw. Scheinexposition absolviert wurden. Für die TETRA-Exposition wurde ein Szenario nachgebildet, welches bei hoher Exposition in direct mode operation (DMO) zu erwarten ist, aber die Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung nicht überschreitet (ICNIRP, 1998). Beim DMO-Modus können zwei oder mehrere Funkgeräte unabhängig vom Netz miteinander kommunizieren. Das TETRA-Signal (420 MHz; Peak SAR: 1,73W/kg über 1g und 1,26W/kg über 10g) wurde über eine Dipolantenne, die mit Hilfe eines Plastikhelmes an der linken Kopfseite fixiert wurde, in 1-Minuten Sequenzen (54 Sekunden dauernder Übertragungsmodus gefolgt von 6 Sekunden Pause zur Berücksichtigung der speziellen Expositionssituation nach Beendigung eines Funkkontakts) appliziert. Die Exposition wurde jeweils fünf Minuten vor Testbeginn gestartet. Die Probanden bearbeiteten zuerst einen Test zur Messung der einfachen und der Fünffach-Wahl Reaktionszeit, gefolgt von einem Test zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis und zur visuellen Kurzzeitgedächtnisspanne. Beide Tests wurden am Computer durchgeführt und stammen aus der neuropsychologischen Testbatterie CANTAB (Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery). Danach bearbeiteten die Probanden den Trail Making B Test (TMB) in einer Papier-Version, bei der wechselweise Zahlen und Buchstaben in der richtigen Reihenfolge so schnell wie möglich verbunden werden müssen. Zur Auswertung gelangt die Bearbeitungszeit. Der TMB untersucht die psycho-motorische Geschwindigkeit, Aufmerksamkeit und Exekutivfunktionen. Als vierter Test wurde der Untertest Zahlenspanne aus dem Wechsler Intelligenztests vorgegeben. Dabei handelt es sich um einen Test zur Untersuchung der Kurzzeitgedächtnis- und Aufmerksamkeitsspanne und des verbalen Arbeitsgedächtnisses. Der Testleiter liest Zahlenreihen mit zunehmender Länge vor. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, die Zahlenreihe vorwärts nachzusprechen („Zahlenspanne vorwärts“) oder rückwärts zu wieder holen („Zahlenspanne rückwärts“). Es wird die Länge der richtig erinnerten Zahlenfolge (=Zahlenspanne; liegt zwischen 2 und 9) ermittelt. Das Auftreten und die Intensität körperlicher Symptome wurden mittels visueller Analogskalen in einer Computer-Version erfasst. In einer Baseline-Messung vor der Exposition und jeweils nach der Exposition wurden damit 11 Symptome (z.B. Kribbeln, Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit; Klaustrophobie, Schläfrigkeit, Temperaturempfinden) durch die Probanden bewertet. Weder die Testleistung noch die

körperlichen Symptome unterschieden sich signifikant zwischen der TETRA-Exposition und der Scheinbefeldung. Im TMB zeigte sich ein signifikanter Lerneffekt vom ersten zum zweiten Tag in Form einer durchschnittlichen Leistungssteigerung um 15,3%. In beiden Tests zur Kurzzeitgedächtnisspanne (visuell und akustisch) zeigten sich ebenfalls signifikante Übungseffekte am zweiten Tag. Lediglich im Reaktionstest wurden keine lernbedingten Veränderungen registriert. Dies ist die bis dato erste und einzige Studie zu potenziellen Einflüssen von TETRA-Exposition auf kognitive Funktionen, die auch in einer wissenschaftlichen Zeitschrift veröffentlicht wurde.

#### 4.3.5 Studien zu Elektrosensibilität

An der Universität von Essex wurde eine Studie zu Elektrosensibilität und körperliche Beschwerden bei kurzzeitiger Exposition mit Signalen, die charakteristisch für Tetra-Basisstationen sind, durchgeführt (Wallace et al., 2010). Dazu wurden 51 „elektrosensible“ Personen (Fragebogen von Eltiti et al., 2007), sowie 132 alters- und geschlechtsgematchte Kontrollen in einem ersten Schritt in einer offenen Provokationsstudie für die Dauer von 15 Minuten im Abstand von 4,95 m über eine Antenne, die ein TETRA-Basisstationssignal aussendete (420 MHz; 10 mW/m<sup>2</sup>; SAR: 271 µW/kg), exponiert oder scheinbefeldet. Alle fünf Minuten wurden von den Probanden sechs Symptome (Angst, Anspannung, Agitiertheit, Entspannung, Unbehagen, Müdigkeit) auf visuellen Analogskalen bewertet. An subjektiven Parametern wurde das Vorhandensein körperlicher Beschwerden (57 Symptome des Fragebogens von Eltiti et al. 2007) erhoben. Während der gesamten Untersuchungszeit wurden Herzfrequenz, der Blutdruck, sowie die Hautleitfähigkeit erfasst. 48 der 51 elektrosensiblen Personen sowie alle 132 Kontrollen wurden anschließend in einem doppelblinden Design für 4 x 5 Minuten randomisiert zweimal schein und zweimal verum-exponiert. Am Ende jeder der 5 Minuten dauernden Expositionsbedingungen wurden die Probanden gebeten, anzugeben, ob sie glaubten, dass sie exponiert wurden oder nicht. In zwei weiteren Sessions wurden die Probanden während je 50 Minuten in einem cross-over Design randomisiert verum – bzw. scheinexponiert und dabei wurden erneut die Herzfrequenz, der Blutdruck, sowie die Hautleitfähigkeit erfasst. In den doppelblinden Untersuchungsbedingungen zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der TETRA- und der Scheinbedingung in den Zielvariablen. Die Erkennungsrate lag in beiden Gruppen im Zufallsbereich. In der offenen Provokationsstudie berichteten die sensiblen Personen über eine größere Anzahl von Symptomen sowie eine stärkere Ausprägung der Symptome verglichen mit der Scheinbedingung und verglichen mit den Kontrollpersonen. Die Autoren interpretieren das Ergebnis dahingehend, dass die Symptome, die die elektrosensiblen Probanden verspürten, auf den Glauben an eine

beeinträchtigende Wirkung von TETRA-Basisstationen zurückzuführen seien und nicht auf die Kurzzeit-Exposition mit TETRA-Signalen. In dieser Studie wurden auch kognitive Funktionen (Arbeitsgedächtnis mit „Zahlenspanne rückwärts“ und Konzentration mit einem Durchstreichtest) überprüft, aber dazu liegt noch keine Publikation vor.

In einer Studie der Forschergruppe um Simon Wessely am King's College, London, die im Rahmen des Britischen Mobilfunk Forschungsprogramms (MTHR) läuft, sind aktuell nur eine Projektbeschreibung (Wessely, 2005) und eine Power-Point Präsentation verfügbar (Rubin et al., 2008). In dieser Studie soll der Effekt von TETRA-Exposition auf körperliche Symptome bei Polizeibeamten überprüft werden. Dazu werden 60 Polizeibeamte, die körperliche Reaktionen auf TETRA wie z.B. Kopfschmerzen berichten und 60 ohne Beschwerden an jeweils drei Nachmittagen in einem doppel-blinden randomisierten cross-over Design drei verschiedenen Expositionsbedingungen über ein TETRA-Endgerät nahe des Kopfes ausgesetzt: TETRA pulsmoduliert, TETRA ungepulst und ein Scheinsignal. Die Teilnehmer füllen verschiedene kurze Fragebögen zu körperlichen Symptomen und Befinden aus. Zusätzliche Informationen, wie z.B. technische Spezifikationen und Details zu den eingesetzten Fragebögen sind derzeit nicht publiziert. Das Studienende wurde mit Januar 2009 angegeben. Es liegen derzeit noch keine publizierten Ergebnisse vor.

## 5. Zusammenfassung

Lediglich eine der wenigen Studien, in denen bisher ein möglicher Einfluss von TETRA auf die Gehirnaktivität im Ruhezustand bzw. auf einfache oder komplexere Aufgaben untersucht wurde, ist bisher in einer wissenschaftlichen peer-review Zeitschrift publiziert worden. Da ein Teil der Studien noch nicht abgeschlossen wurde, ist eine abschließende Beurteilung nur sehr begrenzt möglich. Demnach zeigte sich nur in einer Studie in einem einzigen Test zum semantischen Kurzzeitgedächtnis ein signifikanter TETRA-Einfluss in Form einer höheren Fehlerrate unter rechtsseitiger Exposition verglichen zur Scheinexposition auf derselben Seite. Aufgrund fehlender Effekte in anderen Tests, die ebenfalls das Kurzzeitgedächtnis überprüften, muss am ehesten von einem Zufallsergebnis ausgegangen werden. Auch die Ergebnisse aus dem einzigen bisher publizierten peer-reviewed Artikel sprechen gegen einen Einfluss von elektromagnetischen Feldern von TETRA auf kognitive Funktionen wie Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnis, sowie Aufmerksamkeit. Die Analyse evozierter Potentiale und des Wach-EEGs zeigte keine Hinweise auf einen Einfluss von TETRA-Funk auf die untersuchten Parameter. Dabei ist bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass in diesem Bereich noch keine Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift erschienen ist, sondern dass bisher lediglich End- und Tagungsberichte vorliegen. TETRA hatte keinen Einfluss auf das Herzkreislaufsystem bei gesunden Erwachsenen. In einer Studie zu potenziellen Auswirkungen von TETRA auf elektrosensible Personen zeigten sich ebenfalls keine Unterschiede auf verschiedene Parameter des Herzkreislaufsystems zwischen TETRA-Exposition und Scheinexposition und verglichen mit nicht-sensiblen Personen, so lange die Exposition doppel-blind erfolgte. Bei bekannter Exposition berichteten Elektrosensible häufiger und eine größere Anzahl von Symptomen. Beide Studien wurden peer-reviewed veröffentlicht. Mit den Ergebnissen einer Langzeitstudie an Polizeibeamten in England ist nicht vor 2018 zu rechnen. Abschließend ist festzustellen, dass In-vitro Studien und Experimente am Tier gegen nicht-thermische Wirkung von TETRA auf den Organismus sprechen.

Aufgrund der derzeit nicht ausreichenden Kenntnisse über den Einfluss von TETRA auf kognitive Funktionen, ist eine Bestätigung oder Widerlegung der negativen Ergebnisse der genannten Studien aufgrund der Alltagsrelevanz von großer Bedeutung und rechtfertigt weitere Studien zu den entsprechenden Fragestellungen. Außerdem scheint eine Überprüfung möglicher Einflüsse von TETRA auf das schlafende Gehirn sehr gut geeignet, um externe Faktoren, wie z.B. Motivation oder Müdigkeit, die die Leistung in verschiedenen Tests zu kognitiven Funktionen beeinflussen können, auszuschließen.



## 6. Literaturverzeichnis

- Airwave Health Monitoring Programme (2006). Airwave Health Monitoring Programme. Pilot Report. January 2006. Department of Epidemiology and Public Health, Faculty of Medicine. Imperial College London. London. URL: <http://www.police-health.org/docs/PilotReportvFinal.pdf> [Stand: 15.02.2010].
- Antonopoulos A, Eisenbrandt H, Obe G (1997). Effects of high-frequency electromagnetic fields on human lymphocytes in vitro. *Mutat Res.* 395:209-214.
- Antonopoulos A, Obe G, Brinkmann K, Eisenbrandt H, Grigat JP, Elsner R, Storbeck W, Dehmel G (1998). Der Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf den Zellzyklus und auf die Frequenz von Schwesterchromatidaustauschen Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur. *Edition Wissenschaft der FGF eV.* 14:3-13.
- Barker AT, Jackson PR, Parry H, Coulton LA, Cook GG, Wood SM (2007). The effect of GSM and TETRA mobile handset signals on blood pressure, catechol levels and heart rate variability. *Bioelectromagnetics.* 28:433-438.
- BAuA (2007a). Einfluss niederfrequent gepulster elektromagnetischer Felder des kommerziellen Mobilfunkstandards TETRA (380 - 400 MHz) auf das Befinden und die Leistung in verschiedenen Anforderungssituationen. Projekt F 5179. In: Projekt- und Veranstaltungsplan für das Jahr 2007, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. S. 68. URL: <http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/697392/publicationFile/46667/111.pdf> [Stand: 10.3.2010].
- BAuA (2007b). Einfluss elektromagnetischer Felder des BOS/Bw.Mobilfunksystems TETRAPOL auf das Befinden und die Aufmerksamkeitsleistung von Menschen in verschiedenen Anforderungssituationen. Projekt F 2079. In: Projekt- und Veranstaltungsplan für das Jahr 2007, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. S. 68. URL: <http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/697392/publicationFile/46667/111.pdf> [Stand: 10.3.2010].
- Bawin SM, Kaczmarek LK, Adey WR (1975). Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann N Y Acad Sci.* 247:74-81.
- Bawin SM, Adey WR, Sabbot IM (1978). Ionic factors in release of  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  from chicken cerebral tissue by electromagnetic fields. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 75:6314-6318.
- BDBOS (2008). Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. Auswirkungen des Digitalfunks BOS werden erforscht. Pressemitteilung gemeinsam mit BfS vom 26.11.2008. Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. 26. November

2008. URL:  
[http://www.bdbos.bund.de/nn\\_421176/SharedDocs/Pressemitteilungen/2008/081126\\_bdbos\\_bfs\\_vereinbarung.html](http://www.bdbos.bund.de/nn_421176/SharedDocs/Pressemitteilungen/2008/081126_bdbos_bfs_vereinbarung.html) [Stand: 10.02.2010].
- BDBOS (2010). Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. Homepage. URL: <http://www.bdbos.bund.de> [Stand: 09.03.2010].
- Blackman CF, Elder JA, Weil CM, Benane SG, Eichinger DC, House DE (1979). Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radio frequency radiation: Effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.* 14:93 - 98.
- Blackman CF, Benane SG, Joines WT, Hollis MA, House DE (1980). Calcium-ion efflux from brain tissue: power-density versus internal field-intensity dependencies at 50-MHz RF radiation. *Bioelectromagnetics* 1980; 1 (3): 277 - 283. 1:277-283.
- Blask DE, Pelletier DB, Hill SM, Lemus-Wilson A, Grosso DS, Wilson ST, Wise ME (1991). Pineal melatonin inhibition of tumor promotion in the N-nitroso-N-methylurea model of mammary carcinogenesis: potential involvement of antiestrogenic mechanisms in vivo. *J Cancer Res Clin Oncol.* 117:526-532.
- Bundeswehr (2010). Quantensprung in Sachen Kommunikation. 04.12.2006. URL: [http://www.bundeswehr.de/portal/a/bwde/streitkraefte?yw\\_contentURL=/C1256EF4002AED30/W26W6BZP943INFODE/content.jsp](http://www.bundeswehr.de/portal/a/bwde/streitkraefte?yw_contentURL=/C1256EF4002AED30/W26W6BZP943INFODE/content.jsp) [Stand: 09.03.2010].
- Butler S (2005). Detection of Effects of Microwave Radiation on the Electrical Activity of the Brain. Project RUM 21. July 2005. Bristol, UK.  
[http://www.mthr.org.uk/research\\_projects/home\\_office\\_funded\\_projects/documents/RUM21FinalReport.pdf](http://www.mthr.org.uk/research_projects/home_office_funded_projects/documents/RUM21FinalReport.pdf) [Stand: 15.02.2010].
- Chadwick P (2003). Assessment of Specific Absorption Rates from Second Generation Airwave Equipment: TETRA radios and accessories. January 2003. Microwave Consultants Limited (MCL). London. URL: [http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/TETRA\\_measurements2835.pdf?view=Binary](http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/TETRA_measurements2835.pdf?view=Binary) [Stand: 15.02.2010].
- Chadwick P (2006). Police Information Technology Tender CS 799: Specific Absorption Rate Measurements in Vehicles. Final Report. December 2006. Microwave Consultants Limited (MCL). Newbury, Berkshire, UK. URL: <http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/mcl-report2835.pdf?view=Binary> [Stand: 15.02.2010].
- de Seze R, Ayoub J, Peray P, Miro L, Touitou Y (1999). Evaluation in humans of the effects of radiocellular telephones on the circadian patterns of melatonin secretion, a chronobiological rhythm marker. *J Pineal Res.* 27:237-242.

- Dimbylow P, Khalid M, Mann S (2003a). Assessment of Specific Energy Absorption Rate (SAR) in the Head from TETRA Handsets. Final Report. May 2003. HPA Centre for Radiation Chemical and Environmental Hazards. CHILTON, DIDCOT, OX11 0RQ. URL: [http://www.mthr.org.uk/research\\_projects/documents/FinalReportDimbylowComplete.pdf](http://www.mthr.org.uk/research_projects/documents/FinalReportDimbylowComplete.pdf) [Stand: 15.02.2010].
- Dimbylow P, Khalid M, Mann S (2003b). Assessment of specific energy absorption rate (SAR) in the head from a TETRA handset. *Phys Med Biol.* 48:3911-3926.
- Eggert S, Hentschel K, Ruppe I, Neuschulz H, Kaul G, Goltz S, Kersten N (2002a). Influence of electromagnetic fields emitted by handheld mobile radio of the tetra system on cognitive performance of humans. Poster. Bioelectromagnetics Society 24th Annual Meeting. Quebec, Canada.
- Eggert S, Hentschel K, Ruppe I, Neuschulz H, Kaul G, Goltz S, Kersten N (2002b). Influence of electromagnetic fields emitted by handheld mobile radio of the tetra system on cognitive performance and well-being of humans. Abstract P-140. Bioelectromagnetics Society 24th Annual Meeting. Quebec, Canada. 262-263.
- Eltiti S, Wallace D, Zougkou K, Russo R, Joseph S, Rasor P, Fox E (2007). Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire. *Bioelectromagnetics.* 28:137-151.
- FGF (2010). Forschungsprojekte: Studien an Zellen. URL: [http://fgf.de/forschungsprojekte/studien\\_an\\_zellen.html](http://fgf.de/forschungsprojekte/studien_an_zellen.html) [Stand: 15.10.2010].
- Fitzner R, Langer R, Zemann E, Neibig U, Brinkmann K (1995). Wachstumsverhalten von humanen Leukämiezellen. Newsletter Edition Wissenschaft der FGF eV. 1:5-11.
- Fitzner R, Langer E, Reitmeier C, Zemann E, von Bülow J, Elsner R, Storbeck W, Eisenbrandt H, Griegat J-P, Brinkmann K (1997). Wachstumsverhalten von HL-60-Zellen unter Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern zur Prüfung auf krebspromovierende Effekte. Endbericht. URL: [http://fgf.de/forschungsprojekte/berichte/zellstudien/ID\\_104\\_Fitzner\\_II\\_Biol\\_1997\\_de.pdf](http://fgf.de/forschungsprojekte/berichte/zellstudien/ID_104_Fitzner_II_Biol_1997_de.pdf) [Stand: 18.02.2010].
- Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I (1998). Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials. *Bioelectromagnetics.* 19:384-387.
- Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I (2000). Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. *Eur J Appl Physiol.* 81:18-27.
- Freude G, Ullsperger P, Erdmann U, Eggert S (2006). TETRA 25. Beeinflusst ein elektromagnetisches Feld die bioelektrische Hirnaktivität des Menschen? Newsletter Vierteljährliche Information der Forschungsgemeinschaft Funk eV. 1:57-61.

- Gabriel C, Gabriel S, Corthout E (1996). The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Phys Med Biol.* 41:2231-2249.
- Gollnick F (1997). Verbundvorhaben „Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder“. Teilbericht über die untersuchten BOS-Funkfrequenzen. Edition Wissenschaft. 13:3-15.
- Green AC, Scott IR, Gwyther RJ, Peyman A, Chadwick P, Chen X, Alfadhl Y, Tattersall JE (2005). An investigation of the effects of TETRA RF fields on intracellular calcium in neurones and cardiac myocytes. *Int J Radiat Biol.* 81:869-885.
- Hansen V, Streckert J (1998). Feldtheoretische Simulation der Hohlleitungs- Experimente zum Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf humane periphere Lymphozyten. *Newsletter Edition Wissenschaft der FGF eV.* 14:14-23.
- ICNIRP (1998). ICNIRP Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Physics.* 74:494-522.
- ICNIRP (2009). ICNIRP statement on the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)". *Health Phys.* 97:257-258.
- IEGMP (2000). Mobile Phones and Health. Independent Expert Group on Mobile Phones (IEGMP). National Radio Protection Board. Chilton, Didcot. URL: [www.iegmp.org.uk](http://www.iegmp.org.uk) [Stand: 15.02.2010].
- Koivisto M, Haarala C, Krause CM, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H (2001). GSM phone signal does not produce subjective symptoms. *Bioelectromagnetics.* 22:212-215.
- Lerchl A, Kruger H, Niehaus M, Streckert JR, Bitz AK, Hansen V (2008). Effects of mobile phone electromagnetic fields at nonthermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*). *J Pineal Res.* 44:267-272.
- Linde C (2008). Aufbau und Technik des digitalen BOS-Funks. 85586 Poing: Franzis Verlag GmbH.
- Linz KW, von Westphalen C, Streckert J, Hansen V, Meyer R (1999). Membrane potential and currents of isolated heart muscle cells exposed to pulsed radio frequency fields. *Bioelectromagnetics.* 20:497-511.
- Litchfield I, Sorahan T (2004). Airwave Patterns of Use Study. CS782 Final Report. October 2004. Institute of Occupational and Environmental Medicine, University of Birmingham. Birmingham, United Kingdom. URL: <http://www.haps.bham.ac.uk/ioem/research/documents/APUR5FinalReport.pdf> [Stand: 15.02.2010].

- Litchfield I, Sorahan T (2005). Patterns of Use of the TETRA Communication System Amongst Two Police Forces in the UK. BioEM 2005 - Joint BEMS/EBEA Meeting. Dublin, Ireland.
- Mobile Telecommunications and Health Research Programme (2007). Report 2007. URL: [http://www.mthr.org.uk/documents/MTHR\\_report\\_2007.pdf](http://www.mthr.org.uk/documents/MTHR_report_2007.pdf) [Stand: 15.02.2010].
- Neubauer G, Freudenthaler G (2008). Individual RF exposure due to TETRA Base stations. Poster presentation P-18. Abstract Collection. Bioelectromagnetics Society 30th Annual Meeting. San Diego, California. 235-236.
- Neuschulz H (2009). Information on the recently finished project on fields of TETRAPOL handheld radios. 23. FGF Workshop (in Kooperation mit dem Umweltministerium Baden/Württemberg) zur aktuellen Forschung zum Einfluss von hochfrequenten Feldern auf Gehirnprozesse sowie der Rückblick auf 17 Jahre FGF-Forschung und die wissenschaftliche Entwicklung der EMVU-Forschung auf internationaler Ebene. Stuttgart.
- NRPB (1999). 1998 ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz): NRPB advice on aspects of implementation in the UK. Doc NRPB. 10:5-59.
- NRPB (2001). Possible Health Effects from Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation (AGNIR). 1-80. National Radiological Protection Board. Chilton, Didcot, Oxon OX11 0RQ. URL: [http://www.hpa.org.uk/web/HPAwebFile/HPAweb\\_C/1194947336937](http://www.hpa.org.uk/web/HPAwebFile/HPAweb_C/1194947336937).
- Preece AW, Iwi G, Davies-Smith A, Wesnes K, Butler S, Lim E, Varey A (1999). Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. *Int J Radiat Biol.* 75:447-456.
- Riddervold IS, Kjaergaard SK, Pedersen GF, Andersen NT, Franek O, Pedersen AD, Sigsgaard T, Zachariae R, Molhave L, Andersen JB (2010). No effect of TETRA hand portable transmission signals on human cognitive function and symptoms. *Bioelectromagnetics*. [Epub ahead of print] DOI 10.1002/bem.20571.
- Rubin J, Hahn G, Nieto R, Everitt B, Cleare A, Wessely S (2008). Mobile Phones & Airwave. Unexplained symptoms in the 21st Century. URL: [http://www.tetrahealth.info/Documents/james\\_rubin\\_presentation\\_slides.pdf](http://www.tetrahealth.info/Documents/james_rubin_presentation_slides.pdf) [Stand: 15.02.2010].
- Schmid G, Uberbacher R, Preiner P, Samaras T, Jappel A, Mazal PR, Jappel A, Baumgartner WD, Tschabitscher M (2006). Bestimmung der Expositionsverteilung von HF-Feldern im menschlichen Körper, unter Berücksichtigung kleiner Strukturen und thermophysologisch relevanter Parameter. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des BfS. URL: <http://www.emf->

[forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie\\_abges/dosi\\_040\\_AB.pdf](http://forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_040_AB.pdf)

[Stand: 15.02.2010].

- Schmid G, Uberbacher R, Samaras T (2007a). Radio frequency-induced temperature elevations in the human head considering small anatomical structures. *Radiat Prot Dosimetry*. 124:15-20.
- Schmid G, Uberbacher R, Samaras T, Jappel A, Baumgartner WD, Tschabitscher M, Mazal PR (2007b). High-resolution numerical model of the middle and inner ear for a detailed analysis of radio frequency absorption. *Phys Med Biol*. 52:1771-1781.
- Schmid G, Uberbacher R, Samaras T, Tschabitscher M, Mazal PR (2007c). The dielectric properties of human pineal gland tissue and RF absorption due to wireless communication devices in the frequency range 400-1850 MHz. *Phys Med Biol*. 52:5457-5468.
- Sienkiewicz Z (2006). The Effects of Radiofrequency Radiation on Brain Physiology and Function. Final Report. Letztes Update: 18.01.2010. URL: [http://www.mthr.org.uk/research\\_projects/mthr\\_funded\\_projects/documents/RUM1FinalReport.pdf](http://www.mthr.org.uk/research_projects/mthr_funded_projects/documents/RUM1FinalReport.pdf) [Stand: 15.02.2010].
- Smith RN, Tattersall JEH, Bowditch SC, Holden SJ, Green AC, Scott IR, Harrison PK, Low DA, Smith SJR, Grose RI, Mifsud NCD (2005). An Investigation of the Effects of the Airwave TETRA Signal on Cellular Calcium and Brain Function. Dstl/CR15728 Issue 1.0. September 2005. Biomedical Sciences, Dstl Porton Down. Salisbury. [http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/tetra-dstl-final-report/tetra\\_final\\_report2835.pdf?view=Binary](http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/tetra-dstl-final-report/tetra_final_report2835.pdf?view=Binary) [Stand: 15.02.2010].
- Sommer AM, Streckert J, Bitz AK, Hansen VW, Lerchl A (2004). No effects of GSM-modulated 900 MHz electromagnetic fields on survival rate and spontaneous development of lymphoma in female AKR/J mice. *BMC Cancer*. 4:77.
- Sommer AM, Bitz AK, Streckert J, Hansen VW, Lerchl A (2007). Lymphoma development in mice chronically exposed to UMTS-modulated radiofrequency electromagnetic fields. *Radiat Res*. 168:72-80.
- Spielberger CD (1983). Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Self Evaluation Questionnaire). Palo Alto: Consulting Psychologists Press, Inc.
- Stevens RG, Davis S (1996). The melatonin hypothesis: electric power and breast cancer. *Environ Health Perspect*. 104 Suppl 1:135-140.
- Sukhotina I, Streckert JR, Bitz AK, Hansen VW, Lerchl A (2006). 1800 MHz electromagnetic field effects on melatonin release from isolated pineal glands. *J Pineal Res*. 40:86-91.
- Tamarkin L, Cohen M, Roselle D, Reichert C, Lippman M, Chabner B (1981). Melatonin inhibition and pinealectomy enhancement of 7,12-dimethylbenz(a)anthracene-induced mammary tumors in the rat. *Cancer Res*. 41:4432-4436.

- Tarantino P, Lanubile R, Lacalandra G, Abbro L, Dini L (2005). Post-continuous whole body exposure of rabbits to 650 MHz electromagnetic fields: effects on liver, spleen, and brain. *Radiat Environ Biophys.* 44:51-59.
- Ullsperger P, Freude G, Erdmann U, Eggert S (2003). Influence of electromagnetic fields of the tetra communication system on bioelectric brain activity of healthy participants. *Bioelectromagnetics Society 25th Annual Meeting.* Hawaii, USA. 277.
- Valic B, Trcek T, Gajsek P (2009). Personal exposure to high frequency electromagnetic fields in Slovenia. *BioEM 2009.* Davos, Switzerland. Abstract Collection P-47.
- van Tongeren M, While D, Mann S (2005). Investigation of Airwave Patterns of Use amongst Police Officers of Lancashire Constabulary. Final Report. May 2005. Centre for Occupational and Environmental Health, Division of Epidemiology and Health Sciences, University of Manchester and Health Protection Agency, Radiation Protection Division. Manchester, Chilton Didcot, UK. URL: [http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/Manchester\\_final\\_report2835.pdf?view=Binary](http://police.homeoffice.gov.uk/publications/operational-policing/Manchester_final_report2835.pdf?view=Binary) [Stand: 15.02.2010].
- Vollrath L, Spessert R, Kratzsch T, Keiner M, Hollmann H (1997). No short-term effects of high-frequency electromagnetic fields on the mammalian pineal gland. *Bioelectromagnetics.* 18:376-387.
- Wainwright PR (2007). Computational modelling of temperature rises in the eye in the near field of radiofrequency sources at 380, 900 and 1800 MHz. *Phys Med Biol.* 52:3335-3350.
- Wallace D, Eltiti S, Ridgewell A, Garner K, Russo R, Sepulveda F, Walker S, Quinlan T, Dudley S, Maung S, Deeble R, Fox E (2010). 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.* [Epub ahead of print].
- Watson D, Clark LA, Tellegen A (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of Personality and Social Sciences.* 54:1063-1070.
- Wessely S (2005). The effect of TETRA radiofrequency fields on symptoms in police officers. Start Date: July 2005. Mobile Phone Research Unit, King's College London. London. URL: [http://www.mthr.org.uk/research\\_projects/Wessely.htm](http://www.mthr.org.uk/research_projects/Wessely.htm) [Stand: 15.02.2010].

## 7. Abkürzungen

AGNIR	Advisory Group on Non-ionising Radiation
BAnz	Bundesanzeiger
BAuA	Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BDBOS	Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BEMFV	Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGBl	Bundesgesetzblatt
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift
BImSchV	Bundesimmissionsschutzgesetz
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
Ca	Calcium/ Kalzium
dBm	Dezibel Milliwatt
DMO	Direct Mode Operation
Dstl	Defence Science and Technology Laboratory
EEG	Elektroenzephalogramm
EMF	elektromagnetische Felder
EMVG	elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln
EPSP	Exzitatorische Postsynaptische Potentiale
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
EU	Europäische Union
FDD	Frequenzduplex
FDTD	Finite Difference Time Domain
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	Hochfrequenz
ICNIRP	International Commission on Non-Ionising Radiation Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
IEGMP	Independent Expert Group on Mobile Phones
K	Kalium
maxSAR10g	Maximalwert der über 10g zusammenhängendes Körpergewebe gemittelten Spezifischen Absorbptionsrate
MHz	Megahertz
MRI	Magnet Resonance Imaging



mRNA	messenger Ribonucleic Acid
MTHR	Mobile Telecommunications and Health Research
mW	Milliwatt
NMC	Netzverwaltungszentrum
NRPB	National Radiological Protection Boards
PANAS	Positive and Negative Affect Scale
PCR	Polymerase chain reaction
RIA	Radioimmunassays
RF	radiofrequent
RF-EMF	radiofrequente elektromagnetische Felder
RNA	Ribonucleic acid
RT-PCR	Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction
SAR	Spezifische Absorptionsrate
TDMA	Time Division Multiple Access
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TETRAPOL	TETRA-Funkstandard für professionelle Anwender
TETRAPOL Bw	TETRAPOL Bundeswehr
TMB	Trail Making B Test
UK MTHR	Britisches Mobilfunkforschungsprogramm
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHF	Very High Frequency; entspricht der Ultrakurzwellen
V/m	Volt pro Meter
W	Watt
W/kg	Watt pro Kilogramm