

## **Bewertung Modulation EEG**

# **GSM-1800-Hochfrequenzfelder mit verschiedenen Modulationen und Feldstärken: Kein Kurzzeiteffekt des menschlichen EEG im Wachzustand**

Hans-Jochen Heinze, Hermann Hinrichs

**Mehrere Studien haben in letzter Zeit teils widersprüchliche Ergebnisse zu potenziellen Wirkungen elektromagnetischer Felder (EMF) digitaler Mobiltelefone auf das menschliche Elektroenzephalogramm (EEG) im Wachzustand und das Schlafprofil berichtet. Diese Ungereimtheiten könnten auf die unterschiedlichen Eigenschaften der in den Experimenten verwendeten EMF zurückgehen. Es war das Ziel der vorliegenden Studie, den Einfluss von Modulationsfrequenz und Feldintensität auf von EMF des GSM-1800-Standards erzeugte potenzielle Veränderungen des EEG aufzuzeigen. Aus diesem Grund haben wir eine doppelt-blind Placebo-kontrollierte Studie mit 18 gesunden menschlichen Teilnehmern durchgeführt. Diese wurden EMF eines GSM-Handys mit Leistungsspitzen von 1/4, 1, 2 und 8 W und entweder 217, 108, 27 oder 0 Hz (d.h. CW) Pulsmodulation ausgesetzt. Die entsprechende spezifische Absorptionsrate (SAR (10g)) lag bei etwa 0,61 W/kg bzw. 1,25 W/kg. Während einer vierminütigen Einwirkungszeit wurden keine unmittelbaren Veränderungen im EEG hinsichtlich spektraler Komponenten festgestellt.**

### **Einleitung**

Seit der Entstehung von Netzen zur Mobiltelefonie werden Bedenken über mögliche Gesundheitsgefahren aktiver Mobiltelefone und Basisstationen laut. Das menschliche Zentralnervensystem (ZNS) ist eines der sensibelsten Organe, das sowohl vitale physiologische Funktionen als auch das Bewusstsein steuert. Daher ist diese Frage seit langem ein zentraler Gegenstand von Forschungsaktivitäten mit dem Schwerpunkt möglicher biologischer Interferenzen schwacher elektromagnetischer Felder (EMF) nach dem GSM-Standard (Global System for Mobile Communication).

Das an der Kopfhaut gemessene Elektroenzephalogramm (EEG) hat sich seit der erstmaligen Untersuchung durch Berger et al. (1929) weltweit als Parameter zur Messung der globalen Hirnfunktionen etabliert. Nach den Ergebnissen von Adey (1992) und anderen kommen GSM-ähnliche EMF als Auslöser von Interferenzen mit dem EEG in Betracht, weil ihre Amplituden mit Pulsfrequenzen moduliert sind, die in der Nähe des typischen EEG Frequenzbereichs (0 ... 30 Hz) liegen. Diese Überlegungen werden gestützt durch Ergebnisse von Bawin (Bawin et al., 1978), sowie die darauf basierenden Untersuchungen der Gruppe um Blackman (Blackman et al., 1979, Dutta et al.), die eine Wechselwirkung zwischen Calcium-Efflux und hochfrequenten (mehrere hundert MHz) EMF postulieren, wenn diese mit 16 Hz bzw. 50 Hz amplitudenmoduliert werden, wobei als weiterer Freiheitsgrad die Feldstärke genannt wird. Die Calcium-Konzentration in Neuronen beeinflusst die neuronale Erregbarkeit und damit die Aktivität neuronaler Netzwerke (siehe z.B. Dudel, 1995), so dass ein geänderter Calcium-Efflux prinzipiell zu einem EEG-Korrelat führen könnte. Allerdings ist die Validität dieser Ergebnisse umstritten, da spätere Studien anderer Gruppen unter Anwendung weiterentwickelter Methodik (Merritt et al., 1982; Cranfield et al., 2001; Meyer et al. 1998; Linz et al., 1999) diese Befunde nicht replizieren konnten. Eine Interferenz könnte entweder direkt erfolgen, zum Beispiel mit niederfrequenten Komponenten, erzeugt durch unregelmäßig übertragene Frames zur Kanalorganisation, oder durch Kreuzmodulation mit der regulären 217-Hz-Pulsfrequenz des aktiven Telefons.

In der Vergangenheit haben Arbeiten über Studien zu möglichen EEG-Schwankungen während der Exposition menschlicher Probanden gegenüber von GSM-basierten Geräten emittierten schwachen elektromagnetischen Feldern (EMF) berichtet. In einer frühen Studie haben Reiser et al. (1995) einen Anstieg der Alpha- und auch der Beta-Aktivität (Frequenzen > 12 Hz) 15 Minuten nach, aber nicht während einer 15-minütigen Exposition gegenüber GSM-EMF beobachtet. In einem ähnlichen Expe-

riment zeichneten Thuroczy et al. (1996) das EEG von Teilnehmern vor, während und nach zwei aufeinander folgenden Expositionen gegenüber hochfrequenten EMF auf. Zudem erfassten sie signifikante Schwankungen des EEG, einschließlich der Alphaleistung.

Dennoch kann keine klare Tendenz zu einer Verminderung oder einem Anstieg in den verschiedenen Frequenzbändern aus den veröffentlichten Resultaten abgeleitet werden, da die Veränderungen im EEG über die unterschiedlichen Phasen des Experiments nicht konsistent sind.

Mann and Röschke (1996), Wagner et al. (1998) and Wagner et al. (2000) suchten nach möglichen Änderungen in Schlafprofilen aufgrund athermischer EMF-Effekte, die auf die kontinuierliche Einwirkung von GSM-900-Feldern zurückgingen. Das EEG war als einer der Parameter einbezogen. In der ersten Studie ergaben sich tatsächlich signifikante Auswirkungen auf das Schlafprofil, darunter auch Fluktuationen des EEG im Alphafrequenzband. Es gelang jedoch nicht, diese Befunde in den beiden Folgestudien zu verifizieren. Dies ist kompatibel mit dem Ergebnis unserer eigenen Studie (Hinrichs et al., 2005), in der wir bei einer kontinuierlichen Exposition mit 217-Hz-moduliertem GSM 1900-Feld während des Nachtschlafes weder eine Änderung des Schlafprofils noch der Spektralparameter des simultan registrierten EEG nachweisen konnten. Stattdessen zeigten Borbely et al. (1999), Huber et al. (2000) und Huber et al. (2002) in neueren Studien EEG-Schwankungen im Alphafrequenzband während der Nacht nach - insbesondere diskontinuierlicher - Exposition der Teilnehmer gegenüber pulsmodulierten elektromagnetischen Feldern (EMF) der 900-MHz-Frequenz, nicht aber nach der Anwendung von EMF ohne Modulation auf. In einem weiteren Test konzentrierten sich Röschke and Mann (1997) auf Schwankungen im menschlichen Wach-EEG unter Einwirkung von GSM 900. Es wurden keine Kurzzeiteffekte des EEG gefunden. Auch einem ähnlichen Versuchsaufbau von Spittler et al. (1997) gelang es nicht, signifikante EEG-Änderungen festzustellen. Krafczyk et al. (1998) bezogen sowohl den GSM-900-Standard als auch den GSM-1800-Standard in ihr Experiment ein, das der Suche nach potenziellen EMF-induzierten Effekten im EEG gewidmet war. Wieder wurden keine mit EMF verbundenen Modulationen des EEG beobachtet. Dasselbe gilt für eine ähnliche Studie von Hietanen et al. (2000), die nach möglichen Änderungen im EEG Ausschau hielten, während die Teilnehmer 900-MHz- und 1800-MHz-Radiofrequenzen fünf verschiedener Standards ausgesetzt wurden, darunter auch GSM. Die beobachteten Abweichungen in der Deltaleistung waren höchstwahrscheinlich auf den statistischen Zufall zurückzuführen.

Widersprüchliche Ergebnisse wurden außerdem von Verhaltensexperimenten (Preece et al., 1999; Koivisto et al., 2000; Koivisto et al., 2001; Russo et al., 2005; Besset et al., 2005; Preece et al., 2005; Eliyahu et al., 2006) und von Studien berichtet, die ereigniskorrelierte Techniken auf der Basis des Elektroenzephalogramms (EEG) (Urban et al., 1998; Freude et al., 1998; Freude et al., 2000; Hamblin et al., 2004; Hamblin et al., 2006; Krause et al., 2000a; Krause et al., 2000b; Krause et al. 2004; Maby et al.; 2005) oder des Magnetoenzephalogramms (MEG) nutzten (Eulitz et al., 1998; Hinrichs and Heinze, 2004). Vergleicht man diese unterschiedlichen Befunde und die zugrunde liegenden experimentellen Parameter (siehe auch: Übersichtsartikel von Hamblin et al., 2002), könnte einer der Gründe für die Inkonsistenzen in den im Experiment verwendeten unterschiedlichen Feldstärken und/oder Modulationsarten zu finden sein. Basierend auf dieser Hypothese bestand das Ziel der jetzigen Studie darin herauszufinden, ob etwaige Kurzzeiteffekte des EEG in irgendeiner Form von den Schwankungen in der Feldleistung oder Modulation eines GSM-1800-ähnlichen EMF abhängig sind.

Aus diesem Grund haben wir kurze EEG-Sequenzen menschlicher Probanden während der Einwirkung von EMF mit vier verschiedenen Modulationsmustern und ebenso vier verschiedenen Feldstärken ausgewertet. Das Experiment war als doppelt-blinder und placebo-kontrollierter Crossover-Versuch konzipiert.

## **Material und Methoden**

27 gesunde, nicht unter Medikamenteneinfluss stehende Probanden wurden in die Studie einbezogen. 9 schieden entweder wegen Vigilanzschwankungen oder zu vieler Artefakte während der EEG-Aufnahme aus. Insofern wurden die Daten von 18 Probanden (11 weiblich), mit einem Durchschnittsalter von 29,7 Jahren (18 ... 58) ausgewertet. Die Probanden wurden aus der örtlichen Studentenschaft und aus den Beschäftigten der Universität rekrutiert. In allen Fällen waren der neurologische und der psychologische Zustand normal. Von allen Probanden war ein schriftliches Einverständnis eingeholt worden. Auch wurde die Studie von der örtlichen Ethikkommission gebilligt.

Die EEG-Messungen wurden in einem abgeschlossenen Raum durchgeführt, dessen Wände mit Schaumstoffelementen ausgelegt waren, die dem Zweck dienen, EMF mit 1-2 GHz mit einer Abschwächung um mindestens 20 dB zu absorbieren (RANTEC FL 2250). Der Bioverstärker wurde außerhalb dieses Raumes positioniert. Während der Messung saßen die Probanden auf einem hölzernen Bürostuhl, entspannt, aber wach, mit geschlossenen Augen. Für die Exposition wurde ein modifiziertes im Handel erhältliches Mobiltelefon (Nokia PT11) benutzt. Die Antenne war direkt an einen Test-Übertragungsverstärker gekoppelt (Rohde & Schwarz SME 23), der GSM-1800-Felder mit verschiedenen Eigenschaften, wie in Tabelle 1 beschrieben, erzeugt. Das Telefon war am Rahmen des Stuhls befestigt und individuell eingestellt, sodass die Antenne sich dicht am Ohr befand (Abstand vom Kopf des Probanden etwa 10 mm). Orientierung und Position der Antenne (siehe Grafik 1) entsprachen annähernd der 30°-Position des Messstandards des Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, SC211/B, WGMTE (1997). Die entsprechenden SARs wurden in einer getrennten Studie (IMST 1998) mittels eines anatomisch realistischen, maßstabsgetreuen Kopfmodells abgeschätzt.

| Label | Pp[W]                          | Fmod [Hz]    | Pavg [W] | SAR (10g) [W/kg] | SAR (1g) [W/kg] |
|-------|--------------------------------|--------------|----------|------------------|-----------------|
| A     | 1/4                            | CW/no modul. | 1/4      | 1.22             | 2.28            |
| B     | 2                              | 217          | 1/4      | 1.22             | 2.28            |
| C     | 1                              | 217          | 1/8      | 0.61             | 1.14            |
| D     | 2                              | 108          | 1/8      | 0.61             | 1.14            |
| E     | 8                              | 27           | 1/8      | 0.61             | 1.14            |
| F     | Field switched off ('Placebo') |              |          |                  |                 |

**Tabelle 1: Beschreibung der Eigenschaften des angewendeten GSM-Feldes**

Pp = Peak power (Leistungsspitze) des Trägers

fmod = Modulationsfrequenz

Pavg = durchschnittl. Leistung des modulierten Trägers

SAR = Spezifische Absorptionsrate



**Grafik 1: Versuchsaufbau Exposition.**

Das Rechteck steht für das Telefon. Es war an einem Holzrahmen befestigt, und seine Position war individuell auf den Kopf des Teilnehmers ausgerichtet.

Die EEGs wurden referenziell mit Ag/AgCl-Elektroden an allen 19 Positionen des internationalen 10-20-Elektrodensystems (Jasper, 1958) plus der beiden Mastoid-Elektroden (A1, A2) gemessen. Auch ein Elektrokardiogramm (EKG) und zwei Elektrookulogramme wurden registriert, was insgesamt ein Setting von 24 Kanälen ergab. Nach dem Durchlaufen eines Antialiasing-Tiefpassfilters (Cauer, 64 Hz Cutoff-Frequenz, 49 dB-Abschwächung bei 100 Hz) wurden die Signale mit einer Sampling-Rate von 153,6 Hz pro Kanal digitalisiert.

Jeder Proband wurde einer 4-minütigen EEG-Registrierung für jede Feldbedingung (wie in Tabelle 1 ausgeführt) unterzogen, darunter eine Scheinexposition ohne Feld (Placebo-Bedingung). Die sechs Aufzeichnungsperioden waren jeweils durch Pausen von 3,5 min getrennt, um eine hinreichend hohe Vigilanz sicherzustellen. Die Abfolge hinsichtlich der Expositionsbedingungen wurde den Probanden randomisiert zugeteilt. Weder der Proband noch der EEG-Techniker wussten über die aktuellen Feldbedingungen Bescheid (doppelt-blinde Bedingung). Eine vorausgehende 6-minütige Aufzeichnung, während der das EMF ausgeschaltet war, diente der Eingewöhnung und wurde nicht analysiert. Die Signaleigenschaft wurde mit Hilfe eines Leistungssignalmonitors, der Teil des SME 23-Signalgenerators war, kontinuierlich kontrolliert.

Nach der Re-Referenzialisierung der Signale auf das gemittelte EEG beider Mastoidelektroden wurden die Daten einer Leistungsspektrumsanalyse unterzogen, wobei der schnelle Fourier-Transformations(FFT)-Algorithmus verwendet wurde. Nach Welch (1967) wurden Kurzzeitperiodogramme für aufeinander folgende Perioden aus jeweils 512 Samples (3,33 sec) errechnet und über das volle 4-minütige Intervall gemittelt. Perioden mit Artefakten wurden nicht berücksichtigt, dabei wurde ein kombiniertes Amplituden- und Gradientenkriterium angewendet (Hinrichs et al. 1996). Um die Zahl der Parameter zu reduzieren, die Eingang in die nachfolgende statistische Auswertung fanden (siehe Herrmann et al. (1979)), wurden Bandleistungswerte für sechs Frequenzbänder errechnet: Delta [1,5 - 3,5 Hz], Theta [3,5 - 7,5 Hz], Alpha [7,5 - 12,5], Beta1 [12,5 - 18 Hz], Beta2 [18 - 30 Hz] und Gesamt [1,5 - 30 Hz]. Außerdem wurden mediane Frequenzen, d.h. der mittlere Wert der spektralen Verteilung in einem bestimmten Frequenzband, für alle Frequenzbänder abgeleitet. Für 7 frontale Kanäle wurden die Parameter Delta und Gesamt verworfen (Fp1, Fp2, F3, F4, Fz, F7, F8 vom 10-20-Schema), um das Resultat nicht durch potenzielle residuale niederfrequente EOG-Artefakte zu verzerren. Damit wurde ein Satz von 200 Parametern der nachfolgenden statistischen Auswertung unterzogen.

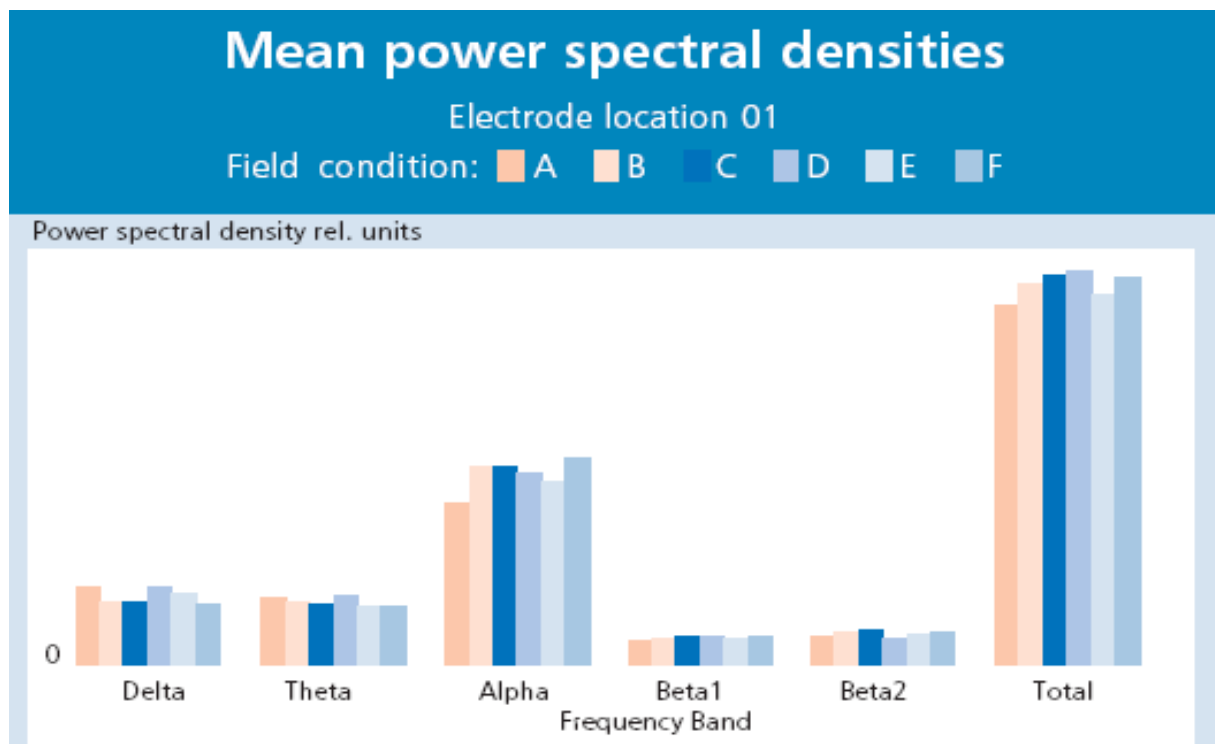
Eine Analyse von Shapiro und Wilks (1965) zeigte starke Abweichungen von einer normalen Verteilung für viele der spektralen Parameter auf. Deshalb wurden sie vor der weiteren Evaluation logarithmisch transformiert. Unter Berücksichtigung der deutlichen Korrelationen zwischen Leistungs- und Frequenzwerten der verschiedenen EEG-Kanäle wurde eine multivariate Analyse der Varianz (MANOVA) mit 'Proband', 'Feldbedingung' und 'Messperiode' als Faktoren vorgenommen, um mögliche Unterschiede zwischen den unter den sechs unterschiedlichen Expositionsbedingungen aufgenommenen EEG zu erfassen. Jedes Frequenzband wurde einzeln analysiert. Sowohl das globale Signifikanzmaß (Pillais trace) als auch die univariaten Testergebnisse wurden berücksichtigt, um mögliche Unterschiede zwischen den EEG-Parametern festzustellen. Die Unterschiede wurden mit einem Niveau von  $p < .05$  als signifikant betrachtet. Die statistischen Analysen wurden mit dem SAS/PC 6.03 Paket durchgeführt.

## Ergebnisse

Die leistungsspektralen Werte für die der Antennenspitze am nächsten gelegene Elektrode sind als Beispiel in Grafik 2 beschrieben. Im Allgemeinen werden nur geringe Unterschiede zwischen den unter verschiedenen Feldbedingungen beobachteten Resultaten gefunden. Dasselbe gilt für die medianen Frequenzen. Diese Beobachtungen werden durch die in Tabelle 2 dargestellte statistische Auswertung bestätigt.

| Frequency band | Number of variables included | MANOVA: p-values for hypothesis of no differences | ANOVA: Variables with significant (p<.05) differences in univariate tests |         |
|----------------|------------------------------|---|---|---------|
|                |                              |   | Variable  | p-value |
| Total          | 24                           | .4934   | —   |         |
| Delta          | 24                           | .1934   | —   |         |
| Theta          | 38                           | .4542   | —   |         |
| Alpha          | 38                           | .7161   | MED_17  | .0489   |
| Beta1          | 38                           | .3732   | MED_1   | .0438   |
|                |                              |   | MED_3   | .0178   |
|                |                              |   | MED_15  | .0382   |
| Beta2          | 38                           | .2051   | POW_9   | .0473   |

**Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Analysen**  
**Signifikanzbereiche multivariater Analyse der Varianz (MANOVA) via Pillais trace.**  
MED\_xx: mediane Frequenz in Kanal xx  
POW\_xx: Bandleistung in Kanal xx



**Grafik 2**  
**Spektralbandleistungen bei Elektrodenposition O1 (in der Nähe der Antennenspitze)**  
**für die verschiedenen Expositionsbedingungen.**  
Die Expositionsbedingungen sind durch die entsprechenden Labels (siehe Tabelle 1) markiert.

Es gelang nicht, mit der MANOVA irgendwelche signifikanten Unterschiede zwischen den unter den verschiedenen Feldkonditionen abgeleiteten spektralen Parametern festzustellen. Auch der individuelle univariate Test konnte statistisch signifikante bedingungsbezogene Unterschiede nur in wenigen

Parametern in drei Frequenzbändern erkennen. Berücksichtigt man die große Zahl von 200 gleichzeitig getesteten Variablen, sind bei einem Signifikanzbereich von  $p < .05$  zufallsbedingt bis zu 10 statistisch signifikante Unterschiede zu erwarten (siehe Abt 1983, Ferber et al., 1999). Wie in Tabelle 2 aufgeführt, wurden insgesamt fünf signifikant verschiedene Variablen gefunden, die zudem nicht systematisch entweder in einem bestimmten Frequenzband oder in einem klar erkennbaren topografischen Bereich gehäuft sind. Dies gibt Anlass zu der zusammenfassenden Schlussfolgerung, dass es keine unter verschiedenen Modulationen und Feldstärken von GSM-EMF abgeleiteten systematischen Unterschiede zwischen EEG-Spektra gibt.

Laut Selbsteinschätzung nahm keiner der Probanden einen Einfluss der Feldexposition wahr.

## Diskussion

Das Ziel der Untersuchung war (i) Ergebnisse früherer Studien für GSM-1800-ähnliche EMF zu reproduzieren und (ii) eine potenzielle Dosis/Wirkungs-Reaktion in Form eines Amplituden- oder Frequenzfensters zu finden, wie z.B. Adey sie behauptet (1992).

Anders als Reiser et al. (1995), von Klitzing (1992, 1995) und Thuroczy et al. (1996) fanden wir keinerlei Hinweis auf einen athermischen biologischen Effekt von GSM-ähnlichen Feldern auf das Wach-EEG. Ein Vergleich mit den Studien von v. Klitzing (1992, 1996) ist allerdings schwierig, da v. Klitzing die Details seines experimentellen Settings und des Postprocessing, darunter die angewendeten statistischen Methoden, nicht konsequent spezifiziert hat. Auch der Vergleich mit der Studie von Thuroczy (1996) wirft Probleme auf, zeigen doch die Abbildungen dieser Publikation neben einem Anstieg der Alphaleistung an anderer Stelle auch einen Abfall, was Fragen nach unkontrollierten Faktoren, zum Beispiel Vigilanz, aufwirft.

Unser negatives Ergebnis entspricht allerdings den Resultaten von Spittler et al. (1997), Röschke et al. (1997) und Hietanen et al. (2000) (der Schwerpunkt liegt hier auf GSM-900-Feldern), und Krafczyk et al. (1998) sowohl GSM-900- als auch GSM-1800-Felder einbezogen.

Wenn man jedoch die Unterschiede in den experimentellen Settings berücksichtigt, sind die Ergebnisse nicht gänzlich vergleichbar. In unserer Studie betrug die Dauer der Exposition per Aufzeichnung und Feldbedingung nur 4 Minuten mit einer 3,5-minütigen Pause gegenüber einem Expositionsintervall von 20 Minuten (Hietanen et al.), 10 Minuten (Spittler et al., 1997), 3,33 Minuten (Röschke and Mann, 1997) und 15 Minuten (Reiser et al., 1997). Reiser et al. beobachteten GSM-bezogene EEG-Leistungszuwächse in nur einem von 19 Kanälen, und zwar erst 15 Minuten nach dem Ende der Exposition. Diese leicht verzögerte Reaktion nach einem längeren Expositionszeitraum wäre von unserer Messung vermutlich nicht erfasst worden, deren Ziel es war, sofortige Kurzzeiteffekte aufzuspüren, ohne auf mögliche Überlagerungseffekte in der Abfolge von unter verschiedenen Bedingungen aufgezeichneten EEGs einzugehen. Längere Perioden zwischen aufeinander folgender Exposition und aufeinander folgenden Aufzeichnungen reduzieren das Risiko von Überlagerungseffekten, allerdings auf Kosten einer erhöhten Variabilität infolge chronobiologischer Fluktuationen, wie sie viele Male für EEG-Parameter beschrieben worden sind (siehe z.B. Shannahoff-Khaza, 1993; Cajochen et al., 1999). Außerdem könnten längere Expositionszeiträume die Möglichkeit erhöhen, Effekte im ZNS auszulösen, doch zugleich auch die Wahrscheinlichkeit vigilanzbedingter EEG-Schwankungen erhöhen, die wiederum schwache GSM-induzierte Modulationen maskieren könnten. Prinzipiell sollten sich allerdings durch die Randomisierung der Sequenz der verschiedenen Feldtypen über die Probanden mögliche überhangbedingte Verzerrungen aufheben, allerdings zulasten einer erhöhten Varianz und damit verringerter Sensitivität.

Die von einigen der bisher durchgeführten Schlafstudien berichteten EEG-Befunde (Mann and Röschke, 1996; Wagner et al., 1998; Wagner et al., 2000; Borbely et al., 1998; Huber et al., 2000; Huber et al., 2002) konnten in den aktuellen Experimenten nicht überprüft werden, weil diese Gruppen nicht nur eine weit längere Expositionsphase anwendeten, sondern das EEG während des gesamten Nachtschlafs analysierten, d.h. unter physiologisch unterschiedlichen Bedingungen. Außerdem wendete die Gruppe von Huber et al. ein anderes (gemischtes) Modulationsschema an, das von den in der vorliegenden Studie angewendeten Pulsfrequenzen nicht abgedeckt wurde.

Mehrere Gruppen suchten nach EMF-induzierten Schwankungen in den ereigniskorrelierten EEG-Potenzialen (ERP) oder ereigniskorrelierten Magnetfeldern (ERF) während der Durchführung kogniti-

ver Aufgaben (Freude et al. (1998); Freude et al. (2000); Eulitz et al. (1998); Krause et al., 2000a; Krause et al., 2000b; Krause et al., 2004; Krafczyk et al., 1998; Hinrichs and Heinze, 2004; Maby et al., 2005; Hamblin et al., 2004; Hamblin et al., 2006). Manche - wenn auch inkonsistenten - Effekte wurden tatsächlich unter der Einwirkung von GSM-Feldern beobachtet. Doch können die Effekte, die einige dieser Studien berichten, kaum mit unseren Resultaten verglichen werden, da der psychophysiologische Status der Probanden während der Durchführung einer kognitiven Aufgabe das laufende EEG stört. Dadurch lassen sich diese Signale nicht mit den EEG vergleichen, die unter Standardbedingungen aufgezeichnet wurden. Während die ERP spezifische sensorische oder kognitive Hirnfunktionen widerspiegeln, z.B. auditorische und visuelle Reizverarbeitung oder auch Aufmerksamkeits- und Gedächtnisfunktionen, eignet sich das kontinuierlich beobachtbare Spontan-EEG als Maß für die globale Hirnfunktion. In diesem Sinne ist das EEG im Allgemeinen auf Aussagen zum generellen Status des ZNS beschränkt.

In unserer Studie wurden sowohl die Modulation, d.h. die Pulsfrequenz, als auch die Feldstärke über ein breites Spektrum innerhalb der in den jüngsten ICNIRP-Empfehlungen festgeschriebenen Grenzwerte variiert (ICNIRP, 1998). Das Ziel dieses Aufbaus war es, eine potenzielle Amplitude oder Frequenzfenster zu bestimmen, die auf EEG-Interferenzprozesse reagieren. Solch ein nichtlinearer Mechanismus wäre keine allzu große Überraschung, zieht man die früheren Befunde z.B. von Dutta et al. (1989), Bawin et al. (1978) und Blackman et al. (1980) in Betracht, die unter der Einwirkung eines hochfrequenten EMF mit allerdings niedrigerer Trägerfrequenz (147 MHz bzw. 450 MHz) einen erhöhten Efflux von  $Ca^{++}$  beobachteten, der bei einer Modulationsfrequenz von 16 Hz und 50 Hz am wirksamsten war. Zieht man die Abhängigkeit der interneuronalen Kommunikation von diesem Parameter in Betracht, kann eine frequenzabhängige Empfänglichkeit des EEG gegenüber EMF nicht ausgeschlossen werden. Doch das komplette Fehlen von EEG-Schwankungen bei vier verschiedenen Feldstärken und Pulsfrequenzen in der aktuellen Studie, wenn auch auf Kurzzeitexposition beschränkt, macht einen Mechanismus im Sinne eines Frequenz- oder Amplitudenfensters unwahrscheinlich. Diese Interpretation ist im Einklang mit den bereits oben erwähnten neueren Studien (Merritt et al., 1982; Cranfield et al., 2001; Meyer et al., 1998; Linz et al., 1999), die die Modulation des Calcium-Efflux durch modulierte elektromagnetische Felder nicht zu reproduzieren vermochten.

Unsere Befunde mögen auch bei der Interpretation einiger inkonsistenter Resultate aus drei neueren Schlafstudien von Mann and Röschke (1996), Wagner et al. (1998) und Wagner et al. (2000) von Nutzen sein. In ihrem ersten Experiment verwendeten sie eine Leistungsdichte von etwa  $0,5 \text{ W/m}^2$  (geschätzt nach dem Experimentaufbau; Wagner et al., 2000) und beobachteten statistisch signifikante Variationen der Schlafstruktur, die jedoch in ihrer Folgestudie bei  $0,2 \text{ W/m}^2$  nicht mehr auftauchten, wengleich eine den vorherigen Befunden ähnliche Tendenz blieb (Wagner et al. (1998)). Da sie eine Dosis/Reaktions-Wirkung vermuteten, führten sie eine dritte Studie durch und verwendeten dieses Mal eine erhöhte Feldstärke von  $5 \text{ W/m}^2$  (Wagner et al., 2000). Überraschenderweise wurde diesmal überhaupt kein Effekt beobachtet. In der Zusammenfassung dieser Resultate kann man schlussfolgern, dass auf diesem Niveau der Interferenz in der Tat ein Fenstermechanismus wirksam wird. Doch wenn wir an unsere Befunde denken, zögert man, zu dieser Erklärung zu greifen. Schlussfolgerungen aus unserer Studie lassen sich kaum zur Interpretation der Ergebnisse der Gruppe um Huber und Mitarbeitern (Borbely et al., 1999; Huber et al., 2000; Huber et al., 2002) ableiten, da diese Gruppe eine komplexere Modulation mit Pulsfrequenzen von 2, 8, 217 und 1536 Hz verwendeten.

Die Studie wurde von E-Plus, Deutschland, finanziell und durch die Bereitstellung der Ausrüstung (EMF) unterstützt.

## Literatur

Abt K (1983):  
Significance testing of many variables. Problems and solutions.  
Neuropsychobiology, 9(1), 47-51.

Adey WR (1992):  
Signal function of brain electrical rhythms and their modulation by external electromagnetic fields.  
In: Basar E, Bullock TH (Eds.): Brain Dynamics. Birkhäuser, Boston, 325-353.

Bawin SM, Adey WR, Sabbit IM (1978):  
Ionic factors in release of  $45Ca^{2+}$  from chicken cerebral tissue by electromagnetic fields.  
Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 75, 12, 6314-6318.

- Berger H (1929):  
Über das Elektroenzephalogramm des Menschen.  
Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 87, 527-570.
- Besset A, Espa F, Dauvilliers Y, Billard M, de Seze R (2005):  
No effect on cognitive function from daily mobile phone use.  
Bioelectromagnetics, 26(2),102-8.
- Blackman CF, Benane SG, Elder JA, House DE, Lampe JA, Faulk JM (1980):  
Induction of Calcium-Ion Efflux From Brain Tissue by Radiofrequency Radiation: Effect of Sample Number and Modulation Frequency on the Power-Density Window.  
Bioelectromagnetics 1, 35-43.
- Borbély AA, Huber R, Graf T, Fuchs B, Gallmann E, Achermann P:  
Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram.  
Neuroscience Letters, 275: 207-210, 1999
- Cajochen C, Khalsa SB, Wyatt JK, Czeisler CA, Dijk DJ (1999):  
EEG and ocular correlates of circadian melatonin phase human performance decrements during sleep loss.  
Am. J. Physiol., 277, 640-649.
- Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, SC211/B, WGMTE, final draft (1997):  
Considerations for evaluation of human exposure to Electromagnetic Fields (EMFs) from Mobile Telecommunication Equipment (MTE) in the frequency range 30 MHz - 6 GHz.
- Cranfield CG, Wood AW, Anderson V, Menezes KG (2001):  
Effects of mobile phone type signals on calcium levels within human leukaemic T-cells (Jurkat cells).  
Int. J. Radiat. Biol., 77, 12, 1207-1217.
- Dudel J (1995):  
Erregungsübertragung von Zelle zu Zelle.  
In: Schmidt RF, Thews G (Eds.): Physiologie des Menschen. Springer, Berlin.
- Dutta SK, Ghosh B, Blackman CF. (1989):  
Radiofrequency radiation-induced calcium ion efflux enhancement from human and other neuroblastoma cells in culture.  
Bioelectromagnetics, 10(2), 197-202.
- Eliyahu I, Luria R, Hareuveny R, Margalio M, Meiran N, Shani G (2006):  
Effects of radiofrequency radiation emitted by cellular telephones on the cognitive functions of humans.  
Bioelectromagnetics, 27(2),119-26.
- Eulitz C, Ullsperger P, Freude G, Elbert T (1998):  
Mobile phones modulate response patterns of human brain activity.  
Neuroreport 9(14), 3229-3232.
- 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(1-2),18-27.
- Ferber G, Abt K Fichte K, Luthringer R (1999):  
IPEG guideline on statistical design and analysis for pharmacodynamic trials.  
Neuropsychobiology, 39(2), 92-100.
- Hamblin DL, Wood AW, Croft RJ, Stough C (2004):  
Examining the effects of electromagnetic fields emitted by GSM mobile phones on human event-related potentials and performance during an auditory task.  
Clinical Neurophysiology 115, 171–178
- Hamblin DL, Wood AW (2002):  
Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables.  
Int. J. Radiat. Biol., 78, 8, 659-669.
- Hamblin DL, Croft RJ, Wood AW, Stough C, Spong J (2006):  
The sensitivity of human event-related potentials and reaction time to mobile phone emitted electromagnetic fields. Bioelectromagnetics, 27, 265-273.
- Herrmann WM, Fichte K, Itil TM, Kubicki S (1979):  
Development of a classification rule for four clinical therapeutic psychotropic drug classes with EEG power-spectrum variables of human volunteers. Pharmakopsychiatr.  
Neuropsychopharmakol., 12(1), 20-34.

- Hietanen M, Kovala T, Hamalainen AM. (2000):  
Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones.  
Scand J Work Environ Health.;26(2), 87-92.
- Hinrichs H, Heinze HJ (2004):  
Effects of GSM electromagnetic field on the MEG during an encoding-retrieval task.  
Neuroreport, 15(7), 1191-4.
- Hinrichs H, Heinze HJ, Rotte M (2005):  
Human sleep under the influence of a GSM 1800 electromagnetic far field.  
Somnologie/Somnology 9, 185-191.
- Huber R, Treyer V, Borbely AA, Schuderer J, Gottselig JM, Landolt HP, Werth E, Berthold T, Kuster N, Buck A, Achermann P. (2002):  
Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG.  
J Sleep Res.;11(4), 289-295.
- Huber R, Graf T, Cote KA, Wittmann L, Gallmann E, Matter D, Schuderer J, Kuster N, Borbely AA, Achermann P. (2000):  
Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG.  
Neuroreport.;11(15), 3321-3325.
- Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) (1998):  
Dosimetrische Vermessung von DCS 1800-Mobiltelefonen.  
Technical report.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (1998):  
Guidelines for limiting exposure to timevarying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).  
Health Physics, 74(4), 494-522.
- Jasper, H.H. (1958):  
The ten-twenty electrode system of the international federation.  
Electroencephal. Clin. Neurophysiology, 10, 1426-1437.
- von Klitzing L (1992):  
Electromagnetic Fields Pulsed with 217 Hz alter EEG of man at very low energy levels.  
Proceedings of the 14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Lyon, 221-223,
- von Klitzing (1995): Low-frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. Physica Medica . XI, 2, 77-80.
- Koivisto M, Haarala C, Krause CM, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H (2001):  
GSM phone signal does not produce subjective symptoms.  
Bioelectromagnetics, 22(3), 212-5.
- Koivisto M, Krause CM, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H (2000):  
The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory.  
Neuroreport, 11(8), 1641-3.
- Krafczyk S, Bötzel K, Schulze S, Haberhauer P (1998):  
Messung des Einfluss gepulster Mikrowellen auf die Hirnstromaktivität des Menschen.  
Research Report of the 'Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen', München.
- Krause CM, Sillanmaki L, Koivisto M, Haggqvist A, Saarela C, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H (2000a):  
Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during a memory task.  
Neuroreport.;11(4), 761-764.
- Krause CM, Sillanmaki L, Koivisto M, Haggqvist A, Saarela C, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H (2000b): Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the electroencephalogram during a visual working memory task. Int J Radiat Biol.;76(12), 1659-67.
- Krause CM, Haarala C, Sillanmaki L, Koivisto M, Alanko K, Revonsuo A, Laine M, Hamalainen H. (2004):  
Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during an auditory memory task: a double blind replication study.  
Bioelectromagnetics.;25(1), 33-40.
- 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(8), 497-511
- Maby E, Le Bouquin Jeanes R, Faucon G, Liegeois-Chauvel C, De Seze R (2005):  
Effects of GSM signals on auditory evoked responses.  
Bioelectromagnetics, 26(5), 341-50.
- Mann K, Röschke J (1996):  
Effects of highfrequency electromagnetic fields on human sleep.  
Neuropsychobiology, 33, 41-47.

- Merritt JM, Shelton WM, Chamness AF (1982):  
Attempts to Alter  $5Ca^{2+}$  Binding to Brain Tissue With Pulse-Modulated Microwave Energy.  
Bioelectromagnetics 3, 475-478.
- Meyer R, Hambach U, Achenbach A, Linz K (1998):  
The influence of amplitude-modulated radiofrequency fields on the calcium current into human neuroblastoma cells.  
Proceedings, BEMS Twentieth Annual Meeting, St. Pete Beach, Florida, 39-40.
- Preece AW, Goodfellow S, Wright MG, Butler SR, Dunn EJ, Johnson Y, Manktelow TC, Wesnes K (2005):  
Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function in children.  
Bioelectromagnetics, Suppl 7, S138-43.
- Preece AW, Ivvi G, Davies-Smith A, Wesnes K, Butler S, Lim E, Valey A (1999):  
Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man.  
Int J Radiat Biol.,75(4),447-56.
- Reiser, HP, Dimpfel, W, Schober, F (1995):  
The influence of electromagnetic fields on human brain activity.  
Eur. J. Med. Res., 1, 27-32.
- Röschke J, Mann K (1997):  
No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram.  
Bioelectromagnetics, 18, 172-176.
- Russo R, Fox E, Cinel C, Boldini A, Defeyter MA, Mirsheker-Syahkal D, Mehta A (2005):  
Does acute exposure to mobile phones affect human attention?  
Bioelectromagnetics, Nov 22.
- Shannahoff-Khalsa D (1993):  
The ultradian rhythm of alternating cerebral hemispheric activity.  
Int. J. Neurosci., 70, 285-298.
- Shapiro SS, Wilks MB (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52, 591-611.
- Spittler, JF, Calabrese P, Gehlen W (1997):  
Einfluß elektromagnetischer Felder auf die menschliche Gehirntätigkeit.  
Medizintechnik, 117, 176-178.
- Thuroczy G, Kubinyi G, Sinay H, Bakos J, Sipos K, Lenart A, Bodo M, Szabo LD (1996):  
Human studies on potential influence of rf exposure emitted by GSM cellular phones on cerebral circulation and electroencephalogram.  
In: Proceedings of COST 244-workshop: Biomedical Effects of Electromagnetic Fields, Zagreb.
- Urban P, Lukas E, Roth, Z (1998):  
Does acute exposure to the electromagnetic field emitted by a mobile phone influence visual evoked potentials? A pilot study.  
Central European Journal of Public Health, 6, 172-176.
- Wagner P, Röschke J, Mann K, Hiller W, Frank C (1998):  
Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields.  
Bioelectromagnetics, 19, 199-202.
- Wagner P, Roschke J, Mann K, Fell J, Hiller W, Frank C, Grozinger M. (2000):  
Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields.  
Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. Neuropsychobiology.; 42(4), 207-12.
- Welch PD (1967):  
The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms.  
IEEE Trans. Audio Electroac. AU-15, 70-73.