

TETRA 25

Beeinflusst ein elektromagnetisches Feld die bioelektrische Hirnaktivität des Menschen?

Dr. Gabriele Freude,
Dr. Peter Ullsperger,
Dr. Udo Erdmann,
Dr. Siegfried Eggert
von der Bundesanstalt
für Arbeitsschutz und
Arbeitsmedizin, Berlin

Der terrestrische digitale Bündelfunk (**T**errestrial **t**runked **r**adio, TETRA) ist ein modernes Betriebsfunksystem für geschlossene Benutzergruppen, bei dem Übertragungskanäle dynamisch nach Bedarf zugeordnet werden. Der Mehrfachzugriff erfolgt sequentiell (Time Division Multiple Access, TDMA), wobei sich bis zu vier Nutzer einen Frequenzkanal teilen. Aus dieser Betriebsweise resultiert eine Pulsmodulation des Radiosignals mit 17,65 Hz Pulsfolgefrequenz. Da dies ein physiologisch relevanter Frequenzbereich ist, wurden Befürchtungen über eine mögliche biologische Wirkung laut. Obwohl bis heute keine signifikanten biologischen Effekte bei den zur Anwendung kommenden Sendeleistungen evident sind, sollte eine Untersuchung der bioelektrischen Hirnaktivität und Reaktionsparameter des Menschen Aufschluss über eine unmittelbare biologische Wirkung erbringen. Die vorliegende Pilotstudie untersuchte die Wirkung des TETRA-Radiosignals auf die Reaktionsfähigkeit und einen ausgewählten Parameter der bioelektrischen Hirnaktivität, das sogenannte Bereitschaftspotenzial. Auf letzteres, das im Rahmen einer visuellen Beobachtungsaufgabe registriert wurde, konnte in früheren Untersuchungen ein schwacher, aber signifikanter Einfluss des GSM (Global System for Mobile Communication) -Radiosignals (Pulsfolgefrequenz 217 Hz) auf das Bereitschaftspotenzial nachgewiesen werden. 10 gesunde Probanden führten die visuelle Beobachtungsaufgabe in 4 Versuchsabschnitten von jeweils 8 Minuten Dauer aus, wobei sich Exposition und Scheinexposition in für die Probanden unbekannter, ausgewogener Abfolge abwechselten.

Die Reaktionsparameter (Genauigkeit und Fehlerhäufigkeit), die unter Exposition und Scheinexposition registriert wurden, wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen auf. Auch die Kurvenverläufe der Bereitschaftspotenziale waren beim Vergleich beider Expositionsbedingungen praktisch deckungsgleich. Die Ergebnisse der Pilotstudie geben keinen Hinweis, dass das TETRA-Radiosignal mit einer Intensität innerhalb des Expositionslimits Parameter der Reaktion und des Bereitschaftspotenzials beeinflusst, womit auch eine Wirkung auf Aufmerksamkeitsprozesse, die sich in den untersuchten Parametern manifestieren, ausgeschlossen werden kann.

Der terrestrische digitale Bündelfunk ist ein modernes Betriebsfunksystem mit dynamischer Zuordnung der Übertragungskanäle für geschlossene Benutzergruppen, wie z. B. Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. Dabei bestehen unter

Zusammenfassung

Einleitung und Problemstellung

der Bezeichnung TETRA zwei Systeme nebeneinander – TETRA 25 und TETRAPOL, die sich technisch und dabei in Hinblick auf die hier behandelte Fragestellung erheblich unterscheiden. Das System TETRA 25 arbeitet mit einem sequentiellen Mehrfachzugriff (Time Division Multiple Access, TDMA), bei dem sich bis zu vier Nutzer einen Frequenzkanal teilen (zur Erinnerung: beim GSM-Mobilfunk sind es acht Nutzer). Jedem dieser vier Nutzer ist ein Zeitschlitz zugeordnet und die vier Zeitslitze bilden einen Rahmen (engl. „frame“) mit einer Dauer von 56,67 ms, der 17,65 mal pro Sekunde wiederholt wird. Aus dieser Betriebsweise resultiert eine Pulsmodulation des Radiosignals mit $f=17,65$ Hz Pulsfolgefrequenz bei einer Pulsdauer von 14,17 ms.

TETRAPOL arbeitet dagegen mit einem frequenzselektiven Mehrfachzugriff (Frequency Division Multiple Access, FDMA), bei dem das Radiosignal während der Sendephase ständig ausgesendet wird. Dieses System ist u.a. bereits in der Schweiz und in Frankreich im Einsatz.

Beide Systeme sind mehr oder weniger weltweit akzeptiert, so unter anderem in Europa, Australien, Südamerika, China und Russland; Interesse besteht auch in Nordamerika.

Bei der in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchung erfolgte die Exposition der Probanden ausschließlich mit Hochfrequenzstrahlung, die dem Sendesignal der TETRA 25 – Funkgeräte entspricht, da einer möglichen Wirkung der 17,65 Hz – Pulsmodulation das Interesse der Untersuchung galt.

Aufgrund der Pulsmodulation in einem Frequenzbereich physiologischer Funktionsabläufe erhob sich die Frage nach möglichen biologischen Wirkungen des TETRA-Funksignals. Auch wenn bisher keine Evidenz für signifikante biologische Effekte besteht (vgl. [1], [2]), sollte geprüft werden, ob eine Wirkung auf die bioelektrische Hirnaktivität und Reaktionsparameter gesunder Probanden nachweisbar ist. Es handelt sich dabei um eine explorative Untersuchung, da konkrete Hypothesen über denkbare Wirkmechanismen [3] fehlen. Als Indikator der bioelektrischen Hirnaktivität wurde das Bereitschaftspotenzial (BP) ausgewählt, da in früheren Untersuchungen ein signifikanter Einfluss des GSM-Radiosignals auf das BP nachgewiesen werden konnte [4], [5].

Zehn gesunde rechtshändige Probanden (6 Männer und 4 Frauen im Alter zwischen 18 und 28 Jahren, mittleres Alter 22,3 Jahre) nahmen nach Aufklärung und schriftlichem Einverständnis an dem Experiment teil.

Das 380,25 MHz Radiosignal nach TETRA 25 - Standard (Rahmen-Wiederholfrequenz 17,65 Hz, Rahmendauer 56,67 ms, Pulsdauer 14,17 ms) wurde von einer I/2 Antenne emittiert, die an der linken Kopfseite der Probanden positioniert wurde. Es wurde darauf geachtet, dass der Kontakt zwischen Antenne und Kopf über die gesamte Dauer des Versuchs konstant blieb. Die Sendeleistung betrug 2 W (Puls), effektiv 500 mW. Um sicherzustellen, dass die Probanden keine Kenntnis über die aktuelle Exposition hatten, wurde die Antenne über einen im Nebenraum befindlichen Ultra-Hochfrequenzgenerator und nachgeschalteten Leistungsverstärker gespeist.

Die Werte der spezifischen Absorptionsrate (SAR), die für die eingesetzte I/2 Antenne zutreffen, wurden mit Hilfe eines anatomisch realistischen Ganzkopfphantoms („Generic twin phantom“) gemessen. Der räumliche SAR- Spitzenwert, gemittelt über 1 g bzw. 10 g Gewebe, betrug 1,35 mW/g bzw. 0,83 mW/g. Durch den abschirmenden Effekt der für die Ableitung der bioelektrischen Hirnaktivität eingesetzten Nylonkappe mit integrierten Elektroden resultierte ein SAR-Wert (gemittelt über 10 g) von 0,544 mW/g. Abbildung 1 zeigt die Verminderung der SAR mit zunehmender Distanz von der Antenne und die gemessene Verteilung der SAR.

Die Probanden führten während des Experiments nach einem Übungsabschnitt eine visuelle Beobachtungsaufgabe aus [6]. Sie beobachteten auf dem Monitor den Zeiger einer symbolisierten Uhr, der sich entgegen dem Uhrzeigersinn bewegte und für eine Umdrehung 720 ms benötigte. Der Zeiger sollte jeweils nach drei Umdrehungen möglichst exakt an der 12 Uhr Position durch einen Tastendruck mit dem rechten Zeigefinger gestoppt werden. Das Intervall zwischen dem Zeigerstopp und dem Start der nächsten Zeiger-Umdrehungen variierte zwischen 2 und 4 Sekunden. Die Aufgabe wurde in vier Versuchsabschnitten von 8 Minuten Dauer mit 140 Trials durchgeführt und erforderte hohe Konzentration und Aufmerksamkeit. In ausgewogener Abfolge wechselten Exposition und Scheinexposition, blind für die Probanden. Als Leistungsparameter wurde die Reaktionsgenauigkeit verwendet: die Winkelabweichung zwischen der 12 Uhr Position und dem jeweiligen Zeigerstopp wurde für jedes Trial gemessen. Alle Treffer innerhalb des $\pm 90^\circ$ Segments relativ zur 12 Uhr-Position wurden als Absolutwert in die Auswertung einbezogen.

Die bioelektrische Hirnaktivität wurde mit Hilfe einer 60-Elektroden-Nylonkappe (ElectroCap, ECI) abgeleitet. Es wurde dafür Sorge getragen, dass der Elektrodenübergangswiderstand unter 10 k Ω lag. Zusätzliche Elektroden zur Registrierung des Elektrookulogramms dienten der Erkennung von Augenbewegungs- und Lidschlagartefakten. Alle Ableitungen erfolgten mit einer Referenz zur Vertexelektrode, zur Signalverstärkung dienten BrainAmp-Verstärker (BrainProducts), deren elektromagnetische Verträglichkeit (Immunität) gegenüber dem TETRA-Radiosignal vor der Untersuchung erfolgreich getestet wurde. Die im Frequenzbereich von 0 bis 30 Hz verstärkten bioelektrischen Signale wurden kontinuierlich zusammen mit den Reaktionstriggern gespeichert. Die anschließende Signalverarbeitung umfasste das Ausblenden von Artefakten, eine 10 Hz-Tiefpassfilterung, digitale Re-Referenzierung, Tastendruck-bezogene Mittelung und Baseline-Korrektur (200 ms Baseline im Zeitfenster -2500 bis -2300 ms vor dem Tastendruck). Einzeltrial-Signalamplituden über $\pm 75 \mu\text{V}$ der bioelektrischen Hirnaktivität und von $\pm 100 \mu\text{V}$ des Elektrookulogramms wurden als Artefakte von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Die bioelektrische Hirnaktivität wurde im Zeitintervall von 2500 ms vor bis 500 ms nach Tastendruck getrennt für die beiden Expositionsbedingungen gemittelt und die Amplitude des Bereitschaftspotenzials wurde als Mittelwert über den Zeitbereich von 500 ms vor dem Tastendruck bis zu dessen Auslösung gemessen.

Die unter beiden Expositionsbedingungen gemessenen Reaktionsparameter zeigten keine Unterschiede zwischen Exposition und Scheinexposition, für die individuellen mittleren Winkelabweichungen zwischen der 12 Uhr Position und dem Tastendruck wiesen auch die Fehlerhäufigkeiten keine signifikanten Unterschiede auf. Die statistische Analyse der Bereitschaftspotenzial-Amplituden mit Hilfe der Varianzanalyse für wiederholte Messungen mit den Einflussfaktoren Exposition, Wiederholung und Elektroden ergab ebenfalls keine signifikanten Effekte für die Faktoren Exposition ($p > 0,05$) und Wiederholung ($p > 0,05$). Wie der Abbildung 2 zu entnehmen ist, sind die das Bereitschaftspotenzial repräsentierenden langsamen Potenzialänderungen in der Mehrzahl der Ableitungen praktisch kongruent. Auch die topographischen Amplitudenverteilungen über der Kopfhaut lassen keine Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen erkennen.

Die Ergebnisse der Untersuchung geben keinen Hinweis, dass unter den gegebenen experimentellen Bedingungen die Exposition mit einem gepulsten TETRA-Signal das aus der bioelektrischen Hirnaktivität ermittelte Bereitschaftspotenzial und die damit verbundenen Aufmerksamkeitsprozesse beeinflusst.

Untersuchungs- ergebnisse

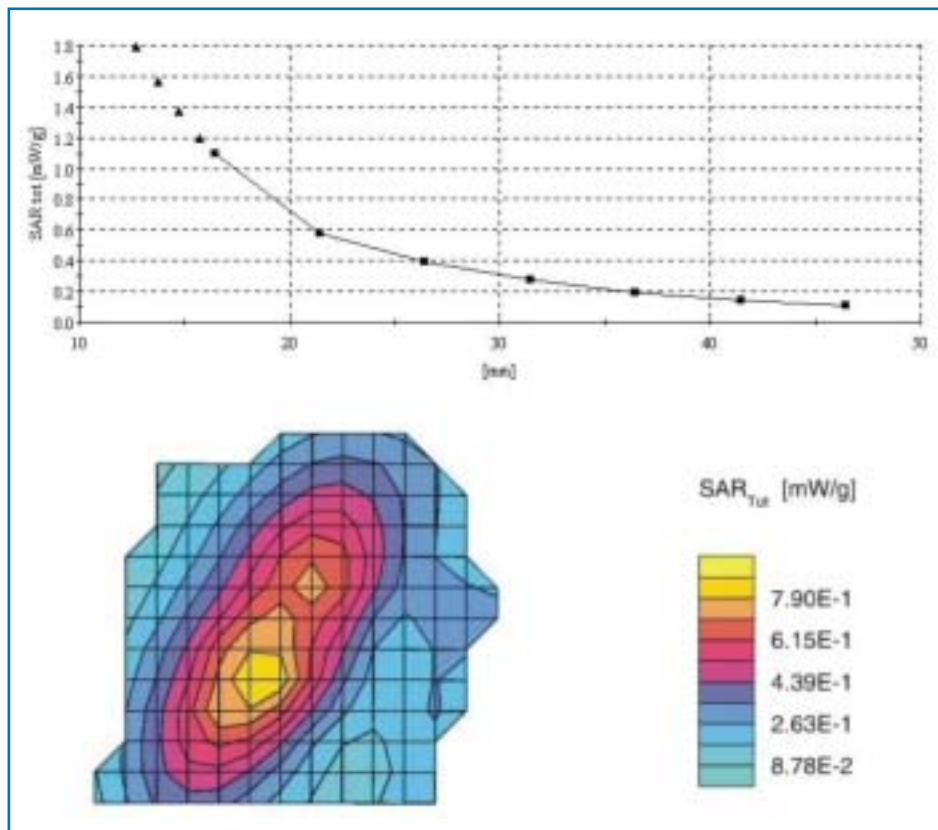


Abbildung 1:

Oben: Spezifische Absorptionsrate (SAR) als Funktion des Abstands von der emittierenden I/2 Antenne. Messung ohne ElectroCap, linke Seite des generic twin phantom; Normalposition, $f = 385,25$ MHz, effektive Sendeleistung = 500 mW. SAR (10g) = 0,832 mW/g; worst case interpolation.

Unten: SAR Verteilung. Messung mit ElectroCap; Normalposition, $f = 385,25$ MHz, effektive Sendeleistung = 500 mW. SAR (10g) = 0.544 mW/g.

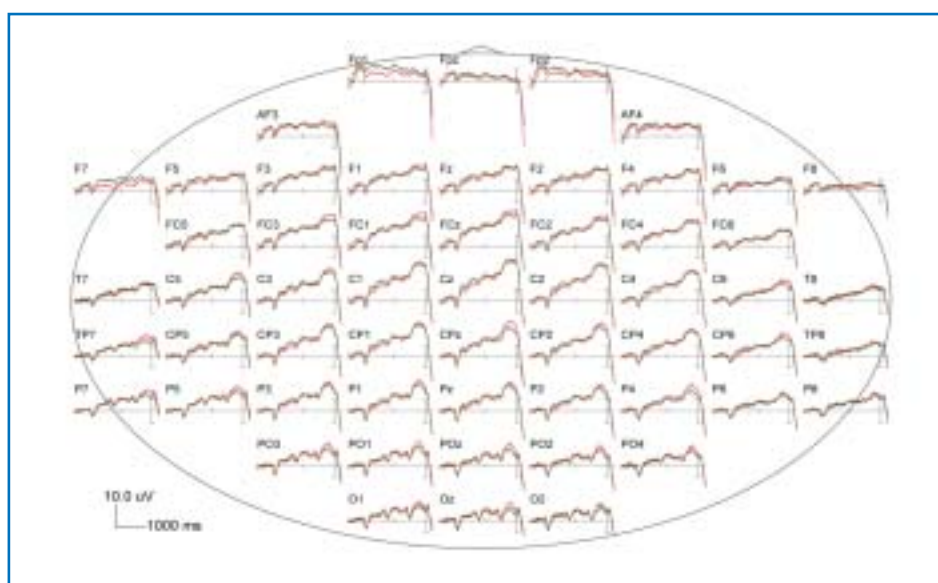


Abbildung 2: Kurvenverläufe des Bereitschaftspotenzials für die einzelnen Ableitpunkte, über die Probanden gemittelt (Referenz A1-A2). Überlagerung für die Bedingung TETRA-Exposition (rot: ON) und Scheinexposition (grün: OFF).

Während das elektromagnetische Feld nach GSM-Standard eine Amplitudenänderung des Bereitschaftspotenzials bewirkte, vermutlich durch eine unspezifische Erhöhung der allgemeinen zentralnervösen Aktivierung, führte das mit 17,65 Hz puls-modulierte TETRA-Signal zu keinen Änderungen des hier ausgewählten Parameters der bioelektrischen Hirnaktivität. Zukünftige Untersuchungen anderer kognitiver Funktionen (vgl. [7]) und ihrer Manifestationen in der bioelektrischen Hirnaktivität sollten dazu dienen, das Fehlen einer akuten Wirkung zu bestätigen bzw. zu widerlegen. Biophysikalische Überlegungen aus heutiger Sicht sprechen bei den zulässigen zum Einsatz kommenden Sendeleistungen jedoch eher gegen sogenannte „nicht-thermische“ Wirkungen im Gehirn, die nachweisbare Funktionsänderungen nach sich ziehen könnten (vgl.[8]).

- [1] Possible Health Effects from Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation. Documents of the National Radiological Protection Board. Volume 12 NO 2 2001
- [2] Hossmann K A, Hermann D M. (2003). Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. *Bioelectromagnetics* 24(1): 49-62.
- [3] Haberland, L (2005). Warum wird gepulsten Signalen eine höhere biologische Relevanz zugemessen? *FGF-Newsletter* 2/2005, 18-12.
- [4] Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I. (1998). Effects of microwaves emitted by cellular phones on slow brain potentials. *Bioelectromagnetics* 19, 384-387.
- [5] Freude G., Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I. (2000). Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. *Eur J Appl Physiol* 81 (1-2): 18-27.
- [6] Freude G, Ullsperger P, Erdmann U. (1999). Slow brain potentials in a visual monitoring task. *International Journal of Psychophysiology* 33: 231-241.
- [7] Haarala C, Bjornberg L, Laine M, Revonsuo A, Koivisto M, Hamalainen H. (2003). Effect of a 902 MHz electromagnetic field emitted by mobile phones on human cognitive function: A replication study. *Bioelectromagnetics* 24(4): 283-288.
- [8] Glaser, R (2004). Spielen Modulationen eine Rolle bei biologischen Effekten hochfrequenter Felder? *FGF-Newsletter* 4/2004, 18-22.

Literatur

TETRA – die wichtigsten Infos zur Technik

TETRA ist als Zeitmultiplex-System (TDMA=Time Division Multiple Access) mit vier unabhängigen Kommunikationskanälen pro Träger definiert. Der Abstand zwischen den einzelnen Trägern beträgt 25 kHz, daher auch die Bezeichnung TETRA 25. Gegenüber dem analogen Bündelfunk im MPT- Standard bedeutet dies eine Verdopplung der Frequenznutzung bei verbesserter Qualität. TETRA- Systeme bieten also gegenüber GSM-Netzen, die bei 200 kHz Kanalabstand acht Kommunikationskanäle bereitstellen, die vierfache Frequenznutzung.

Die Übertragungsrate bei TETRA beträgt immer 36 kBit/s pro Funkkanal. Neben den zu übertragenden Daten werden zusätzliche Steuersignale sowie Codes zur Sicherung der Funkstrecke übertragen. Die Nutzbitrate pro Kommunikationskanal beträgt 7,2 kBit/s. Sprache wird in einem speziellen TETRA-CODEC umgesetzt. Der CODEC-Ausgang liefert 4,8 kBit/s, die in einem Zeitschlitz einschließlich der Sicherungsinformationen mit 7,2 kBit/s übertragen werden. Der Abstand zwischen Sende- und Empfangsfrequenz beträgt 10 MHz. Für Duplex-Sprachübertragung (Gegensprechen) wird bei TETRA das Time Division Duplex-Verfahren eingesetzt. Es vermeidet die bei GSM-Netzen erforderliche aufwändige Filtertechnik. Die Sprache wird zeitlich so komprimiert, dass eine kontinuierliche Zweiwege-Kommunikation über zwei versetzte Zeitschlitze möglich ist.

Zur Datenübertragung im TETRA-Netz können ein bis vier Zeitschlitze zusammengefasst werden. Damit ist eine Datenübertragung bis zu 28,8 kBit/s möglich. Mit eingeschaltetem Protokoll für höchste Datensicherheit beträgt die Nutzrate immer noch 2,4 kBit/s.

TETRA verfügt über einen Direktmodus, bei dem zwei oder mehr Funkgeräte unabhängig vom Netz miteinander kommunizieren können. Auch kann ein einzelnes Funkgerät als mobile Relaisstation für andere Geräte eingesetzt werden. So kann ein Gerät im Fahrzeug als Relais die Funkversorgung der Handfunkgeräte auf einem Areal sicherstellen. Während des Direktbetriebs wird ständig überwacht, ob vom Netz Verbindungen angefordert werden. ■