

Hermann Wygoda

# Auswirkungen von von

## auf das zentrale Nervensystem

### Auswertung von neun EEG-Studien

Die häufig diskutierten vermuteten Auswirkungen elektromagnetischer Felder von Mobiltelefonen, die nach dem aktuellen GSM Standard (Global Standard for Mobile Phones) arbeiten, auf das zentrale Nervensystem wurde an Hand einiger Studien untersucht, die in den vergangenen Jahren veröffentlicht worden sind.



Diese Untersuchungen setzten das Elektroenzephalogramm (EEG) als Messinstrumentarium ein, um solche Wechselwirkungen festzustellen. Beim EEG werden über Elektroden in der Kopfhaut elektrische Signale abgeleitet, die zum Teil durch Vorgänge im Gehirn verursacht werden. Da die aktiven Bereiche des Gehirns auf unterschiedliche Orte des Kopfes verteilt sind, werden die Signale über 21 Elektroden nach einem vorgegebenem Muster abgeleitet. Da die geringen Spannungen, die bei EEG-Messungen erfasst werden, sowohl durch unterschiedliche technische Einflüsse aber auch durch das Verhalten der Probanden leicht beeinflusst werden können, ist bei diesen Untersuchungen eine besonders sorgfältige Vorgehensweise notwendig, die jegliche Störquellen ausschliessen.

Im folgenden wird auf neun Studien eingegangen, die in den vergangenen Jahren zu diesem Thema angefertigt wurden:

von Klitzing (1992)  
CETECOM/von Klitzing (1994)  
von Klitzing (1995)  
Reiser et al. (1995)  
Spittler et al. (1997)  
Hietanen et al. (1997)  
Röschke, Mann (1997)  
Thuroczy et al. (1997)  
Krafzyk et al. (1999)

1992 findet von Klitzing in seinen Versuchen Veränderungen bei seinen Testpersonen im Bereich der Alphawellen. 1995 exponierte er 17 Testpersonen in einem elektromagnetischen Feld über dreimal 15 Minuten, jeweils unterbrochen von 15 Minuten Pause. Die Feldstärken lagen um

# GSM-Mobiltelefonen

## nicht eindeutig nachweisbar

einige Größenordnungen unter den Feldstärken in anderen Studien. In diesen Versuchen stellte von Klitzing eine verminderte Aktivität im Bereich der Alphawellen (8-12 Hz) und gleichzeitig eine Aktivitätserhöhung bei tieferen Frequenzen (im Theta- und Gammabereich) während der Exposition fest. Allerdings gibt es keinerlei Informationen über die Abfolge von Kontroll- und Expositionsintervallen. Da auch die statistischen Bewertungen der Ergebnisse fehlen, sind Aussagen über die Signifikanz der Ergebnisse dieser Studie nicht möglich.

Nach der ersten Studie von Klitzings im Jahr 1992 wurde 1994 eine gemeinsame EEG-Messung von CETECOM und von Klitzing an drei Probanden durchgeführt. Bei zwei der drei Testpersonen stellte von Klitzing wiederum EEG-Veränderungen fest, die durch elektromagnetische Felder hervorgerufen sein konnten. CETECOM wertete die Daten erneut aus und verglich ihre Ergebnisse mit denen von Klitzings. Nach dieser Auswertung kam CETECOM zu dem Schluss, von Klitzings Ergebnisse beruhen auf methodischen oder technischen Beeinträchtigungen. Da jedoch nur drei Probanden in diesen Versuch einbezogen waren, wurde auf eine statistische Auswertung verzichtet. Bemerkenswert ist, dass einer der Probanden während der Messungen eingeschlafen sein soll. Da Schlafzustände regelmäßig Veränderungen im EEG nach sich ziehen, ist ein solches Ergebnis für die Fragestellung problematisch.

1995 suchten Reiser und seinen Mitarbeiter ebenfalls nach Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf das EEG. Sie legten ihre Untersuchung als Kreuzstudie an, bei der jeder der Probanden mehrfach

untersucht wurde und gleichzeitig als Kontrolle diente. Als einer weitere Randbedingung wurde eine Doppelblindanordnung gewählt, bei der weder der Versuchsleiter noch der Proband wussten, wann das elektromagnetische Feld aufgebaut wurde.

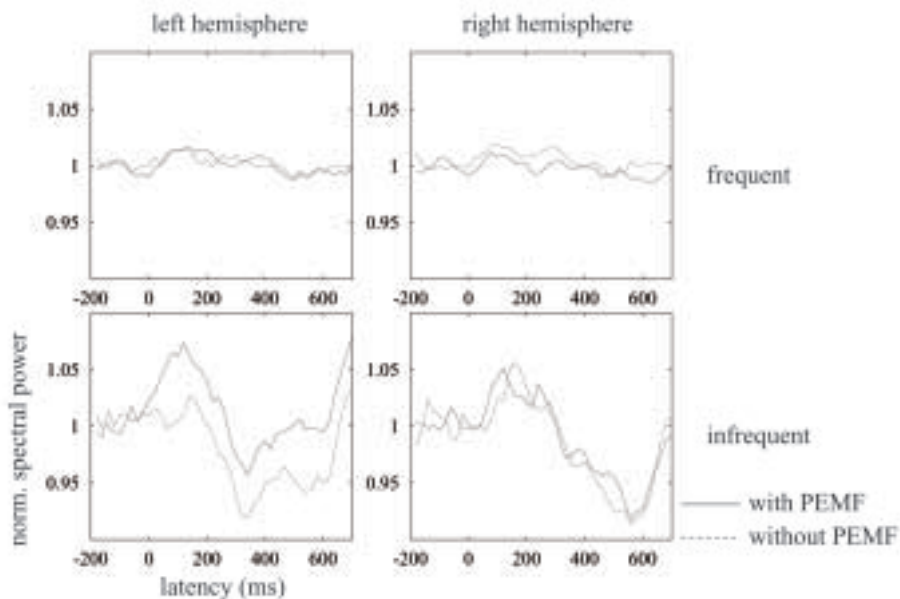
Bei der Auswertung zeigten sich für das 147 MHz-Feld eine Erhöhung der Alpha- und Betaaktivität an einem Messpunkt im hinteren Bereich des Kopfes, wenn die Expositions- und die Abschlussphase zusammen betrachtet wurden. Diese Messelektrode war jene, die der Feldquelle am nächsten lag. Dagegen konnte das Ergebnis bei getrennter Betrachtung der beiden Messphasen nicht signifikant nachgewiesen werden. Für das 900 MHz-GSM-Feld ergab sich eine signifikante Erhöhung der Betaaktivität für den Zeitraum nach Beendigung der Exposition. An anderen EEG-Messpunkten konnte keine Veränderungen der Potenziale festgestellt werden. Die beschriebenen Effekte können jedoch durch das von den Autoren gewählte statistische Verfahren (sign-test for paired samples) nicht ausgeschlossen werden.

Hietanen et al. untersuchten mehrere Mobiltelefone, darunter auch GSM-900 und GSM-1800 Geräte auf ihre möglichen Wirkungen auf das EEG. Alle Geräte wurden bei maximaler Sendeleistung betrieben, wobei die Testpersonen dem elektromagnetischen Feld jeweils 20 Minuten ausgesetzt wurden. Auch in dieser Studie wurden Scheinexpositionen durchgeführt. Lediglich bei Befeldung mit einem Mobilfunkgerät wurden Veränderungen im Bereich der Deltawellen festgestellt, doch war dieser Effekt nicht als signifikant einzuordnen. Messungen von Deltawellen sind besonders kritisch, da sie durch Transpira-

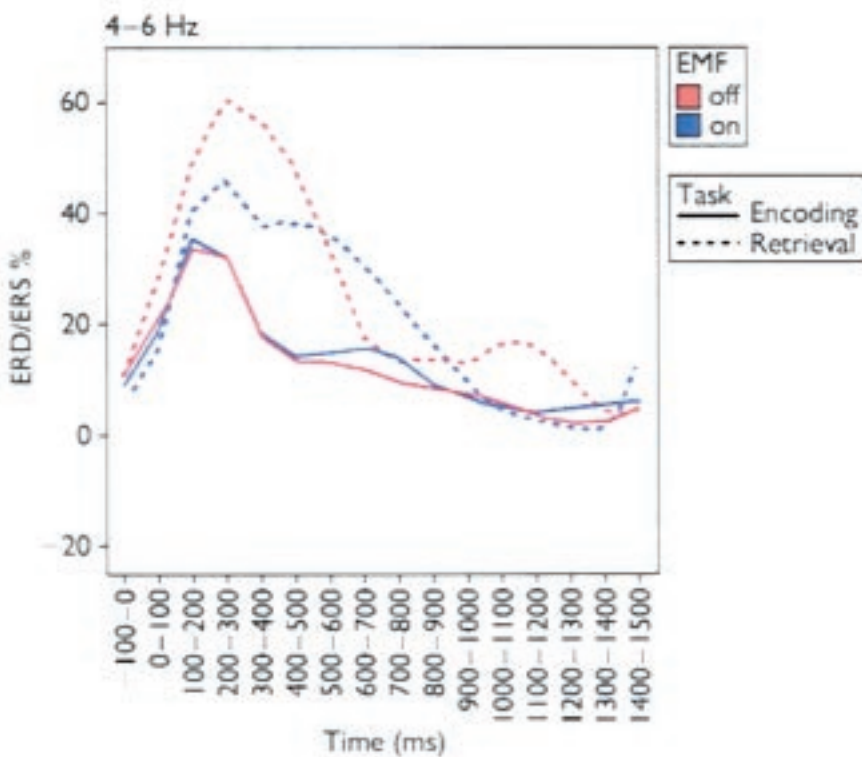
tion im Bereich der Messstellen empfindlich gestört werden können. Alle anderen verwendeten Geräte hatten keinerlei Einfluss auf das EEG der Probanden. Die Autoren schließen daraus, dass Aussendungen von Mobilfunkgeräten keine nachteiligen Effekte im menschlichen Gehirn bewirken.

1997 haben Spittler et al. 52 Testpersonen den Strahlungen eines GSM-900 Mobiltelefons, Pulsfrequenz 217 Hz ausgesetzt. Die 52 Testpersonen dieses Versuchs wurden in zwei Gruppen eingeteilt. Personen der einen Gruppe wurden jeweils zehn Minuten dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, die Personen der anderen Gruppe nur scheinexponiert. Das Expositionsintervall lag zwischen zwei Intervallen je zehn Minuten, in denen das Feld ausgeschaltet war. Durch diese Versuchsstrategie war es möglich, sowohl individuelle Veränderungen bei Einzelpersonen als auch Unterschiede zwischen den Testpersonen zu erfassen. In dieser Versuchsanordnung konnten keine Veränderungen des EEG durch das Feld des GSM-Telefons festgestellt werden.

Zu anderen Ergebnissen kamen dagegen Thuroczy et al. im gleichen Jahr. Die Autoren führten an 76 Personen Zweikanal-EEG-Messungen durch und erfassten die Kopfseite, die dem elektromagnetischen Feld ausgesetzt war, getrennt von der Kopfseite, die unausgesetzt blieb. In dem Versuch wurde eine feste Sequenz von Expositionen und Scheinexpositionen eingehalten. Bei dieser Versuchsanordnung konnten Veränderungen in den Alphawellen des EEG nachgewiesen werden. Allerdings haben die Autoren nicht alle Befeldungs- und Scheinbefeldungsintervalle untereinander



Aus der Arbeit von Eulitz et al. (1998): Verlauf der spektralen Kurzzeit-Leistung bei Standard- ('frequent') und Zielreizen ('infrequent') im Frequenzbereich 19-31 Hz an zwei symmetrisch zur Kopf-Mittellinie ('left'/'right') liegenden Meßpunkten. Die Strahlungsquelle war auf der linken Seite positioniert. Bei den Zielreizen (Präsentation zum Zeitpunkt 0 ms) ist auf der Expositionsseite eine Unterschied in Abhängigkeit von der Exposition ('with PEMF'/'without PEMF') erkennbar, der ab 260 ms signifikant wird.



Aus der Arbeit von Krause et al. (2000): Verlauf der spektralen Kurzzeit-Leistung im Frequenzbereich 4-6 Hz bei Einprägung ('Encoding') und Erinnerung ('Retrieval') von Worten im Rahmen eines Gedächtnisexperimentes. Etwa ab 300 ms nach Wortpräsentation (zum Zeitpunkt 0 ms) unterscheidet sich das Spektrum in Abhängigkeit von der Exposition ('EMF on'/'EMF off').

verglichen. Auch sind in den Abbildungen sowohl Erhöhungen als auch Verminderungen in der Alphaaktivität zu erkennen. Doch gibt es keine einheitliche Veränderung der Alphawellen. Deshalb erscheint die Bewertung der Ergebnisse dieses Versuches als schwierig, da die genauen Bestimmungen über die Kontrollbedingungen nicht vorgelegt wurden.

Eine ähnliche EEG-basierte Kreuzstudie haben 1997 von Röschke und Mann veröffentlicht. Sie registrierten die EEGs von 34 Probanden ebenfalls mittels der Zweikanaltechnik. Die Probanden wurden in einer Zufallssequenz von Exposition und Scheinexposition dem elektromagnetischen Feld eines GSM-900 Mobiltelefon ausgesetzt. Jeder Durchlauf dauerte zehn Minuten, zwischen zwei Durchläufen lagen 30 Minuten Pause. Röschke und Mann konnten keine Veränderungen im EEG durch die elektromagnetische Felder feststellen.

Eine aufwendige Versuchsreihe führten Krafzyk et al. durch, die ihre Ergebnisse 1999 veröffentlichten. Sie entschieden sich für eine placebokontrollierte Kreuzstudie mit einer komplexen EEG-Messung über einen Zeitraum von dreieinhalb Stunden je Proband. Dabei wurden auch evozierte Potenziale und MAEP (medium latency evoked potentials) erfasst, sowie das P-300 Experiment durchgeführt. Bei diesem Experiment müssen die Testpersonen bestimmte Töne in einer Tonfolge erkennen. Als Quellen für das elektromagnetische Feld wurden Mobiltelefone nach dem GSM-900 und GSM-1800 Standard eingesetzt. Ihre Testpersonen, so schreiben sie in ihrer Auswertung, zeigten in den EEGs keine Einflüsse, die auf die angelegten elektromagnetischen Felder zurückgeführt werden konnten.

Es kann festgestellt werden, dass keine der durchgeführten Studien Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen GSM-Feldern und umfassenden Hirnfunktionen ergeben hatte. Für dieses Ergebnis spricht auch die Tatsache, dass die elektromagnetischen Signale eines GSM-Mobiltelefons bereits

durch das Kopfgewebe stark gedämpft werden. In einer Gewebetiefe von wenigen Zentimetern beträgt die Dämpfung eines GSM-900-Feldes mehr als 90 Prozent. Für ein GSM-1800-Feld ist die Dämpfung sogar noch größer. Deshalb können theoretisch nur die äußersten Hirnregionen vom elektromagnetischen Feld beeinflusst werden. Da das EEG im Wachzustand vom Thalamus gesteuert wird, der tief im Inneren des Gehirns liegt, ist schon auf Grund dieser natürlich gegebenen Lage eine Beeinflussung des EEGs durch elektromagnetische Felder von GSM-Mobiltelefonen sehr unwahrscheinlich. Die Eindringtiefe dieser Felder reicht bei weitem nicht aus, um Veränderungen hervorzurufen.

## **Einfluss elektromagnetischer Felder von GSM-Mobiltelefonen auf den Schlafverlauf**

Zwischen 1996 und 1999 wurden verschiedene Studien durchgeführt, mit denen festgestellt werden sollte, ob elektromagnetische Felder von GSM-Mobiltelefonen den menschlichen Schlaf beeinflussen können. Neben EEG-Messungen wurden hierbei durch Erfassung des Elektrokardiogramms (EKG), des Elektromyogramms (EMG) und des Elektroakulogramms (EOG) weitere physiologisch relevante Größen betrachtet, die für die Charakterisierung von Schlafphasen bedeutsam sind. Die Messungen wurden in den Versuchen kontinuierlich, während der ganzen Nacht, aufgezeichnet.

1996 haben Mann und Röschke Testpersonen einem GSM-Feld ausgesetzt, dessen Leistungsflussdichte abgeschätzt 0,05 mW/cm<sup>2</sup> betrug. Dieser Versuch fand unter Doppelblindbedingungen statt, wobei auch Scheinexpositionen durchgeführt wurden. Die Probanden mussten zur Anpassung an die ungewohnte Umgebung bereits die Nacht vor den Messungen im Schlaflabor verbringen. In der statistischen Auswertung (ANOVA = standard analysis of variance) wurde eine verkürzte Einschlafphase (reduced sleep onset latency)

und ein verringerter Anteil an REM-Schlaf festgestellt, wenn das elektromagnetische Feld eingeschaltet war. Das EEG des jeweiligen Probanden wurde im Anschluss an die Messungen für die einzelnen Schlafphasen getrennt ausgewertet. Außer einer signifikanten Erhöhung der EEG-Leistung während des REM-Schlafes waren keine Effekte festgestellt worden, die auf das elektromagnetische Feld zurückgeführt werden konnten.

Die Ergebnisse dieser Studien sorgten für erheblichen Diskussionsstoff. Doch muss darauf hingewiesen werden, dass die festgestellten Effekte sowohl auf das GSM-Trägersignal als auch auf die Modulationsfrequenz zurückgeführt werden können.

Im Jahr 1998 ergab eine Studie von Hinrichs et al., dass ein GSM-1800-Feld keine Auswirkungen auf die schlafrelevanten Parameter hat. In einer Doppelblindstudie haben sie ihre Probanden einem GSM-1800-Feld ausgesetzt. Die Antenne des Mobiltelefons befand sich dabei 1,4 Meter vom Kopf des jeweiligen Probanden entfernt. Diese Anordnung sollte die Verhältnisse in der Nähe einer vollaktiven Basisstation simulieren. Die Expositionen und Scheinexpositionen wurden in vier aufeinanderfolgenden Nächten durchgeführt. Eine Nacht zur Anpassung an die neue Schlafumgebung haben auch hier die Probanden vor dem Experiment in dem Labor verbracht.

Wagner et al. wollten 1998 in einer eigenen Studie die Ergebnisse der Mann-Studie aus dem Jahr 1996 wiederholen. Sie verminderten allerdings die Leistungsflussdichte von 0,05 mW/cm<sup>2</sup> auf 0,02 mW/cm<sup>2</sup>. Ihnen gelang es nicht, die Ergebnisse der Mann-Studie zu wiederholen, obwohl zumindest ein Trend der Parameter in diese Richtung erkennbar war.

Durch diese Ergebnisse lag die Vermutung nahe, dass eine Wirkung des GSM-Feldes von seiner Stärke abhängig sein könnte. Um diese Annahme weiter zu verfolgen, führte Röschke 1999 einen dritten

Versuch mit einem vergleichbaren experimentellen Aufbau, aber einer deutlich erhöhten Leistungsflussdichte von 0,2 mW/cm<sup>2</sup> durch. Seine Arbeitsgruppe näherte sich damit der Frage nach der Abhängigkeit der Ergebnisse von der Dosis des elektromagnetischen Feldes. Jedoch konnten auch in diesem Versuch keine Effekte festgestellt werden; selbst der von Wagner beschriebene Trend der Parameter war in diesem dritten Experiment nicht zu erkennen.

1999 haben Borbély et al. in ihrer placebokontrollierten Doppelblind-Kreuzstudie ihre Probanden einem 900 MHz GSM-Signal mit verschiedenen Modulationsfrequenzen ausgesetzt. Der Frequenzmix von 2, 8, 217 und 1736 Hz sollte in dieser Anordnung die gleichzeitige Aktivität einer Basisstation und eines Mobiltelefons simulieren. Eine Drei-Dipol-Antenne wurde nahe am Kopf der Testpersonen angebracht, um die Nahfeldsituation nachzustellen. Die spezifische Absorptionsrate (SAR) betrug etwa 1 W/kg. Im Experiment wurde während einer Nacht die jeweilige Grundlinie des Probanden aufgenommen, in der folgenden Nacht erfolgten die Messungen. Jeweils zwei dieser Sitzungen musste jeder Proband absolvieren. Exposition und Scheinexposition erfolgten auch hier zufällig.

In den Ergebnissen wurde während der Nicht-REM Schlafphasen eine erhöhte Aktivität im Alphaband (7-14 Hz) festgestellt. Besonders ausgeprägt war dieser Effekt in der ersten Nicht-REM Schlafphase. Des Weiteren wurde eine verkürzte Aufwachphase registriert. Die Autoren berichten, dass besonders diejenigen Testpersonen in der ersten Nacht häufiger aufwachten, die zuerst scheinxponiert wurden. Dieses Phänomen führen die Autoren eher auf die Tatsache zurück, dass die Probanden die Adaptionsnächte in einem anderen Raum als dem Versuchsraum verbracht haben, als auf die elektromagnetischen Felder, denen sie ausgesetzt wurden.

Bisher lieferten auch die gegensätzlichen Ergebnisse aus den Studien von

Mann, Wagner und Röschke keine eindeutigen Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen GSM-Feldern und dem Schlaf, obwohl die experimentellen Strategien der Studien vergleichbar sind. Ein dosisabhängiger Effekt könnte nur dann angenommen werden, wenn man von einer extrem nichtlinearen Beziehung zwischen Dosis und Effekt ausgeht. Auch bei der höchsten Leistungsflussdichte (0,02 mW/cm<sup>2</sup>) konnten keine Effekte nachgewiesen werden. Dies stimmt überein mit den Ergebnissen von Hinrichs et al. (1998) für das GSM-1800 Feld, obgleich Pulsfrequenz und Feldparameter (Nahfeld-Fernfeld) verschieden sind.

Lediglich Paschke et al. (1996) und Reite et al. (1994) stellten Ergebnisse vor, aus denen ein Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf den Schlaf abgeleitet werden kann. Das von ihnen eingesetzte Feld ist vom GSM-Feld der oben beschriebenen Studien jedoch stark verschieden. Denn diese Autoren behandelten Personen, die unter Schlafstörungen litten, mit einem komplex modulierten Hochfrequenzfeld von 27 MHz. In ihren Ergebnissen berichten Paschke und Reite über verkürzte Einschlafphasen und früher eintretende Tiefschlafphasen.

Auch die Ergebnisse von Borbély et al. (1999) lassen einen Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf den Schlaf vermuten. Jedoch muss bei ihren Ergebnissen darauf hingewiesen werden, dass die beschriebenen Effekte nur wegen der großen Abweichungen zwischen der ersten Scheinexposition und den folgenden Grundwert- und Expositionsmessungen signifikant waren. Auch könnten irreführende Ergebnisse dieses Versuchs dadurch zustande gekommen sein, dass die Probanden ihre Anpassungsnacht nicht im Messraum verbracht haben.

Borbély verwendete in seiner Studie sehr komplexe Pulssignale. Lyskov (1993) berichtete über EEG-Veränderungen durch ein 45 Hz-Feld. Das Feld alleine war für die Veränderungen jedoch nicht verantwortlich.

Lyskov konnte die EEG-Veränderungen nur dann beobachten, wenn das Feld wiederholt jede Sekunde ein- und ausgeschaltet wurde. Es ist daher nicht auszuschließen, dass Borbélys Ergebnisse ihre Ursache in der komplexen Signalstruktur haben. Eine Wiederholung der Borbélystudie unter standardisierten Bedingungen erscheint deshalb als sinnvoll und notwendig.

Es bleibt ein kleiner Rest von Unsicherheit solange die Ergebnisse der Borbélystudie nicht in einer Reproduktionsstudie widerlegt worden sind. Solange kann davon ausgegangen werden, dass es keine Wechselwirkungen zwischen GSM-Feldern und dem menschlichen Schlafverhalten gibt.

### **Einfluss von elektromagnetischen Felder der GSM-Mobiltelefone auf evozierte Potenziale (EP)**

Krafczyk et al. führten in ihrer Studie von 1998 (vgl. EEG) auch Untersuchungen mit evozierten Potenzialen durch. Sie haben ihre Probanden visuell mit einem Schachbrettmuster stimuliert, das sein Muster acht Mal pro Sekunde veränderte. Bei dieser Frequenz bewirkten sie eine anhaltende EEG-Veränderung. Allerdings veränderte sich das evozierte Potenzial nicht durch den Einfluss des magnetischen Feldes. Dieses nach der „ANOVA-Methode“ festgestellte Ergebnis war signifikant. Auch die leicht verzögerten evozierten Potenziale (medium latency evoked potentials (MAEP) wurden durch das GSM-Feld nicht beeinflusst.

1998 untersuchten Urban et al. 20 Testpersonen in einer Kreuzstudie. Sie setzten auch das von Krafczyk verwendete wechselnde Schachbrettmuster ein, um visuell Potenziale zu erzeugen. Die Frequenz des visuellen Reizes betrug 1,5 Hz, die Stimulation dauerte fünf Minuten. Es wurden Scheinexpositionen und Expositionen durchgeführt, als Feldquelle diente ein handelsübliches GSM-Mobiltelefon. Über Frequenz, Feldstärke und SAR-Werte ist nichts bekannt. Alle Aufzeichnung wurden nach

zwei Wochen wiederholt. Bemerkenswert ist, dass die Testpersonen nicht „verblendet“ waren und somit wussten, wann das Feld aktiv war. Signifikante Effekte konnten hier nicht beobachtet werden.

In den bislang durchgeführten Studien konnten somit keine Effekte von GSM-Feldern auch auf evozierte Potenziale festgestellt werden. Ein Einfluss von GSM-Feldern auf Hirntätigkeiten und -funktionen scheint daher im Moment ausgeschlossen. Einschränkend muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es für motor-sensorisch evozierte Potenziale bislang keine Ergebnisse gibt und die vorliegenden Studien um diesen Aspekt ergänzt werden müssen.

### **Kognitive Untersuchungen mit ereigniskoppelten Potenzialen (ERP) und ereigniskoppelten Desynchronisationen/ Synchronisationen (ERD/ERS)**

Ein weiterer Bestandteil von Krafczyks Studie aus dem Jahr 1998 waren Untersuchungen anhand des sogenannten P-300 Experiments. Bei diesem Versuch müssen die Probanden bestimmte Töne erkennen, die ab und zu unter eine feste Tonfolge gemischt werden. 300 Millisekunden nach dem entsprechenden Reiz kann im EEG die zugehörige Reaktion registriert werden. Auf der Grundlage der ANOVA-Auswertung konnte Krafczyk keine Abweichungen im EEG durch das GSM-Feld, weder in der Amplitude, noch im zeitlichen Verlauf, feststellen.

Freude et al. stellten in einer Untersuchung aus dem Jahr 1998 einen möglichen Einfluss von GSM-Feldern auf physiologische Prozesse fest. Sie untersuchten dabei das so genannte Bereitschaftspotenzial, das zum Beispiel unmittelbar vor einer freiwilligen Bewegung auftritt. Die Versuchspersonen mussten in der Doppelblindstudie zwei Aufgaben lösen:

- eine Maustaste in selbstgewählten Zeitabständen drücken (einfache Aufgabe) und

- eine sich im Uhrzeigersinn bewegendes Markierung beobachten und per Mausclick nach drei Umdrehungen exakt auf der 12.00 Uhr Position anhalten (komplexe Aufgabe).

Während des Experiments wurde ein Multikanal-EEG aufgezeichnet. Das elektromagnetische Feld war entweder an- oder abgeschaltet. Das elektromagnetische Feld wurde drei oder fünf Minuten eingeschaltet. Die EEGs, die während der einfachen Aufgabe aufgezeichnet wurden, veränderten sich durch das GSM-Feld nicht. Die EEGs, die während der komplexen Aufgabe erfasst wurden, zeigten dagegen ein anderes Ergebnis. An einigen Messstellen wurde ein kleiner, aber noch signifikanter Rückgang der Amplituden festgestellt. Überraschenderweise trat dieser Effekt besonders an den Stellen des Kopfes auf, die gegenüber dem Expositionsbereich lagen. Ob diese Effekte auf Veränderungen in der kortikalen Reizbarkeit zurückzuführen sind, wie sie Adey 1979 beschrieben hat, wurde von den Autoren in Betracht gezogen. Jedoch kann diese Annahme nicht überprüft werden, da die Beziehungen zwischen Vorgängen auf Zellebene und dem EEG an der Kopfoberfläche nicht hinreichend bekannt sind.

Eulitz et al. führten 1998 eine Studie mit kombinierten ERP- und ERD/ERS-Untersuchungen durch. Auch in diesem Versuch wurde den Testpersonen eine Hör-aufgabe gestellt, die mit einer zweiten Aufgabe verknüpft war. Sobald sie in einer Abfolge von 1000 Hz-Tönen (Standardtöne) einen bestimmten Testton hörten, mussten sie so schnell wie möglich eine Taste drücken. Die zu erkennenden Töne traten zufällig verteilt auf. Die ereignisgekoppelten Potenziale aus den beiden Aufgaben (Ton erkennen, Taste drücken) und auch die ERD/ERS-Spektren wurden von den Autoren für jede Aufgabe getrennt ausgewertet. Auch die Reaktionszeiten und die Anzahl der richtigen und falschen Reaktionen wurden registriert. Zwei der insgesamt vier Experimente fanden in einem

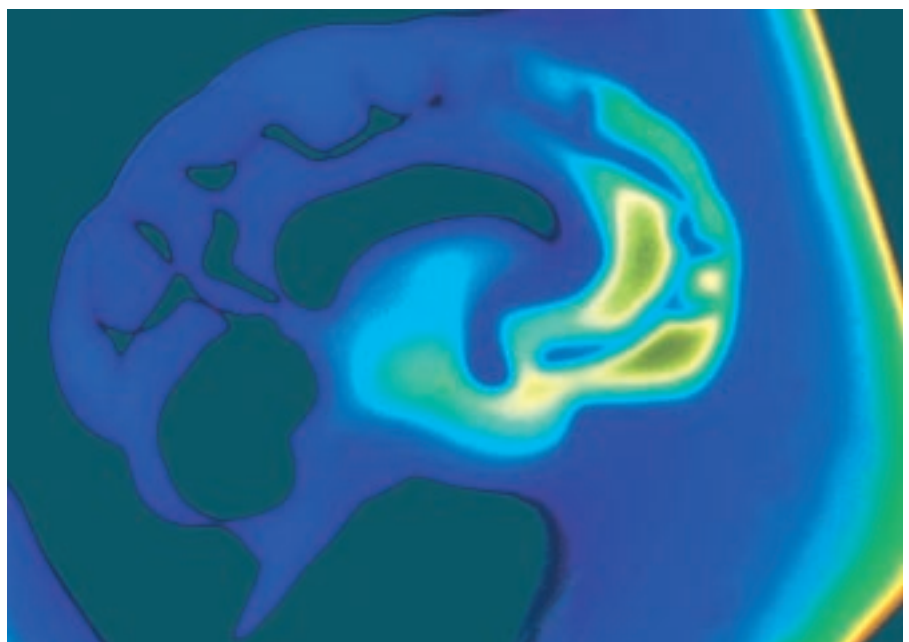
GSM-900-Feld statt; jeder Durchlauf dauerte 15 Minuten.

Die Auswertung der Messergebnisse nach dem ANOVA-Verfahren ergab signifikante Abweichungen für die ERD-Spektren, die unter Feldeinfluss aufgenommen wurden. Die Veränderungen wurden besonders an der Kopfseite beobachtet, die der Feldquelle zugewandt war. Sie lagen im Frequenzbereich zwischen 19 Hz und 31 Hz (Beta-Band) und traten mit einer Verzögerung von 260 bis 380 Millisekunden auf. Wenn die Probanden die Standardtöne hörten, waren keine Veränderungen feststellbar. Auch die Reaktionszeiten blieben durch das elektromagnetische Feld unbeeinflusst. Eulitz' Ergebnisse zeigen, dass das GSM-Feld das Hintergrund-EEG während der Bearbeitung von Aufgaben zwar beeinflusst, aber keine Auswirkungen auf ereignisgekoppelte Aktivitäten oder Verhaltensweisen hat.

In einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2000 haben Krause et al. den Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf das Gedächtnis untersucht. Die Testpersonen mussten Erinnerungsaufgaben lösen, während ein GSM-900 Mobiltelefon eingeschaltet war. In jedem Durchlauf des Experiments wurden den Testpersonen über Kopfhörer insgesamt 92 Blöcke mit jeweils

fünf Verben vorgelesen. Die Testpersonen mussten erkennen, ob das letzte Wort eines Blocks auch unter den vier ersten Worten des vorangegangenen Blocks war. Die einzelnen Entscheidungen mussten über einen Druckknopf mitgeteilt werden. Während der Versuche wurde ein Multikanal-EEG aufgezeichnet. Die Auswertung ergab Veränderungen in der ERD/ERS im unteren Frequenzbereich der Alphawellen (8-10 Hz). Eine differenzierte Analyse des Zeitintervalls, in dem die Worte präsentiert wurden und der Phase, in der die Worterkennung abläuft zeigte, dass es EMF-gekoppelte Veränderungen in der ERD/ERS gibt. Diese Veränderungen betreffen das Thetaband (4-8 Hz) und das Alphaband (8-12 Hz). Höhere Frequenzbänder wurden nicht überprüft. Der Anteil der richtigen Antworten zwischen den einzelnen Versuchsbedingungen war vergleichbar. Die ereignisgekoppelten Potenziale (ERP) wiesen keine Unterschiede auf.

Krause et al. begrenzten ihre Untersuchungen auf Veränderungen in den unteren Bändern des EEGs, bis etwa 12 Hz. Eulitz et al. stellten Veränderungen im Betaband, also dem Bereich zwischen 12,5 Hz und 30 Hz fest. Die Ergebnisse dieser Studien können daher nicht miteinander verglichen werden.



Die Effekte, die Eulitz et al. und Freude et al. feststellten, traten vorzugsweise in einer Hemisphäre auf, was in der Krause-Studie nicht der Fall war. In einer neueren Studie, die noch nicht veröffentlicht ist, konnten Krause et al. ihre Ergebnisse jedoch bestätigen.

Nach den hier vorgestellten Ergebnissen der unterschiedlichsten Studien gibt es zur Zeit keinen Grund zur Annahme, dass elektromagnetische Felder systematisch auf die elektrischen Signale im Gehirn, die durch Reizverarbeitungen hervorgerufen werden, einwirken. Zwar mag, folgt man den Veränderungen in der ERD/ERS, die spezifische cortikale Region während der Reizverarbeitung durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden, dennoch gibt es weder im Frequenzband, noch im Verhältnis der exponierten Hemisphäre zu der Hemisphäre, in der die Effekte auftraten, Übereinstimmungen.

Zufallseffekte können jedoch nur durch weitere Untersuchungen eindeutig ausgeschlossen werden. Die beobachteten Effekte waren aufgetreten, wenn den Testpersonen komplexe Aufgaben zu lösen hatten. Bei diesen Aufgaben waren mehrere Gehirnbereiche beteiligt. Ausgehend von dieser Annahme könnten elektromagnetische Felder entweder die Kommunikation zwischen den beteiligten Gehirnregionen, oder die geistigen Fähigkeiten, die zur Lösung einer Aufgabe gefordert sind, beeinflussen.

Aufgaben mit allmählich ansteigendem Schwierigkeitsgrad könnten für die Klärung dieser Frage neue Erkenntnisse bringen. Auch die Tatsache, dass die eingesetzten elektromagnetischen Felder aufgrund der Gewebedämpfung nur die obersten Hirnregionen erreichen, sollte mit solchen Aufgaben in neuen Experimenten ausgenutzt werden, die besonders diese peripheren Regionen ansprechen. Alle beobachteten Effekte liegen jedoch innerhalb

der Variationsbreiten, die auch von anderen Einflüssen erwartet werden, die Potenziale verändern. Dazu gehört der Konsum von Drogen, die auf das zentrale Nervensystem wirken, ebenso wie eine nachlassende Wachsamkeit oder auch die circadiane Rhythmik. Ein Gesundheitsrisiko kann von den bisher festgestellten Effekten nicht abgeleitet werden.

## Zusammenfassung

Trotz der teilweise widersprüchlichen Ergebnisse hat keine der vorgestellten Studien eine Abhängigkeit zwischen EEG-Struktur und der Exposition in elektromagnetischen Feldern aufgezeigt. Deshalb ist die Hypothese, dass elektromagnetische Felder keine Einflüsse auf das EEG im Wachzustand auslösen, ist sehr wahrscheinlich.

Für das EEG im Schlaf weisen drei der fünf Studien keine Anhaltspunkte für einen Einfluss des GSM-Feldes auf den Schlaf nach. Dennoch sollte nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass GSM-Felder geringe Auswirkungen auf den Schlaf haben könnten.

Für den Bereich der evozierten Potenziale kann eine Wechselwirkung mit GSM-Feldern ausgeschlossen werden. Alle Studien bestätigten insofern die aufgestellte Null-Hypothese.

Lediglich bei komplexen Aufgaben konnten Feldeffekte auf die ERD/ERS festgestellt werden. Möglicherweise kann spekuliert werden, dass gepulste Hochfrequenzfelder die intracortikale Kommunikation, die durch hochfrequente Gehirnströme getragen wird, stört, oder geistige Kapazitäten vermindert.

*Hermann Wygoda arbeitet als Wissenschaftsjournalist und hat in diesem Artikel eine Studie von Prof. Dr. Hermann Hinrichs, Universität Magdeburg, zusammengefasst.*