

Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfre- quenten elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen

Abschlussbericht

**erstellt im Auftrag des
Bundesamtes für Strahlenschutz**

Dezember 2007

erstellt unter der Projektleitung von

**Prof. Dr. rer. nat. Heidi Danker-Hopfe und
Dr.-Ing. Hans Dorn**

Interdisziplinäre Schlafmedizin
Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Campus Benjamin Franklin
Eschenallee 3, 14050 Berlin
Tel.: +49 30 8445 8600 / 8601/ 8613
Fax.: +49 30 8445 8233
E-Mail: heidi.danker-hopfe@charite.de
hans.dorn@charite.de

unter Mitwirkung von

Dr. Cornelia Sauter

Charité – Universitätsmedizin Berlin
Campus Benjamin Franklin
Eschenallee 3, 14050 Berlin
Tel.: +49 30 8445 8634
Fax.: +49 30 8445 8233
E-Mail: cornelia.sauter@charite.de

Dr. - Ing. Achim Bahr und Dipl. Ing. Thomas Bolz

Institut für Mobil- und Satellitentechnik IMST GmbH
Carl-Friedrich-Gauss Str. 2
47475 Kamp Lintfort
Tel.: +49 2842 981 100
Fax: +49 2842 981 199
E-Mail: achim.bahr@imst.de
thomas.bolz@imst.de



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.

Danksagung:

Unser Dank gilt all denen, die zum Gelingen des Projekts beigetragen haben:

- den **31 Probanden**, die sich der Mühe unterzogen haben, über einen Zeitraum von 20 Wochen zuverlässig einmal pro Woche zur Datenerhebung in unser Labor zu kommen.
- den **Mitarbeitern des Labors für Klinische Psychophysiologie** (zu dem das Schlaflabor gehört): Dr.rer.nat. Ansgar Bach und Dipl.-Phys. Oliver Berndt, die als wissenschaftliche Mitarbeiter das Projekt betreut haben, Dr. med. Marie-Luise Hansen und Dr. med. Anita Peter, die für das sorgfältige Probandenscreening zuständig waren, Dr.med. Peter Schlattmann, der an der Planung der Studie aus statistischer Sicht beteiligt war und der als unabhängiger Statistiker das Design für die zufallsbedingte Expositionszuordnung entwickelt hat sowie Martina Grosch, Michaela Noack, Grit Renner, Andrea Schmidt und Kathrin Schulze, die als medizinisch-technische Angestellte das Projekt betreut haben. Alle Mitarbeiter haben mit großem Engagement und persönlicher Flexibilität zur hohen Datenqualität und zügigen Durchführung der Datenerhebung beigetragen.
- den **studentischen Mitarbeitern**: Timur Cetin, Benjamin Drüner, Philip Sander, Antje Syllwasschy und Lilija Zeitler, von denen die Probanden in der Nacht zuverlässig betreut wurden. Auch sie zeichneten sich durch eine große Flexibilität und Bereitschaft zur Übernahme von Verantwortung aus.
- den **Mitarbeitern der IMST GmbH**, 47475 Kamp Lintfort: Dr. Achim Bahr und Dipl.-Ing. Thomas Bolz, für die Entwicklung und Betreuung der Expositionsanlage.
- der **Forschungsgemeinschaft Funk e.V.**, Rathausgasse 11a, 53111 Bonn: Dr. Gerd Friedrich für die leihweise Überlassung eines für biologische Studien entwickelten UMTS-Signalgenerators.
- **Prof. Dr. Peter Anderer** von der Medizinischen Universität Wien für seine Unterstützung bei der Spindel- und Powerspektralanalyse.
- **Prof. Dr. med. Malek Bajbouj**, Klinik und Hochschulambulanz für Psychiatrie und Psychotherapie, Charité – Universitätsmedizin Berlin, für die Unterstützung bei der Auswertung der am Tag erhobenen psychophysiologischen Daten.
- **Frau PD Dr. Blanka Pophof** vom Bundesamt für Strahlenschutz, die uns in der Betreuung des Projekts stets eine fachkompetente Ansprechpartnerin war.
- den **Diplomanden**, die mit Daten aus dem Projekt ihre Diplomarbeit im Fach Biologie (**Timur Cetin**, **Almut Heinken**) bzw. ihre medizinische Doktorarbeit (**Axel Jakuscheit**) angefertigt haben bzw. anfertigen.

Inhaltsverzeichnis

I	Zusammenfassung	9
II	Einleitung	15
A	Literaturübersicht	16
A 1	Einleitung	16
A 2	Reviews zu biologischen Effekten elektromagnetischer Felder	17
A 2.1	Reviews von interdisziplinären Expertengruppen	17
A 2.2	Reviews von Einzelexperten bzw. kleineren Expertengruppen	22
A 3	Bewertung biologischer Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem in Reviews	28
A 4	Originalarbeiten zu biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem	32
A 4.1	Das spontane Wach EEG	33
A 4.2	Evozierte Potentiale (EP), ereigniskorrelierte Potentiale (ERP) sowie ereigniskorrelierte Desynchronisation / Synchronisation des EEG (ERD/ERS)	39
A 4.3	Kognitive Funktionen	46
A 4.4	Schlaf	55
A 4.5	Regionaler Blutfluss (rCBF) in <i>in vivo</i> PET Studien	61
A 5	Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem in nationalen und internationalen Forschungsprogrammen	62
A 5.1	Das <i>International EMF Project</i> der WHO	63
A 5.2	EMF-Forschungsförderung auf europäischer Ebene	64
A 5.3	Forschungsförderung durch das Bundesamt für Strahlenschutz	65
A 5.4	Forschungsförderung durch die Forschungsgemeinschaft Funk e.V.	66
A 6	Biologische Effekte und gesundheitliche Relevanz	67
A-0	Update zur Literaturübersicht.....	69
A-0 1	Originalarbeiten zu biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem	69
A-0 1.1	Update Spontanes Wach-EEG	69
A-0 1.2	Update Evozierte Potentiale (EP) und Ereigniskorrelierte Potentiale (ERP)	71
A-0 1.3	Update Kognitive Funktionen.....	74
A-0 1.4	Update Schlaf	80

B	Beschreibung der Studie	84
B 1	Ziele der Studie und Begründung	84
B 2	Design der Studie	85
B 3	Probanden	89
B 3.1	Ein- und Ausschlusskriterien.....	89
B 3.2	Probandenrekrutierung	89
B 4	Exposition	93
B 4.1	Auswahl eines geeigneten Laborraums.....	93
B 4.1.1	Gegenstand der Untersuchung (Messprotokoll 13.04.04 IMST GmbH)	93
B 4.1.2	Messung	93
B 4.1.2.1	Messgeräte	93
B 4.1.2.2	NF-Messung (5 Hz - 30 kHz)	93
B 4.1.2.3	HF-Messung (100 kHz – 3 GHz).....	94
B 4.1.3	Messergebnisse.....	94
B 4.1.3.1	Raum 1136	94
B 4.1.3.2	Raum 1139	94
B 4.2	Vorbereitung des Laborraums	95
B 4.3	Ablauf der Studie	96
B 4.4	Technische Details der Expositionseinrichtung (Bericht der Fa. IMST).....	96
B 4.4.1	Einleitung und Problemdarstellung	97
B 4.4.2	Aufbau der Expositionseinrichtung	98
B 4.4.3	Beschreibung der Testsignale	99
B 4.4.4	Charakterisierung der Expositionseinrichtung	101
B 4.4.4.1	Objekt der Untersuchung	101
B 4.4.4.2	Normung zum Personenschutz in der Hochfrequenztechnik.....	101
B 4.4.4.2.1	Unterscheidung der Art der Exposition, Expositionszeiten und Frequenzen	102
B 4.4.4.2.2	Basisgrenzwerte und abgeleitete Grenzwerte	102
B 4.4.4.2.3	Übersicht über die für Mobiltelefone gültigen Basisgrenzwerte	104
B 4.4.4.3	Das dosimetrische Messsystem DASY4.....	104
B 4.4.4.4	Messverfahren	105
B 4.4.4.5	Unsicherheitsbewertung	106

B 4.4.4.6	Messaufbau	107
B 4.4.4.7	Positionierung der Dualband-Antenne am SAM-Phantom	107
B 4.4.4.8	SAR-Messergebnisse	108
B 4.4.5	Programm zur Steuerung der Expositionseinrichtung	109
B 4.4.5.1	Struktur des Programmfensters	110
B 4.4.5.2	Eingabe der Expositionsdaten	110
B 4.4.5.3	Start und Überwachung der Exposition	111
B 4.4.5.4	Verzeichnisstruktur	112
B 4.4.6	Literatur (Bericht der Fa. IMST)	117
B 4.4.7	Anhang (Bericht der Fa. IMST)	118
B 4.4.7.1	GSM (900 MHz)	118
B 4.4.7.2	UMTS (1966,5 MHz)	119
B 4.5	Maßnahmen zur Sicherung der Datenqualität bei EEG-Ableitung unter Exposition	120
B 4.6	Überprüfung der Polygraphie-Aufzeichnungen auf Störungen durch die Exposition	121
B 5	Methodik der Datenerhebung	125
B 5.1	Untersuchungen während des Screenings	125
B 5.1.1	Stufe 1: Telefoninterview	125
B 5.1.2	Stufen 2 und 3: Fragebögen	125
B 5.1.3	Stufe 4: Screeninguntersuchung	128
B 5.1.4	Stufe 5: EEG- und polygraphische Aufzeichnungen in der Nacht und am Tag	129
B 5.2	Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren während der Studie	132
B 5.3	Psychophysiologische Experimente im Laufe der Studie	133
B 5.3.1	Ruhe- EEG	133
B 5.3.2	Alpha-Attenuation Test (AAT)	133
B 5.3.3	Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) und langsame Hirnpotentiale	133
B 5.3.3.1	Contingent Negative Variation (CNV)	134
B 5.3.3.2	Bereitschaftspotential (BP)	135
B 5.3.3.3	DC-Potential und Visuelle Folgereaktion (VMT)	136
B 5.3.4	Evozierte Potentiale (EP)	136
B 5.3.4.1	Akustisch evozierte Potentiale (AEP) - Wahlreaktion auf Töne	137

B 5.3.4.2	Akustisch evozierte Potentiale (AEP) – Oddball Paradigma	137
B 5.3.5	Pupillometrie (CIP 8.0, Fa. AMTech GmbH, Weinheim).....	138
B 5.4	Tests zur Objektivierung aufmerksamkeitsbezogener Prozesse	139
B 5.4.1	Daueraufmerksamkeitstest	140
B 5.4.2	Test zur geteilten Aufmerksamkeit.....	141
B 5.4.3	Vigilanztest.....	142
B 5.5	Test zum Arbeitsgedächtnis (WMT).....	142
B 6	Methodik der Datenauswertung	144
B 6.1	Auswertung der Schlafdaten.....	144
B 6.1.1	Visuelles Scoring nach Rechtschaffen und Kales (1968)	145
B 6.1.2	Automatische Auswertung mit dem Somnolyzer 24x7	145
B 6.1.3	Powerspektralanalyse mit Somnolyzer 24x7	147
B 6.1.4	Automatische Auswertung von Spindeln mit dem Somnolyzer 24 x 7.....	147
B 6.2	Auswertung der am Tag erhobenen psychophysiologischen Daten.....	149
B 6.2.1	Auswertung des Ruhe-EEGs	149
B 6.2.2	Auswertung des Alpha-Attenuation Test (AAT)	149
B 6.2.3	Auswertung der Ereigniskorrelierten Potentiale.....	150
B 6.2.3.1	Auswertung der psychometrischen Testergebnisse vom Modul Contingent Negative Variation (CNV)	153
B 6.2.3.2	Auswertung der psychometrischen Testergebnisse bei der Visuellen Folgereaktion (VMT)	153
B 6.2.4	Auswertung der Evozierten Potentiale.....	153
B 6.2.4.1	Auswertung der Akustisch Evozierten Potentiale (AEP)- Wahlreaktion auf Töne	153
B 6.2.4.2	Auswertung der Akustisch Evozierten Potentiale (AEP)- Oddball Paradigma.....	154
B 6.2.5	Auswertung der Pupillometrie	154
B 6.3	Auswertung der Leistungstests.....	155
B 6.3.1	Auswertung der Selektiven Aufmerksamkeit – Daueraufmerksamkeitstest	155
B 6.3.2	Auswertung des Tests zur Geteilten Aufmerksamkeit	156
B 6.3.3	Auswertung des Vigilanztests	156
B 6.3.4	Auswertung des Tests zum Arbeitsgedächtnis (WMT).....	157
B 7	Statistische Auswertung der Daten	158

C	Ergebnisse zum Schlaf	159
C 1	Charakterisierung des Schlafes der Probanden unter Sham-Bedingungen – Vergleich mit altersspezifischen Normdaten.....	159
C 2	Ergebnisse auf der Basis visuell ausgewerteter Schlafaufzeichnungen.....	160
C 3	Ergebnisse auf der Basis automatisch ausgewerteter Schlafaufzeichnungen	162
C 4	Ergebnisse der Auswertung der Powerspektralwerte	168
C 5	Ergebnisse der Spindelanalyse	173
D	Ergebnisse zum Tag	178
D 1	Ergebnisse der psychophysiologischen Experimente im Laufe der Studie	178
D 1.1	Ergebnisse zum Ruhe-EEG.....	178
D 1.2	Ergebnisse zum Alpha-Attenuation Test (AAT).....	183
D 1.3	Ergebnisse zu Ereigniskorrelierten Potentialen und langsamen Hirnpotentialen	184
D 1.3.1	Ergebnisse zur Contingent Negative Variation (CNV)	184
D 1.3.1.1	Ergebnisse zur Reaktionszeit als Leistungsparameter in der CNV	184
D 1.3.1.2	Ergebnisse zum EEG-Parameter in der CNV	186
D 1.3.2	Ergebnisse zum Bereitschaftspotential (BP).....	189
D 1.3.3	Ergebnisse zu DC-Potential und Visueller Folgereaktion (VMT)	192
D 1.3.3.1	Ergebnisse zur Winkelabweichung als Leistungsparameter in der VMT	192
D 1.3.3.2	Ergebnisse zum EEG-Parameter (Langsame Potentiale, VMT).....	193
D 1.4	Ergebnisse zu den evozierten Potentialen	196
D 1.4.1	Ergebnisse zu den Akustisch Evozierten Potentialen (AEP)- Wahlreaktion auf Töne....	196
D 1.4.2	Ergebnisse zu den akustisch evozierten Potentialen (AEP) – Oddball Paradigma	198
D 1.4.2.1	Ergebnisse zu den Leistungsparametern der AEP– Oddball Paradigma	198
D 1.4.2.2	Ergebnisse zu den EEG-Parametern der AEP– Oddball Paradigma	199
D 1.5	Ergebnisse zur Pupillometrie	203
D 2	Ergebnisse der Tests zur Objektivierung aufmerksamkeitsbezogener Prozesse.....	205
D 2.1	Ergebnisse des Tests Selektive Aufmerksamkeit – Daueraufmerksamkeitstest	205
D 2.2	Ergebnisse des Tests Geteilte Aufmerksamkeit	209
D 2.3	Ergebnisse des Vigilanztests.....	212
D 2.4	Ergebnisse des Tests zum Arbeitsgedächtnis (WMT).....	215
E	Literatur	220

I Zusammenfassung

In der vorliegenden doppelblinden cross-over Studie wurden mögliche Effekte von elektromagnetischen Feldern, wie sie von GSM900 und UMTS Handys ausgehen, auf den Schlaf sowie auf das EEG und die Leistung am Tage untersucht.

Die Stichprobe setzte sich aus 30 männlichen gesunden Probanden im Alter zwischen 18-30 Jahren (MW: 25.3 ± 2.6 SD) zusammen. Nach einer Adaptationsnacht im Schlaflabor, die zur Gewöhnung an die Untersuchungsbedingungen und zum Ausschluss von Schlafstörungen diente, folgten im Abstand von jeweils zwei Wochen insgesamt neun Testnächte, in denen der Schlaf für die Dauer von 8 Stunden randomisiert in einem balancierten Design je dreimal unter drei verschiedenen Expositionsbedingungen (Scheinexposition, GSM 900 MHz und UMTS 2000 MHz) abgeleitet wurde. Modelliert wurden Signale, wie sie beim Gebrauch von Mobiltelefonen mit maximaler Sendeleistung auftreten. Die Sendeleistung wurde so eingestellt, dass die gesetzlich zulässigen Expositions-Grenzwerte für die Normalbevölkerung (Teilkörper SAR-Werte von 2 W/kg über 10 g gemittelt) erreicht, aber nicht überschritten wurden. Im Gegensatz zu vielen anderen Studien wurde während der gesamten Labornacht kontinuierlich exponiert. Die Exposition während des Nachtschlafs erfolgte, um mögliche Effekte elektromagnetischer Felder bei kontinuierlicher Langzeitexposition (8h) auf das ZNS in einem Zustand zu untersuchen, bei dem intrinsische und extrinsische Faktoren (z.B. Motivation, Persönlichkeit, Einstellungen) weitestgehend ausgeschlossen werden können bzw. kontrolliert sind.

Eine Woche nach der Adaptationsnacht erfolgte ein Testdurchgang für die Tagestestungen (Wach-EEG, Alpha-Attenuation Test, ereigniskorrelierte Potentiale und langsame Hirnpotentiale, evozierte Potentiale, Tests zur Messung aufmerksamkeitsbezogener Prozesse, Test zum Arbeitsgedächtnis). Der Abstand zwischen den insgesamt 9 Tagestestungen entsprach ebenfalls jeweils zwei Wochen (abwechselnd mit den Labornächten). Wie bei den Labornächten fanden die Tagestestungen randomisiert je dreimal unter drei verschiedenen Expositionsbedingungen statt.

Eine detaillierte Analyse der Makrostruktur des Schlafs erbrachte signifikante Unterschiede zwischen der Exposition mit GSM900 und der Scheinbedingung in verschiedenen Bereichen, die die Dauer des REM-Schlafs betrafen. Eine statistisch signifikante Zunahme von REM-Schlaf Parametern war zum Teil mit einer Abnahme entsprechender NREM2-Schlaf Parameter assoziiert. Zusätzlich kam es zu einer Abnahme des NREM1 Stadiums (3.2 Minuten weniger als in der Scheinbedingung) und einer Verringerung der Anzahl der Stadienwechsel vom Tiefschlaf zu NREM1, d.h. Veränderungen, welche für leichte physiologische Adaptationseffekte sprechen und die offenbar konsolidierend auf den Schlaf wirken. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen kein Indiz dafür, dass eine Exposition mit GSM900 zu Störungen des Schlafs führt. Unter UMTS war ein Teil der Variablen, die unter GSM900 verändert waren, ebenfalls statistisch signifikant: es kam zu einer Zunahme der Dauer der REM-Zyklen (um 1.3 Minuten), zu einer Abnahme der Dauer der NREM-Zyklen (um 2.5 Minuten), und zu einer Abnahme verschiedener NREM1 Parameter unter Exposition. Erneut zeigte sich allerdings kein Hinweis darauf, dass die Exposition den Schlaf stört. Zusammenfassend sind die gefundenen „Effekte“ bezüglich der Makrostruktur des Schlafs mit Vorsicht zu interpretieren, da: 1) die meisten der statistisch signifikanten

Parameter voneinander abhängig sind (REM-Schlaf Parameter unter GSM900, NREM1-Schlaf Parameter unter UMTS), 2) die Anzahl der statistisch signifikanten Ergebnisse nicht (UMTS) oder nur unwesentlich (GSM900) die Zahl der bei multiplen Testungen als rein zufällig zu erwartenden Signifikanzen überschreiten und 3) die Ergebnisse für GSM900 nicht mit jenen übereinstimmen, die von anderen Studien berichtet wurden (für UMTS sind dies die ersten Ergebnisse überhaupt).

Die Analyse der Powerspektralwerte zeigte unter GSM900 für die Gesamtschlafzeit lediglich eine signifikante Zunahme von zwei Frequenzen des β -Frequenzbandes (21.0 Hz und 22.0 Hz). Eine Powerspektralanalyse der einzelnen Schlafstadien zeigte einen statistisch bedeutsamen Zuwachs an Power für die Frequenzen 6.5, 7.5 und 8.5 Hz während der Wachzeit, und für 1.5 – 2.5 Hz und 6.5 Hz während des NREM1-Schlafs. Signifikante Ergebnisse für den NREM2 Schlaf beschränkten sich auf das β -Frequenzband (18.0 – 24.0 Hz). Die Spektralwerte im REM- und im Tiefschlaf variierten nicht signifikant zwischen der GSM- und der Schein-Exposition. Unter UMTS-Exposition waren neun von 400 untersuchten Variablen signifikant verändert: 8.5 bis 9.5 Hz für Stadium Wach, 5 vereinzelte Frequenzen des NREM1 Schlafs (2.0, 6.0 6.5, 8.0, and 15.5 Hz) und eine Frequenz (7.5 Hz), wenn NREM1 und NREM2 als Leichtschlaf zusammengefasst werden. Insgesamt müssen bei der Bewertung dieser Ergebnisse der Powerspektralanalyse die zuvor auch bei der Makrostruktur genannten Einschränkungen berücksichtigt werden.

Sowohl unter GSM- als auch unter UMTS- Exposition ließen sich in der Mikrostruktur bei einzelnen Variablen der Spindelanalyse statistisch signifikante Unterschiede im Vergleich zur Schein-Exposition erkennen, deren Anzahl lag aber deutlich unter der, die zufallsbedingt zu erwarten ist. Es zeigten sich keine systematischen Veränderungen in der Anzahl, der Dauer, der Dichte und der Amplitude in Parametern, welche die Spindelaktivität im gesamten NREM-Schlaf, im NREM2-Schlaf und im Tiefschlaf charakterisieren.

In der Mehrzahl der Leistungsparameter aus den Tagestestungen (Contingent Negative Variation, Visuelle Folgereaktion, Akustisch Evozierte Potentiale, Daueraufmerksamkeitstest, Geteilte Aufmerksamkeit, Vigilanztest, n-back Task) zeigten sich keine Einflüsse von GSM900 und UMTS. Die geringe Anzahl signifikanter Ergebnisse (fünf von 39 unter GSM; zwei von 39 unter UMTS) spricht überwiegend für eine Verbesserung der Reaktionszeiten unter GSM900. Die Genauigkeit der Testbearbeitung veränderte sich in keinem einzigen Test.

Wesentlich deutlicher als Expositionseffekte zeigten sich Auswirkungen des Tageszeitpunkts auf die Leistung in sämtlichen Tests, mit besseren Leistungen am Nachmittag. In der Pupillometrie war am Nachmittag eine signifikant höhere Aktivierung zu beobachten, die zu einer besseren Leistung geführt haben dürfte. Bei einer der drei Ableitungen langsamer ereigniskorrelierter Potentiale (Contingent Negative Variation) und bei der P300 des akustisch evozierten Potentials Oddball Paradigma in der GSM900-Bedingung wirkte sich der Testzeitpunkt auf die Höhe der Amplituden aus.

Ganz besonders deutlich wurde die Notwendigkeit der Kontrolle des Testzeitpunkts bei der Analyse des Wach-EEGs und des Alpha-Attenuation Tests. Hier zeigten sich weder unter GSM noch unter UMTS mehr Effekte als per Zufall erwartet worden wären, dafür aber erneut unter beiden

Bedingungen signifikante Tageszeiteffekte, die sich in einer höheren Alpha-Power am Nachmittag widerspiegelten, was mit den zuvor genannten Befunden überein stimmt.

Die Ergebnisse der hier präsentierten Studie unterstreichen die Wichtigkeit der Kontrolle des Tageszeitpunktes und der Standardisierung des Tagesablaufs einschließlich der Mahlzeiten bei der Untersuchung von Expositionseffekten. Das Fehlen ausreichender Standardisierung könnte zu mangelnder Übereinstimmung der Ergebnisse früherer Studien beigetragen haben.

Die Aussagen der vorliegenden Studie sind nur begrenzt gültig, da ausschließlich junge, gesunde Männer untersucht wurden. Bei Frauen, älteren Menschen und Personen, die an Schlafstörungen leiden, könnten sich elektromagnetische Felder von Mobilfunktelefonen unter Umständen in anderer Art und Weise auswirken.

I Summary

The present double-blind cross-over study investigates possible effects of electromagnetic fields emitted by GSM900 and UMTS cell phones on sleep as well as EEG and daytime function.

The sample comprises 30 healthy male subjects within the age range 18-30 years (mean \pm SD: 25.3 \pm 2.6 years). An adaptation night, which served as screening night for sleep disorders and as an adjustment night to the lab environment was followed by nine study nights (separated by a two weeks interval) in which subjects were exposed for 8 hours during time in bed to three exposure conditions (Sham, GSM900 and UMTS). Each exposure was applied three times and exposure conditions were randomly assigned in a balanced order. A cell phone use at maximum RF output power was simulated, the transmitted power was adjusted in order to approach, but not to exceed the SAR limits of the law (localised SAR = 2.0 W/kg – averaged over 10g). In contrast to most other studies exposure was applied during the whole time subjects spent in bed. In this study possible effects of long-term (8 hrs) continuous RF exposure on the CNS were analysed during sleep, since sleep is a state in which many confounding intrinsic and extrinsic factors (e.g. motivation, personality, attitude) are eliminated or controlled.

The week succeeding the adaptation night subjects underwent a test session for all daytime assessments (Wake EEG, Alpha-Attenuation Test, event related potentials and slow potentials, evoked potentials, tests of attention, working memory task). At intervals of two weeks (alternating with the study nights spent in the lab) daytime assessments were performed. As for the study nights each exposure was applied three times in a randomly assigned and balanced order.

A very detailed analysis of the macrostructure of sleep revealed that various aspects of REM sleep duration under GSM900 exposure were significantly different from the sham condition. The statistically significant increase of REM sleep parameters was to some extent associated with corresponding decreases in NREM2 sleep parameters. Furthermore a decrease of NREM1 sleep (3.2 min less than during the sham condition) and a reduced number of stage shifts from slow wave sleep to NREM1 sleep was observed, changes which are indicative of slight physiological adaptations, which overall seem to consolidate sleep. From the present results there is no evidence for a sleep disturbing effect of GSM900 exposure. For UMTS some of the variables which vary with GSM900 exposure are also statistically significant: increased duration of REM cycles (1.3 min), decreased duration of NREM cycles (2.5 min), and decrease of various NREM1 sleep parameters under exposure. Again there is no evidence for a sleep disturbing effect of RF exposure. Overall the observed “effects” on the macrostructure of sleep have to be considered with caution, because: 1) most of the parameters showing statistically significant results are dependent (REM sleep parameters under GSM900 exposure, NREM1 sleep parameters under UMTS exposure), 2) the number of statistically significant results does not (UMTS) or not noteworthy (GSM900) exceed the number expected just by chance considering the multiple testing situation, and 3) the results for GSM900 do not correspond to those from other studies (for UMTS these are the first results).

Analyses of power spectra of the sleep EEG revealed that with regard to sleep period time the only difference observed for GSM900 exposure was an increase for two frequencies out of the β -frequency range (21.0 Hz and 22.0 Hz). A stage specific approach showed that power spectra were significantly increased for frequency bands 6.5, 7.5 and 8.5 Hz during wake, and for 1.5 – 2.5 Hz and 6.5 Hz during NREM1 sleep. Effects seen during NREM2 sleep are restricted to the β -frequency range (18.0 – 24.0 Hz). No effects were seen for REM and slow wave sleep. With regard to UMTS exposure nine out of 400 tested variables showed significant changes: for wake 8.5 to 9.5 Hz, five sporadic frequencies in NREM1 sleep (2.0, 6.0, 6.5, 8.0, and 15.5 Hz), and one frequency (7.5 Hz) when NREM1 and NREM2 sleep are combined as light sleep. Overall the observed variations in spectral power have to be evaluated taking into consideration the same limitations as mentioned for the macrostructure of sleep.

A very detailed analysis of the microstructure “spindles” led to some sporadic statistically significant differences under GSM900- and/or UMTS exposure. However, the number of statistically significant results was far below the number expected just by chance considering the multiple testing situation. Furthermore there were no systematic changes concerning number, duration, density, frequency and amplitude of spindles in total NREM sleep, in NREM2 sleep and in slow wave sleep.

With regard to daytime performance it can be summarised that most of the test parameters (Contingent Negative Variation, Visual Monitoring Task, Auditory Evoked Potentials, Continuous Performance Test, Divided Attention Test, Vigilance Test, n-back Task) were neither affected by GSM900 exposure nor by UMTS exposure. The small number of statistically significant results (five out of 39 for GSM900; two out of 39 for UMTS), which is again below the number expected just by chance, predominantly reflect a reduced reaction time under RF exposure. In none of the tests accuracy of performance was affected.

For all tests effects of time of the day were much more pronounced than effects of RF exposure. Performance was better during the afternoon testing session. Results of pupillography are indicative of a higher activation level of the CNS in the afternoon, which might explain the better performance at this time of the day in this sample. One out of the three investigated slow event related potentials (Contingent Negative Variation) and the auditory evoked potential component P300 of the oddball paradigm (only GSM900 exposure) showed an amplitude variation with time of day.

The necessity to control time of the day was particularly evident in the results for the waking EEG and the Alpha-Attenuation Test. Alpha power showed a statistically significant time of the day effect with higher levels in the afternoon, which is in good agreement with the observations mentioned above. Neither for GSM900 nor for UMTS exposure the number of significant results exceeded the one expected just by chance.

The results of the present study underline the necessity to control for time of the day and to standardise not only the test situation but also the daily routine including meals in studies of RF effects. The absence of standardisation may have contributed to the lack of consistence in previous studies.

A limitation of the study is that only healthy young males were investigated. Females, elderly or a priori sleep disturbed subjects might be more vulnerable to possible RF effects.

II Einleitung

Im Jahr 2002 wurde vom *Bundesamt für Strahlenschutz*, einer organisatorisch selbständigen wissenschaftlich – technischen Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) initiiert. Das DMF dient dazu, die Forschung hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern, die z.B. in der Umgebung von Sendeanlagen wie Funktürme und Mobilfunk-Basisstationen oder beim Gebrauch von mobilen Endgeräten (Handys) auftreten, zu intensivieren und zu koordinieren.

Die komplexe Thematik wird in vier Bereiche untergliedert: Biologie (22), Dosimetrie (15), Epidemiologie (8) und Risikokommunikation (7) in denen insgesamt 52 Projekte gefördert werden. Das von uns bearbeitete biologische Forschungsprojekt *Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen* wurde zum 1. Oktober 2003 an unsere Arbeitsgruppe vergeben. Die Laufzeit des Projekts betrug zunächst drei Jahre, wurde aber um sechs Monate verlängert.

Der vorliegende Abschlussbericht ist in fünf Abschnitte gegliedert. Abschnitt A enthält die Literaturübersicht, die im Jahr 2004 im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) als Teilleistung in diesem Projekt erbracht wurde und als pdf-Datei zum Download auf der Homepage des BfS (http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie_verg_/bio_080.html) abrufbar ist (Danker-Hopfe und Dorn 2004a). Eine Zusammenfassung der Literatur zu experimentellen Studien, in denen Schlaf als Zielparameter untersucht wurde, findet sich auch bei Danker-Hopfe und Dorn (2004b, 2005a). Für den vorliegenden Abschlussbericht wurde die Literaturübersicht (2004a) um einige aktuelle Originalarbeiten zum Einfluss elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf den Schlaf (Hinrichs et al. 2005; Loughran et al. 2005; Fritzer et al. 2007; Hung et al., 2007) sowie auf die Gehirnfunktion am Tag (Papageorgiou et al., 2004, 2006; Curcio et al., 2005; Hinrichs und Heinze, 2006; Vecchio et al., 2007; Maby et al., 2005, 2006; Sievert et al., 2005; Hamblin et al., 2006; Yuasa et al., 2006; Ferreri et al., 2006; Krause et al., 2007) und auf kognitive Funktionen (Curcio et al., 2004; Haarala et al., 2004; Hinrichs & Heinze, 2004; Maier et al., 2004; Besset et al., 2005; Schmid et al., 2005; Eliyahu et al., 2006; Hinrichs & Heinze, 2006; Keetley et al., 2006; Regel et al., 2006; Russo et al., 2006; Wilen et al., 2006; Cinel et al., 2007; Haarala et al., 2007; Regel et al., 2007) ergänzt (Abschnitt A-0).

Im Abschnitt B des Abschlussberichts werden die Ziele der Studie, die Hypothesen, das Design der Studie, die Expositionseinrichtung, die Probandenauswahl sowie die im Rahmen der Studie verwendeten Verfahren (Fragebögen, apparative und kognitive Tests) dargestellt, wobei das Kapitel B.4.4, in dem die Expositionseinrichtung spezifiziert ist, ein Beitrag der Kollegen Bahr und Bolz von der IMST GmbH ist.

Der Abschnitt C enthält alle Ergebnisse hinsichtlich des untersuchten möglichen Zusammenhangs zwischen einer GSM900 bzw. einer UMTS-Exposition und Schlaf.

In Kapitel D werden die Ergebnisse einer möglichen Auswirkung der elektromagnetischen Felder auf die Gehirnfunktion am Tag beschrieben und diskutiert.

Im letzten Abschnitt (E) werden die Ergebnisse des Projekts zusammengefasst.

A Literaturübersicht

A 1 Einleitung

Seit des beträchtlichen Aufschwungs der Mobilfunktechnologie in den 90er Jahren sind die biologischen Auswirkungen elektromagnetischer Felder zunehmend ein aktuelles Thema öffentlicher und wissenschaftlicher Diskussionen. Hierbei wird dem funktechnisch genutzten Teil des elektromagnetischen Spektrums - Hochfrequenz im Bereich von 10 kHz bis gegenwärtig ca. 300 GHz – großes Interesse entgegengebracht. Beim Mobiltelefon kommen davon z. Zt. nur eng begrenzte Frequenzbänder zum Einsatz: D-Netz bei 900 und 950 MHz sowie E-Netz von 1700 bis 1900 MHz. Die im Aufbau befindlichen UMTS-Netze nutzen Frequenzen um 2 GHz. Aufgrund der Modulation enthalten die Mobilfunksignale auch niederfrequente Anteile (z.B. 3 Hz, 8 Hz und 217 Hz bei GSM im D- und E-Netz). Der anstehende Aufbau des UMTS-Netzes hat noch einmal verstärkt zur Dynamik der Diskussion um biologische Effekte und gesundheitliche Risiken beigetragen.

Exposition durch EMF verschiedenster Quellen ist für die Mehrheit der Bevölkerung allgegenwärtig. Hinsichtlich des Mobilfunks ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den von Mobilfunk-Basisstationen ausgehenden elektromagnetischen Feldern und der Exposition, die aus dem Gebrauch von Mobiltelefonen resultiert. Die Expositionen beim Gebrauch von Mobiltelefonen (selbst oder durch Personen in der Nähe) sind infolge der physikalischen und geometrischen Bedingungen normalerweise viel stärker als die durch Mobilfunk-Basisstationen verursachten Expositionen. Allerdings sind letztere durchgehend präsent und variieren nur in gewissem Grade durch die schwankende Auslastung der Basisstationen im Tagesverlauf, während mobile Telefonate in unmittelbarer Nähe jedes einzelnen Menschen meist nur einen geringen zeitlichen Anteil des Tages ausmachen.

Das Medium Mobilfunk ist verglichen mit anderen Hochfrequenzquellen noch relativ jung. Aufgrund der weiten Verbreitung dieser Technologie ist das öffentliche Interesse an möglichen biologischen Auswirkungen sehr groß und hat kontroverse Diskussionen ausgelöst. Letztendlich schlichten lassen sich Kontroversen nur durch sachliche Aufklärung, zu der u.a. Ergebnisse von Studien beitragen, die wissenschaftlichen Standards entsprechen.

A 2 Reviews zu biologischen Effekten elektromagnetischer Felder

Untersuchungen zu biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder umfassen im Wesentlichen vier Bereiche:

- Epidemiologische Studien
- Experimentelle Humanstudien / Probandenstudien
- Tierexperimentelle Studien
- *In vitro*-Studien auf zellulärer und molekularer Ebene

Es gibt mittlerweile eine Reihe von Reviews bzw. Metastudien von interdisziplinär zusammengesetzten Expertengruppen bzw. einzelnen Experten oder kleineren Expertengruppen, die neuere, unter Qualitätsaspekten ausgewählte wissenschaftliche Publikationen berücksichtigen. Da in der in Auftrag gegebenen Studie Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf das Zentrale Nervensystem beim Menschen im Hinblick auf den Schlaf, das Wach-EEG und kognitive Funktionen untersucht werden sollen, sind im Folgenden Zitate aus einigen der Reviews wiedergegeben, welche eine zusammenfassende - jeweils zum Zeitpunkt der Publikation aktuelle - Einschätzung der biologischen Effekte bzw. Gesundheitsrisiken (zu einer Unterscheidung biologischer Effekte und gesundheitlicher Risiken siehe Kap. A 6) in diesem Bereich durch die Experten bzw. den festgestellten Forschungsbedarf widerspiegeln.

A 2.1 Reviews von interdisziplinären Expertengruppen

Publikationen interdisziplinär zusammengesetzter Expertengruppen auf nationaler und internationaler Ebene aus den letzten 5 Jahren sind im Anhang in Tab. 1 zusammengestellt. Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Ein von der Royal Society of Canada in Auftrag gegebener Review aus dem Jahr 1999 kommt zu dem Schluss: *These results on the influence of MW/RF fields on sleep architecture are provocative and interesting, but are in conflict with animal studies showing a significant increase in slow wave activity sleep. Because of the lack of consistency in the results of these various studies, no conclusions could be drawn; accordingly, this topic needs further investigation* (The Royal Society of Canada 1999, S. 99).

Tab. 1 Übersicht über einige Metastudien und Reviews zu biologischen Auswirkungen / gesundheitlichen Risiken von elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkbereich von *interdisziplinär zusammengesetzten Expertengruppen*.

Jahr / M	Autor(en)	Titel
1999	The Royal Society of Canada	A Review of the Potential Health Risks of Radiofrequency Fields from Wireless Telecommunication Devices
2000 / 4	Independent Expert Group on Mobile Phones, IEGMP („Stewart Report“) von der britischen Regierung in Auftrag gegebener Bericht	Mobile Phones and Health
2000 / 6	Health Council of the Netherlands	GSM base stations
2001 / 1	„Zmirou report“ Rapport au Directeur Général de la Santé	Les téléphones mobiles, leurs stations de base et la santé.
2001 / 9	Strahlenschutzkommission (SSK)	Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern.
2001 / 10	CSTEE (EU) Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment	Possible effects of electromagnetic fields (EMF), radio frequency fields (RF) and Microwave radiation on human health
2002 / 9	CSTEE (EU) Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment	Effects of electromagnetic fields on health
2002/ 12	CSTEE (EU) Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment	Effects of electromagnetic fields on health
2002 / 1	Health Council of the Netherlands	Mobile telephones. An evaluation of health effects
2003 / 2	Health Council the Netherlands Ergänzung zum Report 2002 / 1	Health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Recommendations for research
2004 / 1	Health Council of the Netherlands	Electromagnetic fields: Annual update 2003
2003 / 4	AFSSE Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale	Avis de l'AFSSE sur la téléphonie mobile
2003 / 12	Statens strålskyddsinstitut (SSI) Independent Expert Group on Electromagnetic Fields	Recent research on mobile telephony and cancer and other selected biological effects: First annual report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields
2003	National Radiological Protection Board (NRPB)	Health effects from radiofrequency electromagnetic fields

Ebenfalls im Jahr 1999 wurde im Auftrag der britischen Regierung eine unabhängige Expertengruppe, die *Independent Expert Group on Mobile Phones* (IEGMP) gegründet, die sich unter dem Vorsitz von Sir William Stewart mit dem Thema *Mobile Phones and Health* („Stewart Report“) auseinandergesetzt und ihren Bericht im Jahr 2000 vorgelegt hat. Die zum Einfluss auf die Gehirnfunktion des Menschen bis zum Jahr 2000 vorliegenden Ergebnisse fasst die IEGMP wie folgt zusammen: *Together, the findings of Preece et al.(1999) and Koivisto et al.(2000, in press) from human laboratory studies of the acute effects of exposure to mobile phone signals suggest that exposure to mobile phone signals at exposure levels that fall within existing exposure guidelines have biological effects that are of sufficient magnitude to influence behaviour. The causal mechanism is unclear, but could include a small, localised heating effect* (Independent Expert Group on Mobile Phones 2000, S. 85). Bezüglich nicht krebsbezogener Endpunkte in epidemiologischen Studien stellt die Kommission fest: *A substantial number of people report symptoms such as fatigue, headache and feelings of warmth behind the ear that occur during or shortly after the use of mobile phones. However, it is unclear to what extent, if any, these symptoms are caused by RF radiation* (Independent Expert Group on Mobile Phones 2000, S. 99). Die IEGMP fordert, dass u.a. Effekte auf Gehirnfunktionen sowie epidemiologische Studien mit hoher Priorität durchgeführt werden sollten.

Ein vom Health Council of the Netherlands im Jahr 2000 speziell zu Basisstationen publizierter Review fasst die vorliegenden Studien zum Einfluss auf die Gehirnfunktion wie folgt zusammen: *The results indicate that exposure to the relatively high field strength of mobile phones (which may be 50 to 100 times higher than the field strength in homes in the vicinity of base stations) can affect brain activity during sleeping cycle* (2000, S. 22). Bezüglich kognitiver Funktionen kommt das Gremium zu dem Schluss: *„ ... a direct effect of exposure to radiofrequency electromagnetic waves on cognitive functions cannot be excluded but ... the effects observed until now are slight and reversible. In the Committee’s view more well-designed studies are needed to ascertain the nature and size of these effects“* (Health Council of the Netherlands 2000, S. 23).

Im Jahr 2002 wurde vom Health Council of the Netherlands ein entsprechender Review zu Mobiltelefonen publiziert. Darin heisst es zusammenfassend für kognitive Funktionen: *„the available scientific data does not indicate an adverse effect on cognitive abilities even in people who make frequent use of mobile telephones. The Committee recommends to conduct research in the Netherlands on the influence of electromagnetic fields on cognitive functions“* (Health Council of the Netherlands 2002, S. 11). Im Hinblick auf die Gehirnfunktion stellt das Gremium fest: *Several studies have shown that exposure to a GSM signal during sleep exerts effects on natural brain activity. However, the Committee concludes that the data on this are equivocal. No correlation has been observed with increasing field strength. It is nevertheless striking that, in one of the studies, changes in brain activity during sleep were following exposure prior to falling asleep“* (Health Council of the Netherlands 2002, S. 12). Diesen Beobachtungen wird jedoch keine gesundheitliche Relevanz beigemessen. Für die nicht schlafbezogenen Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Gehirnfunktionen stellt das Gremium fest, dass bestimmte Gehirnfunktionen beeinflusst sein können: *This influence is present in those parts of the brain closest*

to the telephone and concerns extremely small changes that are only detectable with sensitive equipment. There is no evidence that the changes recorded persist beyond the period of exposure. No effect has been found on the performance of assigned tasks, nor on the health of the persons tested. The Committee recommends to study whether individuals with existing brain disorders, such as sleep disturbances, are more vulnerable to electromagnetic-field exposure than healthy individuals. It also considers it important to study physiological background of the effects on natural brain activity of exposure to a GSM signal during or immediately preceding sleep“ (Health Council of the Netherlands 2002, S. 12). Basierend auf dem Report aus dem Jahr 2002 wurden vom Health Council of the Netherlands im Jahr 2003 (Health Council of the Netherlands 2003) Empfehlungen für die weitere Forschung veröffentlicht. Für den Bereich experimenteller Studien am Menschen werden Untersuchungen zu subjektiven Beschwerden favorisiert, sofern die Effekte einer Objektivierung zugänglich sind. Ein im Januar 2004 veröffentlichtes „jährliches“ Update für das Jahr 2003, das den Zeitraum Mai 2001 bis Mai 2003 umfasst, beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit neueren Daten zu Effekten von Niederfrequenzfeldern und Hochfrequenzfeldern sowie zu nichtspezifischen Symptomen, deren Auftreten manchmal einer EMF-Exposition zugeschrieben wird. In dem Update finden sich hinsichtlich elektromagnetischer Felder im Radiofrequenzbereich keine neueren Ergebnisse aus experimentellen Humanstudien (Health Council of the Netherlands 2004).

Ein vom französischen Gesundheitsministerium in Auftrag gegebener Report, der „Zmirou Report“ kommt u.a. zu dem Schluss: „*Scientific data indicate, with relative certainty, that, during exposure to RF from a mobile phone, a variety of biological effects occur (eg. Electroencephalogram profile, reaction time, etc.) at energy levels that do not cause any local increase in temperature. However, in the current state of knowledge of these **non-thermal effects**, it is not yet possible to determine whether they represent a health hazard*“ (Zmirou Report 2001, S. 2).

Die Strahlenschutzkommission bewertet die zum Zielparameter *Elektroenzephalogramm beim Menschen* vorliegenden Ergebnisse wie folgt: „*Es kann zusammengefasst werden, dass die bisherigen Studien nicht im Ergebnis übereinstimmen, aber dennoch Hinweise auf expositionsbedingte Änderungen neurophysiologischer Prozesse geben*“ (Strahlenschutzkommission 2001, Seite 32).

Das Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment (CSTEE) der Europäischen Union wurde im Jahr 1999 ersucht, neuere Erkenntnisse zu biologischen bzw. gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Hinblick auf Empfehlungen für Expositionsgrenzwerte einzuschätzen. Die Berichte dazu datieren vom Oktober 2001 sowie September und Dezember 2002. Bezüglich des Nervensystems kommt das CSTEE (2001, S. 6) zu folgender Einschätzung: „*In the absence of heating, evidence for changes in neuronal excitability, neurotransmitter function and innate and learned behaviour, and for changes in the blood-brain barrier has been inconsistent and unconvincing. Some studies have suggested an effect on membrane protein, and on the flux of calcium and other ions across the membrane of neurons and EEG rhythms but these are not reproducible*“.

Im Herbst 2002 wurde in Frankreich die *Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale* (AFSSE) gegründet und damit beauftragt, ein Expertengremium zu bilden, dessen Aufgabe es sein sollte, den "Zmirou-Report" aus dem Jahr 2001 zu aktualisieren. Der Bericht wurde im April 2003 vorgelegt. Bezüglich der Mobiltelefone kommen die Experten zu der Einschätzung, dass zwar verschiedene biologische bzw. physiologische Wirkungen, darunter Veränderungen des EEG und von Reaktionszeiten beobachtet werden konnten, dass diese jedoch nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht als gefährlich eingestuft werden können: *"Divers effets biologiques ou physiologiques associés à l'exposition aux ondes des téléphones mobiles (modification du profil de l'électro-encéphalogramme, raccourcissement des délais de réaction à certains tests etc.) sont bien avérés, mais ces effets, modérés et transitoires même dans les conditions d'exposition maximale aux rayonnement émis par les téléphones mobiles, ne peuvent être considérés comme nocifs en l'état actuel des connaissances"* (AFSSE 2003, S. 8). Die Kommission sieht u.a. verstärkten Forschungsbedarf im 1800-MHz Bereich sowie im Bereich subjektiver Beschwerden, wobei es absolut notwendig ist, ein doppelblindes Expositionsdesign einzuhalten.

Die schwedische Strahlenschutzbehörde (Statens strålskyddsinstitut, SSI) hat im Jahr 2002 eine international zusammengesetzte unabhängige Expertengruppe eingesetzt, die sich mit dem Thema elektromagnetische Felder und Gesundheit beschäftigen soll. Diese Kommission hat im Herbst 2002 ihre Arbeit aufgenommen und im Dezember 2003 ihren ersten Jahresbericht vorgelegt (SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields 2003). Dieser Jahresbericht ist schwerpunktmäßig den Themen epidemiologische und experimentelle Studien zum Krebsgeschehen, Blut-Hirn-Schranke, Hitzeschockproteine und Vorsorgemaßnahmen gewidmet. Da Auswirkungen auf das Zentrale Nervensystem nicht näher behandelt werden, wird hier auf eine detailliertere Darstellung dieses Reports verzichtet.

Basierend auf dem Bericht der IEGMP aus dem Jahr 2000, wurde die britische Strahlenschutzbehörde (*National Radiological Protection Board*, NRPB) von der Regierung aufgefordert, die von IEGMP erstellte Literaturübersicht zu aktualisieren. Der entsprechende Bericht wurde 2003 vorgelegt. Die zum Thema Gehirnaktivität und kognitive Funktionen vorliegende neuere Literatur wird darin wie folgt zusammengefasst: *„The findings from the studies published since the completion of the IEGMP report on effects of RF signals on human brain activity and cognitive functions are inconsistent. In the case of EEG studies, both negative and positive results have been reported. The studies finding positive effects of electromagnetic field exposure are inconsistent regarding which features of the EEG pattern are affected. Moreover, the mechanism by which electromagnetic fields might influence EEG patterns remains unclear“* (National Radiological Protection Board 2003, S. 97/98). Für kognitive Funktionen gilt im wesentlichen die gleiche Aussage: *„Overall, no single, clear effect of RF exposure on cognitive function can be identified“* (National Radiological Protection Board 2003, S. 98). Insgesamt wird aus den widersprüchlichen Ergebnissen der Bedarf nach weiteren Studien zu diesem Themenbereich abgeleitet, wobei die besondere Bedeutung internationaler Kooperationen herausgestellt wird, um Studienergebnisse aus methodischer Sicht vergleichbar zu machen.

A 2.2 Reviews von Einzelexperten bzw. kleineren Expertengruppen

Reviews einzelner Experten bzw. kleinerer Expertengruppen sind in Tab. 2 aufgelistet, auch diese Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Obwohl die von Tillmann und Busch (2000) vorgelegte Literaturübersicht vom Titel her sehr allgemein gehalten ist, stehen inhaltlich kanzerogene Effekte (in Tierversuchen) im Vordergrund. Das Thema *Beeinflussung funktioneller Parameter auf der Ebene des Verhaltens* wird zwar ebenfalls aufgegriffen, es wird jedoch lediglich auf der Basis von Tierexperimenten behandelt, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird. Die Autoren resümieren: *"Zur Zeit ist es unmöglich, auch die langfristige Unschädlichkeit von athermischen HF-EMF-Expositionen (und damit GSM) wissenschaftlich zu belegen, allerdings ergeben sich aus den bisher publizierten Untersuchungen auch keine zwingenden Hinweise für ein Gesundheitsrisiko des Menschen"* (Tillmann und Buschmann 2000, S. 21).

Im Jahr 2000 wurden vier Reviews zum Themenkreis *Mobilfunk und Gesundheit* publiziert, die von der T-Mobil in Auftrag gegeben wurden: Hennies et al. (2000), Silny (2000), Glaser (2000) und Benischke et al. (2000), die im Jahr 2002 von Wiedemann et al. noch einmal vergleichend diskutiert wurden.

Hennies et al. (2000) kommen in ihrer Analyse der in wissenschaftlichen Zeitschriften mit "peer-review-Verfahren" publizierten Ergebnisse, die auch tierexperimentelle Studien einschließt, im Hinblick auf das Zentrale Nervensystem und kognitive Funktionen zu dem Schluss: *"Einflüsse hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem sind für Intensitäten deutlich unter den geltenden Grenzwerten belegt. Messbare physiologische Veränderungen wurden für Intensitäten von 0.5 W/m^2 nachgewiesen. Beeinträchtigungen kognitiver Leistungen sind bei Tieren ab 2 W/m^2 belegt"* (Hennies et al. 2000, S. 37).

Glaser (2000) kommt für Untersuchungen an Probanden zu der Einschätzung, dass sich unter den Bedingungen der durchgeführten Experimente keine Hinweise auf eine gesundheitliche Beeinflussung - wenigstens im Kurzzeitexperiment - ergeben. *"Bemerkenswert erscheint jedoch, dass offenbar reversible Reaktionen des Gehirns auf die Einstrahlung dieser Felder nicht auszuschließen sind. Obgleich die vorliegenden Resultate nicht reproduziert sind, und somit nicht als abgesichert betrachtet werden dürfen, weisen sie doch auf einige Reaktionen hin. Diese Reaktionen sind reversibel und gehören in die Kategorie von alltäglichen Antworten auf verschiedene gewollte und ungewollte Umwelteinflüsse. Im Zusammenhang mit unserer völligen Unkenntnis möglicher Mechanismen der Wirkung derart schwacher HF-Felder verdienen die Ergebnisse jedoch Beachtung"* (Glaser 2000, S. 11). Glaser schlussfolgert aus seiner Analyse: *"Wenn diese Veränderungen auch im Bereich alltäglicher Schwankungen und Auslenkungen liegen, vergleichbar solchen, die z.B. durch plötzliche Geräusche, optische Signale etc. ausgelöst werden oder durch alltägliche pharmakologische Beeinflussungen (z.B. durch Coffein), so weisen sie doch, falls sie sich reproduzierbar bestätigen ließen, auf bisher unbekannte biophysikalische Mechanismen der Wechselwirkung der Felder mit dem biologischen System hin. Wenn diese Befunde auch die oben getroffene Aussage bezüglich gesundheitlicher*

Irrelevanz nicht in Frage stellen, so ist es dennoch erforderlich, diesen Phänomenen nachzugehen und die ihnen zugrundeliegenden Mechanismen und Bezüge zu klären" (Glaser 2000, S. 66).

Tab. 2 Übersicht über einige Metastudien und Reviews zu biologischen Auswirkungen / gesundheitlichen Risiken von elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkbereich von *einzelnen Experten bzw. kleineren Expertengruppen*.

Jahr / M	Autor(en)	Titel
2000	Tillmann und Busch	Literaturstudie und Schlussfolgerungen zu möglichen Langzeitwirkungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder insbesondere des Mobilfunks (GSM)
2000 / 4	Hennies, Neitzke und Voigt ECOLOG - Institut	Mobilfunk und Gesundheit. Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes.
2000 / 7	Silny (FEMU, Forschungszentrum für Elektromagnetische Umweltverträglichkeit)	Gesundheitliche Auswirkungen der Mikrowellen von Mobilfunkanlagen im D-Netz
2000 / 10	Glaser Humboldt Universität Berlin	Darstellung und Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks in Relation zu bestehenden Empfehlungen und Normen.
2000 / 12	Benischke, Bunke, Küppers und Wassilew-Reul Öko-Institut	Gutachten zum Erkenntnisstand zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks.
2001 / 3	Hyland	The physiological and environmental effects of non-ionizing electromagnetic radiation.
2001	Hutter, Moshhammer, Wallner und Kundi	Zur Frage gesundheitlich relevanter Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks.
2002 / 3	Silny (FEMU, Forschungszentrum für Elektromagnetische Umweltverträglichkeit)	Effekte und gesundheitsrelevante Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks und anderer neuer Kommunikationssysteme.

Tab. 2 Übersicht über einige Metastudien und Reviews zu biologischen Auswirkungen / gesundheitlichen Risiken von elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkbereich von *einzelnen Experten bzw. kleineren Expertengruppen. Fortsetzung.*

Jahr / M	Autor(en)	Titel
2002 / 3	VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik	Positionspapier Mobilfunk und Gesundheit
2002 / 5	IEE Institution of Electrical Engineers	The possible harmful biological effects of low level electromagnetic fields of frequencies up to 300 GHz
2002 / 6	NLGA Niedersächsisches Landesgesundheitsamt	Gesundheitliche Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die Bevölkerung Niedersachsens
2002 / 9	Wiedemann, Schütz und Thalmann Forschungszentrum Jülich GmbH	Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog
2003	Neitzke, Osterhoff and Voigt	Biologische Wirkungen schwacher HF-Felder und Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition durch Funksendeanlagen.
2003	Röösli und Rapp	Hochfrequente Strahlung und Gesundheit

Benischke et al. (2000), die ebenfalls im Auftrag von T-Mobil ein Gutachten zum Erkenntnisstand zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks erstellt haben, fassen ihre Bewertung der Ergebnisse zur Gehirnfunktion wie folgt zusammen: *"Die gefundenen Ergebnisse lassen sich nicht zu einem einheitlichen Bild zusammenfügen. Einige Arbeitsgruppen finden Effekte, andere Arbeitsgruppen dagegen nicht. Die Untersuchungen wurden an gesunden Erwachsenen durchgeführt. Eine Aussage über andere Personengruppen kann aufgrund der bislang durchgeführten Untersuchungen nicht belastbar abgeleitet werden"* (Benischke et al. 2000, S. 39). Zur Bewertung der Auswirkung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkfrequenzbereich auf den Schlaf haben die Autoren des Gutachtens drei bis zu dem Zeitpunkt veröffentlichte Arbeiten herangezogen, zwei aus einem Mainzer Schlaflabor (Mann und Röschke 1996, Wagner et al. 1998) und die erste Arbeit zu diesem Thema aus einer Züricher Arbeitsgruppe (Borbély et al. 1999). *"Es wurden in zwei der drei Arbeiten signifikante Veränderungen im EEG der schlafenden Testpersonen, sowie Veränderungen in der Schlafarchitektur festgestellt. Unterschiedlich sind die Ergebnisse hinsichtlich der Schlafphasen, in denen die EEG-Veränderungen ermittelt wurden. Während in <Mann 1996> die REM-Phasen betroffen waren, zeigten sich in <Borbély 1999> EEG-Veränderungen nur in den Non-REM-Phasen. Über die möglichen gesundheitlichen Folgen der gefundenen Effekte und die Wirkungsmechanismen liegen noch keine gesicherten Erkenntnisse vor."* (Benischke et al. 2000, S. 43). Im Hinblick auf kognitive Fähigkeiten und das Lernverhalten kommen Benischke et al. (2000, S. 51/52) zu dem Schluss: *"Es gibt nur wenige Arbeiten, die im Hinblick auf kognitives Verhalten und Lernfähigkeit die derzeit relevanten Frequenzen des Mobilfunks untersuchen. Untersuchungen am Menschen zeigten bei mobilfunkrelevanten Frequenzbereichen (902 bzw. 915 MHz) Veränderungen der kognitiven Fähig-*

keiten in Form von Reaktionszeitverkürzungen. Über gesundheitliche Auswirkungen dieser Veränderungen werden in den Untersuchungen entweder keine Aussagen getroffen oder die Effekte werden als nicht schädlich und vorübergehend bezeichnet".

Silny (2000) Bewertung des Einflusses auf kognitive Funktionen basiert auf den Ergebnissen von drei Probandenstudien (Gehlen et al. 1996, Preece et al. 1999 und Koivisto et al. 2000): *"Die in zwei Studien übereinstimmend beobachtete Verkürzung der Reaktionszeit könnte auf den ersten Blick nicht als Beeinträchtigung, sondern vielmehr als Verbesserung der Leistungsfähigkeit des ZNS gedeutet werden. Solange aber die Wirkungsmechanismen dieser Effekte nicht geklärt sind, ist eine derartige Zuweisung nicht zulässig. Die Klärung der postulierten Effekte auf die kognitiven Funktionen des Zentralnervensystems muss ernsthaft beachtet und in weiteren gut kontrollierten Studien verifiziert oder falsifiziert werden"* (Silny 2000, S. 56). Bezüglich des Endpunktes Schlaf stellt Silny (2000, S. 59/60), der zusätzlich zu den drei von Benischke et al. (2000) ausgewerteten Studien noch eine Arbeit von Fritzer et al. (2000) berücksichtigt, den Bedarf an weiteren Studien heraus: *"Einige Untersuchungsergebnisse könnten durchweg als eine positive Einflussnahme der Mikrowellen auf den Schlaf gedeutet werden. Allerdings können die berichteten Untersuchungsergebnisse bei einer einzigen Replikation eigener Untersuchungen (Wagner et al., 1998) nicht bestätigt werden. Wegen der Bedeutung des Schlafes für die körperliche und psychische Regeneration einerseits und der Langzeit-Exposition des Menschen durch die Felder der Basisstationen andererseits sind weitere klärende Untersuchungen angezeigt"*. Auch im Hinblick auf eine Beeinflussung des EEG durch hochfrequente elektromagnetische Felder sieht Silny (2000, S. 63) weiteren Forschungsbedarf: *"Das spontane EEG des Menschen im Wachzustand wird als unspezifisch für die Beurteilung einer Einflussnahme oder krankhaften Veränderung im Zentralnervensystem eingestuft. Unterschiedliche Vigilanz-Stufen, Lidschlag etc. verändern maßgeblich, häufig nur temporär, die zeitlichen Verläufe des EEG. Die Spektralanalyse mittelt die Frequenzinhalte über ein bestimmtes Intervall, wodurch derartige Artefakte im Verlauf der Leistungsdichte markiert werden können. Die Spezifität und Sensitivität des EEG wird deutlich erhöht durch die EEG-Mittelung der Reiz- oder Verarbeitungsantworten. Einige Studien mit diesem Design haben eine schwache Beeinflussung Evozierter Potentiale (EP) durch die 2 W-GSM-Felder der Handys gezeigt. Inwieweit diese subtile Veränderung durch eine geringe Erwärmung mittels Mikrowellen zu Stande kommt, ist ungewiss. Die Bedeutung dieser Effekte für die Funktion des ZNS ist ebenfalls schwer einzuschätzen. Weitere Untersuchungen müssen diese Effekte erläutern, bevor in zugeschnittenen Experimenten deren Bedeutung und Wirkungsmechanismen nachgegangen werden kann"*.

Die vier im Auftrag der T-Mobil erstellten Gutachten wurden als Basis eines von der Programmgruppe Mensch Umwelt Technik (MUT) des Forschungszentrums Jülich organisierten und moderierten *Dialogs zwischen Wissenschaftlern* herangezogen. Ziel dieses Dialogs war es, Risikobewertungen zum Thema Mobilfunk und Gesundheit gemeinsam zu erörtern und zu überprüfen. Neben den Autoren der Gutachten wurden beratende Experten eingeladen, die zur Klärung inhaltlicher Fragen für die verschiedenen Themenfelder beitragen sollten. Im Vordergrund stand nicht die Erstellung eines Meta-Reviews. Vielmehr sollte aufgezeigt werden, wo zwischen Experten Konsens und Dissens

besteht, und die Ursachen der unterschiedlichen Bewertungen waren herauszuarbeiten. Die Subjektivität der Bewertung zeigte sich bereits bei der Auswahl der jeweils 100 relevantesten Publikationen durch die vier Auftragnehmer von T-Mobil. Unter den insgesamt 320 Arbeiten, die zumindest in einem der Gutachten zitiert wurden, waren nur 16 (5%), die von allen vier Gutachtern herangezogen wurden. Insgesamt 9% (29) wurden von jeweils drei der vier Gutachter zitiert, 13% (43) wurden von mindestens zwei Gutachtern angeführt und 73% (232) werden jeweils nur von einem Gutachter berücksichtigt. Die größte Übereinstimmung in den zitierten Arbeiten findet sich für das Themengebiet *Schlafverhalten / Schlaf-EEG*, gefolgt vom *Wach-EEG*, *Tierstudien zur Kanzerogenese* und *kognitive Leistungen (Mensch)*. Bezüglich einer ausführlicheren Diskussion für diese Unterschiede sei auf Wiedemann et al. (2002) verwiesen.

Der wissenschaftliche Austausch zu neun ausgewählten Themengebieten fand in insgesamt sechs Workshops statt, die an drei verschiedenen Terminen in den Jahren 2001 und 2002 abgehalten wurden. Die Ergebnisse der Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog wurden von Wiedemann et al. in einem Abschlussbericht zusammengefasst, der im Jahr 2002 publiziert wurde.

Im Jahr 2001 erschien eine Übersichtsarbeit, in der sich Mitarbeiter des Instituts für Umwelthygiene der Universität Wien mit der Frage gesundheitlich relevanter Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auseinandersetzten (Hutter et al. 2001). Neben experimentellen Langzeituntersuchungen und epidemiologischen Studien standen Ergebnisse von experimentellen Studien am Menschen mit Auswirkungen auf das Zentrale Nervensystem im Mittelpunkt des Interesses. Die Autoren kommen zu dem Schluss: *"Jede der hier erwähnten Studien für sich genommen lässt noch keinen Schluss auf eine gesundheitliche Gefährdung durch HF-Felder des modernen Mobilfunks zu. Sie belegen jedoch insgesamt konsistent biologische Wirkungen derartiger Felder, die wahrscheinlich nicht mit dem Erwärmungsansatz erklärt werden können. Obwohl zweifellos ein biologischer Effekt noch keinen Hinweis auf ein Gesundheitsrisiko bedeutet (ICNIRP 1998), kann die Zurückweisung einer gesundheitlichen Relevanz nur auf der Basis des Wirkmechanismus erfolgen, der den Effekten zugrunde liegt"* (Hutter et al. 2001, S. 318). Die Autoren stellen einen Forschungsbedarf insbesondere im Hinblick auf mögliche Wirkmechanismen heraus.

Professor Jiri Silny vom Forschungszentrum für Elektromagnetische Umweltverträglichkeit (femu) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, der im Jahr 2000 bereits ein Gutachten im Auftrag der T-Mobil erstellt hatte, hat sich zwei Jahre später im Auftrag des Verbandes der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (VDE) erneut mit dem Thema befasst. Seine Übersicht zu den Effekten und gesundheitsrelevanten Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks und anderer neuer Kommunikationssysteme erschien im März 2002 und stellt die Grundlage eines zeitnah publizierten entsprechenden Positionspapiers des VDE dar. Auch nach Berücksichtigung einiger neuerer Publikationen kommt Silny (2002, S. 4) erneut zu dem Schluss *"Insgesamt betrachtet zeigen Untersuchungen des Zentralnervensystems unter der Einwirkung von Handy-Feldern, wenn überhaupt, nur subtile Effekte, deren Existenz und Ursache in weiteren Untersuchungen verifiziert werden müssen"*.

Die Institution of Electrical Engineers (IEE), die sich seit 1992 mit den möglichen biologischen Effekten von schwachen elektromagnetischen Feldern beschäftigt und in zwei Jahresabständen auf der Basis der neu erscheinenden Literatur ein Statement abgibt, schreibt in ihrem Bericht vom Mai 2002 (S. 3): *„The possibility continues that exposure to mobile phone signals may cause subtle functional changes of the brain and nervous system, measured using endpoints such as attention and reaction time, sleep quality and the EEG. However other studies have reported null effects. There is some evidence that the likelihood of demonstrating a cognitive effect seems to increase when demands of the test are high“.*

Das NLGA (2002) weist in seiner kritischen Auseinandersetzung mit der Machbarkeit epidemiologischer Studien darauf hin, dass vorwiegend Schlafstörungen, Kopfschmerzen, Stress, Konzentrationsmängel und Müdigkeit als von Basisstationen verursachte Symptome beschrieben werden. *„Befindlichkeitsstörungen, ob als direkter oder indirekter „subjektiver“ Effekt, sind nicht auszuschließen, erfordern aber zunächst weitergehende systematische Untersuchungen, die es derzeit nicht gibt“* (NLGA 2002, S.87).

Auch das ECOLOG-Institut hat nach dem im Auftrag der T-Mobil erstellten Gutachten erneut eine umfassende Auswertung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu biologischen Wirkungen schwacher HF-Felder vorgenommen, deren Ergebnis im Jahr 2003 vorgelegt wurde (Neitzke et al. 2003). In ihrem Bericht stellen Neitzke et al. (2003) heraus, dass zunächst Effekte, die unmittelbar zu gesundheitlichen Schäden wie z.B. Krebserkrankungen führen, im Vordergrund des Interesses standen. In neuerer Zeit richtet sich der Focus jedoch zunehmend auch auf Effekte, die eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens widerspiegeln. *„Als Beeinträchtigung des Wohlbefindens werden Wirkungen klassifiziert, die nicht lebensbedrohlich sind, aber die Lebensqualität und das Wohlbefinden erheblich einschränken. In diese Kategorie werden z.B. Kopfschmerzen, Schlafstörungen und andere unspezifische Gesundheitssymptome eingeordnet“* (Neitzke et al. 2003, S. 2). In ihrem Review der neueren Literatur kommen Neitzke et al. (2003, S. 4) zu dem Schluss: *„dass es deutliche Hinweise für das Auftreten von Befindlichkeitsstörungen als Folge von häufigen oder lang andauernden Expositionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder gibt Die gesundheitlichen Auswirkungen der Veränderungen von Tiefschlaf- und REM-Phasen sind schwer abzuschätzen, aber es ist davon auszugehen, dass chronische Expositionen und Störungen der Schlafphasen zu gesundheitlichen Problemen führen können ...“.* Das ECOLOG-Institut nimmt diese Ergebnisse zum Anlass, die beobachteten Auswirkungen auf den Schlaf nicht nur als Beeinträchtigung des Wohlbefindens einzustufen, sondern auch als Effekte mit potentieller gesundheitlicher Relevanz.

Im Auftrag des schweizerischen Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) wurde von Rösli und Rapp vom Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel eine Literaturstudie zum Thema *Hochfrequente Strahlung und Gesundheit* durchgeführt (Rösli und Rapp 2003). Hinsichtlich der Effekte wurde zwischen "gesicherte", "wahrscheinliche", "mögliche", "unwahrscheinliche" und "nicht beurteilbare" unterschieden. Während keiner der beschriebenen Effekte die Kriterien der

Zuordnung zur Kategorie "gesichert" erfüllte, kommen die Autoren zu dem Schluss: „*Es wird als wahrscheinlich erachtet, dass die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon die Reaktionszeiten tendenziell verkürzt und die Hirnströme verändert. Am konsistentesten wurde eine Amplitudenerhöhung im alpha-Band der Hirnströme beobachtet. Schlafphasen, die von den Messungen der Hirnströme abgeleitet wurden, waren bei Exposition gegenüber einem Mobiltelefon in mehreren Studien verändert. Die Effekte traten bei so tiefen Strahlungsintensitäten auf, dass sie nicht mit dem konventionellen thermischen Wirkungsmodell erklärbar sind*“ (2003, S. 10). Eine Zusammenfassung der Literaturübersicht findet sich bei Rösli et al. (2003).

A 3 Bewertung biologischer Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem in Reviews

Neben den allgemeinen Übersichtsarbeiten zu biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich gibt es eine Reihe von Reviews zu speziellen Themen, in dieser Literaturübersicht soll im Folgenden aber nur auf die Reviews näher eingegangen werden, die sich mit dem Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem bzw. auf das Gehirn beschäftigen. Eine Übersicht über Reviews zu diesem Themenbereich findet sich in Tab. 3, wobei auch diese Zusammenstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Im Jahr 1997 erschien eine Übersichtsarbeit zum Thema *Neurological effects of microwave exposure related to mobile communication*. Die Autoren (Hermann und Hossmann) vom Max-Planck-Institut für Neurologische Forschung in Köln, berücksichtigten Ergebnisse von *in-vivo* und *in-vitro* Studien an Tieren und Menschen zu Effekten auf die elektrische neuronale Aktivität, die zelluläre Kalziumhomöostase, den Energiestoffwechsel, das Neurotransmittergleichgewicht und die Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke. Sie kommen zu dem Schluss: "*In conclusion, the above-reported data cannot exclude the possibility of microwave-induced biological effects on the brain, but they do not provide positive evidence for an elevated health risk at power levels and frequencies related to mobile communication*" (Hermann and Hossmann 1997, S. 11). An dieser Einschätzung möglicher Effekte auf das Gehirn hat sich auch in einem aktualisierten Review unter Berücksichtigung neuerer Literatur nichts geändert (Hossmann und Hermann 2002, 2003 s.u.).

Die Publikation der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, 2002) basiert auf den Beiträgen einer eintägigen Tagung zum Thema „*Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen beim Menschen?*“, die am 22. November 2000 in Berlin stattfand. Ziel der Tagung war es, den aktuellen Stand der Forschung zu diesem Thema herauszuarbeiten, wobei einerseits methodische Aspekte entsprechender Untersuchungen diskutiert wurden und andererseits Wissenschaftler ihre aktuellen Forschungsergebnisse zu diesem Themenkomplex vorgetragen und zur Diskussion gestellt haben. Auf die zwei in diesem Tagungsbericht abgedruckten Übersichtsarbeiten von Hossmann und Hermann (2002) sowie Hinrichs (2002) wird im Folgenden kurz näher eingegangen. Die Beiträge von Preece (2002), Krause et al. (2002), Freude

et al. (2002), Eulitz et al. (2002), Krafczyk et al. (2002), Mann et al. (2002) und Graf et al. (2002) werden im Kapitel A 4 berücksichtigt.

Hinrichs (2002), der sich speziell mit dem spontanen EEG, der Schlafstruktur, evozierten und ereigniskorrelierten Potentialen (EP und ERP) sowie ereigniskorrelierter Desynchronisation / Synchronisation (ERD/ERS) beschäftigt, kommt bezüglich der spontanen Hirnaktivität im Wach zu dem Schluss: "*Studies focussing on potential effects of GSM-EMF on spontaneous awake EEG have provided partly contradictory results. The majority of studies, however, did not find any dependence between the spectral EEG structure and EMF exposure*" (Hinrichs 2002, S. 99).

Tab. 3 Übersicht über einige Metastudien und Reviews zu biologischen Auswirkungen / gesundheitlichen Risiken von elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkbereich auf das Zentrale Nervensystem bzw. das Gehirn.

Jahr / M	Autor(en)	Titel
1997	Hermann und Hossmann	Neurological effects of microwave exposure related to mobile communication
2002	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin	Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen beim Menschen?
2002	Hossmann und Hermann	Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. Review of international research
2002	Hinrichs	Studies on interference of GSM high frequency electromagnetic fields and central nervous system: Electroencephalogram, sleep structure, evoked potentials, event related potentials, event related desynchronisation / synchronisation
2002	Hamblin and Wood	Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables
2002	Cook, Thomas and Prato	Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: A review of recent studies.
2003	D'Andrea, Adair and de Lorge	Behavioral and cognitive effects of microwave exposure
2003	D'Andrea, Chou, Johnson and Adair	Microwave effects on the nervous system
2003	Hossmann und Hermann	Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system

Während Untersuchungen zu evozierten Potentialen keinen Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern erkennen lassen: *"All of them clearly confirmed the null hypothesis of no such influence"* (Hinrichs 2002, S. 100), sprechen die vorliegenden Ergebnisse zu ereigniskorrelierten Potentialen sowie ereigniskorrelierten Synchronisationen und Desynchronisationen zumindest für komplexere kognitive Funktionen eher für einen Einfluss, was im Sinne einer gestörten intra-kortikalen Kommunikation oder einer reduzierten verfügbaren mentalen Kapazität zur Erledigung anspruchsvoller Aufgaben gedeutet werden könnte: *"In these studies EMF-induced ERD-/ERS-differences were observed in complex mental tasks (Target processing) but not in simple tasks. As far as documented, behavioural measures were not affected"* (Hinrichs 2002, S. 100).

Die Ergebnisse der bis zum Zeitpunkt des Vortrags (2000) vorliegenden Schlafstudien fasst Hinrichs (2002 S. 100) wie folgt zusammen: *"Although three of five known studies did not provide evidence for any significant interference it cannot be fully excluded that GSM-like fields might mildly interfere with all night sleep"*.

Der Review von Cook et al. (2002) beschäftigt sich hauptsächlich mit Studien zur Exposition durch niederfrequente Magnetfelder, behandelt aber unter der Hypothese möglicherweise ähnlicher Auswirkungen von niederfrequent amplitudenmodulierten Hochfrequenzfeldern auch einige Arbeiten mit Expositionen durch GSM-ähnliche Signale. Obwohl die Autoren einerseits in ihrer Zusammenfassung herausstellen: *"The reviewed EEG and cognition studies illustrate the remarkable variability in results when exploring the effects of MFs upon human brain activity. This makes it extremely difficult to draw any conclusions with regard to functional relevance for possible health risks or therapeutic benefits"* (Cook et al. 2002, S. 154), fassen sie die Studien zu ELF-modulierten Hochfrequenz Expositionen wie folgt zusammen: *"At present, evidence suggests that brief exposures to ELF modulated RF do have an effect upon cognition and electrophysiology. In a new area such as this, further experimentation with a more rigorous and standardized methodology for EEG analysis is needed"* (Cook et al. 2002, S. 150).

Hamblin und Wood (2002), die insgesamt 14 EEG-Studien (Schlaf- und Wach-EEG) sowie vier Studien zu kognitiven Effekten analysiert haben, stellen zusammenfassend fest: *"Although, in general, outcomes have been inconsistent and comparison between individual studies is difficult, enhanced electroencephalogram alpha-band power has been noted in several of the studies, a phenomenon also observed in some animal studies.more complex cognitive tasks appear to show improved performance in relation to mobile phone exposure"* (Hamblin und Wood 2002, S. 659).

Neben den Effekten auf das EEG, den Schlaf und kognitive Funktionen werden bei Hossmann und Hermann (2002, 2003) u.a. die Ergebnisse von *in-vitro* Studien zu neuronalen Effekten, metabolischen und genomischen Effekten sowie zum Einfluss auf die Sekretion von Neurohormonen und auf die Blut-Hirn-Schranke zusammengefasst. In ihrer abschliessenden Bewertung stellen Hossmann und Hermann (2002, S. 73) fest: *"In conclusion, the above-reported data cannot exclude the possibility of microwave-induced biological effects on the brain, but they do not provide positive evidence for an*

elevated health risk at power levels related to mobile communication". Diese Einschätzung gilt prinzipiell auch für ihren im Jahr 2003 publizierten Review, wobei die Autoren insbesondere darauf hinweisen, dass keine der zitierten Untersuchungen für den Bereich nicht thermischer Effekte Anhaltspunkte für mögliche Wirkmechanismen liefert: *"Most of the reported effects are small as long as the radiation intensity remains in the nonthermal range, and none of the research reviewed gives an indication of the mechanisms involved at this range"* (Hossmann and Hermann 2003, S. 49). Die größte von Mobiltelefonen ausgehende Gefahr für die Gesundheit sehen Hossmann und Hermann (2002, 2003) in Unfällen, die durch die Nutzung von Handys während des Fahrens bedingt sind.

In einem Review mit dem Titel *Behavioral and Cognitive Effects of Microwave Exposure* (D'Andrea et al. 2003a) sind kürzlich Ergebnisse von Studien zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Verhaltensaspekte und kognitive Funktionen zusammengestellt worden. Die meisten Ergebnisse zu diesem Thema stammen aus tierexperimentellen Studien, lediglich im Hinblick auf kognitive Funktionen liegen einige Befunde aus Humanstudien vor. Im Hinblick auf den Endpunkt: Unterbrechung des gegenwärtigen Verhaltens fassen D'Andrea et al. (2003a, S. S57) die Ergebnisse der tierexperimentellen Studien wie folgt zusammen: *"In all cases, the disruption of ongoing behavior during acute RF exposure is associated with a 1° C increase of body temperature. The disruption of a highly demanding operant task is a statistically reliable endpoint that is associated with whole body SARs in a narrow range between 3.2 and 8.4 W/kg, despite considerable differences in carrier frequency (225 MHz - 5.8 GHz), species (rodents to rhesus monkeys), and exposure parameters (near and far field, CW and pulse modulated). The time averaged power densities associated with these thresholds of disruption ranged (by calculation or measurement) from 8 to 140 mW/cm². Thermal changes seem to account for nearly all of the reported behavioral effects of absorbed RF energy across the limited frequency range explored"*. Diese Zusammenstellung macht deutlich, dass die meisten Ergebnisse aus den Tierstudien unter experimentellen Bedingungen gewonnen wurden, welche eine Exposition durch Mobiltelefone nicht adäquat widerspiegeln, weshalb eine Extrapolation auf den Menschen problematisch ist. Da es keine Humanstudien zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Verhalten gibt, fordern die Autoren: *"Somehow, equivalent behavioral experiments must be conducted on human volunteers to (1) confirm the purported "hazardous" nature of RF exposure on performance and (2) to gain some insights into the changes in body temperatures that may be expected to occur. Extrapolation to human beings of thresholds of reversible changes in animal behavior, while useful as interim bases for standard setting, must be superceded by hard data on the species in question, homosapiens"* (D'Andrea et al. 2003a, S. S58).

Die wenigen aus Humanstudien resultierenden Ergebnisse (Preece et al. 1999, Edelstyn and Oldershaw 2002, Koivisto et al. 2000, Koivisto et al. 2001 und Krause et al. 2000a,b) fassen die Autoren wie folgt zusammen: *"At the present time, the evidence that RFR exposure from mobile phone use can influence cognitive performance is very weak. Only a few studies have been performed and firm conclusions cannot be drawn until more studies are conducted with improved methodology and standardized protocols"* (D'Andrea et al. 2003a, S. 56/57).

Die Übersichtsarbeit von D'Andrea et al. (2003b), die sich speziell mit dem Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf das Nervensystem beschäftigt, kommt zu dem Schluss: *"It is concluded that the diverse methods and experimental designs as well as lack of replication of many seemingly important studies prevents formation of definite conclusions concerning hazardous nervous system health effects from RF exposure"* (D'Andrea et al. 2003b, S. S107).

Die Artikel von D'Andrea et al. (2003a,b) sind zwei von insgesamt 12 Publikationen zum Thema *„Reviews of the effects of RF fields on various aspects of human health“*, die in einem Supplementum (Issue S6) zum Band 24 (2003) der Zeitschrift Bioelectromagnetics publiziert wurden. Diese Reviews sind von dem ICES (International Committee on Electromagnetic Safety) der IEEE in Auftrag gegeben worden. Sie dienen dem Subkomitee (SC4) als Grundlage einer revidierten Fassung des Standards zur Exposition von Menschen gegenüber Hochfrequenzfeldern.

A 4 Originalarbeiten zu biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem

Der Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem bzw. das Gehirn kann auf verschiedenen Ebenen untersucht werden:

- Neuronale Aktivität
- Energiestoffwechsel
- Genomische Effekte
- Neurotransmitter
- Neuro-hormonale Regulation
- Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke
- **Spontanes Wach-EEG**
- **Evozierte Potentiale (EP) und ereigniskorrelierte Potentiale (ERP)**
- **Kognitive Funktionen**
- **Schlaf**
- **Regionaler cerebraler Blutfluss (rCBF)**
- Verschiedene Erkrankungen des Gehirns (z.B. Hirntumoren, neurologische Erkrankungen)

In der folgenden Zusammenstellung sollen nur die Aspekte detailliert behandelt werden, die in der bewilligten Studie ebenfalls untersucht werden sollen: spontanes Wach-EEG, evozierte und ereigniskorrelierte Potentiale, Schlaf und kognitive Funktionen. Zusätzlich werden zwei aktuelle Arbeiten zum regionalen cerebralen Blutfluss behandelt. Für alle anderen Aspekte sei auf entsprechende Übersichtsarbeiten verwiesen (siehe Tab. 1, 2 und 3).

Darüber hinaus sollen die fünf genannten Aspekte an dieser Stelle lediglich unter dem Aspekt der vorliegenden Ergebnisse aus experimentellen Humanstudien im Labor dargestellt werden, für entsprechende Ergebnisse aus tierexperimentellen Studien sei auf die in Tab. 1, 2 sowie insbesondere Tab. 3 zitierten Arbeiten verwiesen.

Für die hier nicht näher behandelten Untersuchungsebenen sei auf entsprechende Übersichtsarbeiten von Hossmann und Hermann (2002, 2003) verwiesen, sowie auf die Proceedings eines international besetzten FGF-Workshops zum *Thema Blut-Hirn-Schranke*, der im November 2003 in Reisingburg stattgefunden hat (Begley und Gollnick 2003).

A 4.1 Das spontane Wach EEG

Elektroencephalographie (EEG) ist die Bezeichnung für eine Methode zur Registrierung von Potentialschwankungen des Gehirns, die von auf der Kopfhaut aufgebrachten Elektroden erfasst und kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die Potentialschwankungen an der Kopfoberfläche ergeben sich durch lineare Überlagerung der Wirkung einer sehr hohen Anzahl elektrischer Dipole (Neurone). Jede Nervenzelle des Gehirns bildet einen solchen Dipol. Größte Bedeutung für das EEG haben die großen, senkrecht angeordneten Pyramidenzellen der Hirnrinde, wobei die exzitatorischen postsynaptischen Potentiale im Bereich der oberflächennahen apikalen Dendriten das elektrische Signal prägen. Die Summe der so erzeugten kortikalen Feldpotentiale ist die Grundlage des EEG.

Die Positionierung der Elektroden für die Ableitung eines EEG bei Erwachsenen folgt dem von Jasper (1958) eingeführten Ten-twenty-System (10-20-System), das heute noch den internationalen Standard darstellt. Im 10-20-System werden insgesamt 19 Ableiteelektroden relativ zueinander positioniert. Zum Auffinden der Positionen dienen in der anterior-posterioren Richtung die anatomischen Bezugspunkte Nasion und Inion sowie zur Festlegung der Querabstände die präaurikulären Bezugspunkte (vgl. Abb. 1). Die Abstände zwischen den Elektroden betragen 10 bzw. 20% des Gesamtabstandes zwischen den Bezugspunkten.

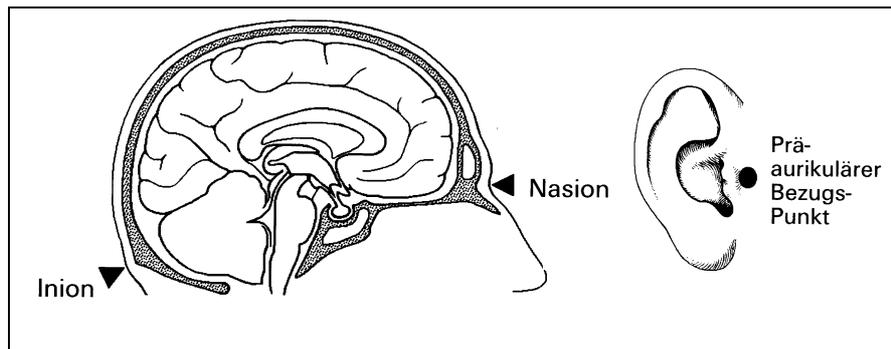


Abb. 1 Bezugspunkte für die in relativen Abständen durchzuführenden Markierungen der Ableitpunkte im 10-20-System (aus Zschocke 1995).

Die international einheitlich benutzten Bezeichnungen der Ableitpunkte sind in Abb. 2 dargestellt.

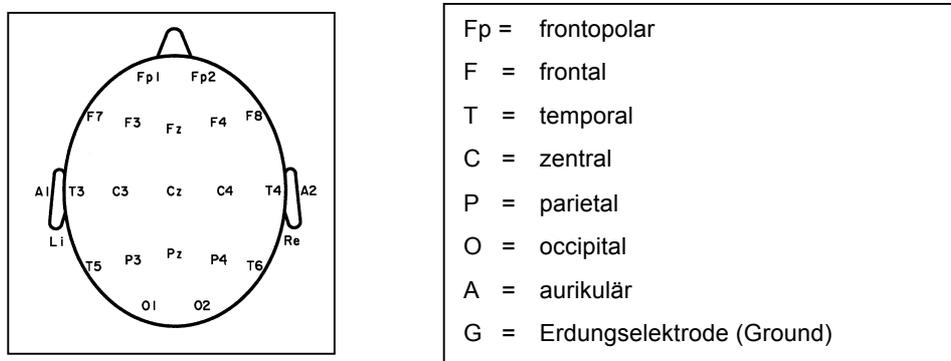


Abb. 2 Positionen und Bezeichnungen der Elektroden im 10-20-System

Eine (grobe) Zuordnung zwischen Elektrodenpositionen und kortikalen Lokalisationen findet sich in Tab. 4.

Tab. 4 Topographischer Bezug der Ableitpunkte des 10-20-Systems (nach Zschocke 1995).

Elektrodenposition	Kortikale Lokalisation
Fp1, Fp2	Gyrus frontalis superior (rostrales Ende)
F3, F4	Gyrus frontalis medius (mittlerer Abschnitt)
F7, F8	Gyrus frontalis inferior (pars triangularis)
C3, C4	Gyrus praecentralis
P3, P4	Lobulus parietalis superior
T3, T4	Über Sulcus temporalis superior
T5, T6	Gyrus temporalis medius
O1, O2	Lateral und oberhalb des Occipitalpols

Mit der heute verfügbaren Technologie lässt sich die Anzahl an Ableitpunkte deutlich vergrößern. Eine Methode zur Positionierung von mehr als 19 Ableitpunkten bietet das 10%-System, eine Erweiterung des 10-20-Systems, mit dem bis zu 80 Elektroden standardisiert positioniert werden können. Mit speziellen Elektrodenhauben arbeitende Systeme können auch beispielsweise 256 Elektrodenpositionen verwenden.

Die Frequenz ist ein maßgebender Parameter zur Beschreibung des EEG. Häufig wird die Frequenz in verschiedene Frequenzbänder eingeteilt: β -Wellen (12.5 - 30 Hz), α -Wellen (7.5 – 12.5 Hz), θ -Wellen (3.5 – 7.5 Hz) und δ -Wellen (0.5 – 3.5 Hz). Jede Hirnregion hat eine bestimmte Form von Grundaktivität, die Grundaktivität der occipitalen Hirnregion definiert den EEG-Typ. Und nur die EEG-Anteile, die mit dieser Grundaktivität in Zusammenhang stehen, werden als Grundrhythmus bezeichnet. Der weitaus häufigste Grundrhythmus ist der α -Grundrhythmus (86%), 7% der Bevölkerung haben einen β - und 6% einen θ -Rhythmus, ca. 1% weist Mischbilder auf (Zschocke 1995).

Humanstudien zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf das spontane Wach-EEG sind in Tab. A1 im Anhang zusammengestellt.

In der Tabelle sind folgende Ergebnisse, die auf Kongressen vorgestellt wurden und nur als Abstract bzw. Publikation in Proceedings vorliegen, nicht berücksichtigt: von Klitzing (1992), Thuroczy et al. (1996) und Hietanen et al. (1997). Da die Abstracts uns nicht vorlagen, sind die Ergebnisse von Thuroczy et al. (1996) und Hietanen et al. (1997) hier kurz sekundär nach Hinrichs (2002) zitiert. Die von Thuroczy et al. (1996) vorgestellten Ergebnisse basieren auf einer Untersuchung an 76 Probanden, bei denen in einem einfach-blinden Design mit einer festen Expositionssequenz: Sham-real-sham-real-sham zwei EEG Kanäle abgeleitet wurden, ein Kanal an der exponierten Seite des Kopfes und einer an der nicht exponierten. Beobachtet wurden Variation im α -Frequenzband, die z.T. statistisch signifikant waren. Die Ergebnisse werden von Hinrichs (2002) jedoch unter methodischem Aspekt kritisch bewertet. Die von Hietanen auf dem *World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine* in Bologna (Italien) vorgestellten Ergebnisse wurden im Jahr 2000 publiziert (siehe Tab. A1).

Zu Beginn der 90er Jahre hat von Klitzing in einer Reihe von Vorträgen und Publikationen (1992, 1995) erstmals auf eine mögliche Beeinflussung des EEG beim Menschen durch gepulste hochfrequente elektromagnetische Felder hingewiesen. Die im Jahr 1995 veröffentlichten Ergebnisse basieren auf Daten von 17 männlichen und weiblichen Probanden im Alter von 20 bis 29 Jahren, die in drei konsekutiven Blöcken von je 15 Minuten, unterbrochen von je 15 Minuten Pause: Field-off Bedingung, exponiert wurden (verwendetes Feld: Trägerfrequenz 150 MHz, Pulsung 217 Hz; Feldstärke: $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ in 6 cm Tiefe). Das während des Experiments kontinuierlich abgeleitete zweikanalige EEG ließ während der Exposition im Vergleich zur Kontrollbedingung eine verminderte Alpha-Aktivität sowie ein Anstieg der Power niedrigerer Frequenzen erkennen.

Diese Beobachtungen hat die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. zum Anlass genommen, die Firma CETECOM (Certification and Testing in Communications GmbH) mit einer kritischen Auseinandersetzung mit von Klitzings Versuchen zu beauftragen. Die Firma CETECOM hat darüber hinaus in den Jahren 1993 und 1994 drei Versuche mit von Klitzing gemeinsam durchgeführt und ihren Bericht im Jahr 1996 vorgelegt (Jahre et al. 1996). Die Autoren des Berichts weisen auf eine Reihe von technischen und methodischen Schwächen hin, wie z.B. keine Dokumentation von Basisdaten, keine Vigilanzkontrolle (ein Proband war während des Versuchs eingeschlafen), zu lange Versuchsdauer (→ natürliche Vigilanzschwankungen), geringe Stichprobengröße (→ keine statistisch belastbare Aussage möglich), keine dokumentierten Untersuchungen ohne Exposition, die Versuche können nicht als Blindversuche gewertet werden, Probleme bei der Anwendung der FFT zur Berechnung der Spektralleistung sowie nicht zuletzt die Verwendung von Expositionssignalen, die sich von den beim Mobilfunk eingesetzten sehr stark unterscheiden. Die Autoren kommen deshalb zu dem Schluss: *"Es können daher keine Rückschlüsse aus den Versuchen auf irgendwelche biologischen Wirkungen beim digitalen Mobilfunk gezogen werden"* (Jahre et al. 1996, S. 10).

Reiser et al. (1995) untersuchten in einer doppelblinden cross-over Studie mit drei Versuchsbedingungen an 36 Probanden (je 18 Männer und Frauen) Veränderungen im EEG durch ein GSM 900 ähnliches Signal (902.4 MHz, gepulst mit 217 Hz) sowie durch das Signal eines Therapiegerätes, wie es auch von Klitzing verwendet hat. An drei verschiedenen Untersuchungstagen mit randomisierter Exposition wurden die Probanden zur selben Tageszeit jeweils eine Stunde untersucht (15 min Ruhebedingung vor Beginn des Experiments, 15 min Exposition, 30 min Ruhephase nach Exposition). Abgeleitet wurden alle 19 Lokalisationen des 10-20-Systems. Als statistische Analyse der Powerspektralwerte wurde ein Vorzeichentest für gepaarte Beobachtungen herangezogen. Bei Exposition mit dem schwachen 147 MHz-Feld (Therapiegerät) zeigte sich an den posterioren Lokalisationen (O1 und O2) ein Anstieg der α - und der β -Aktivität während und nach der Exposition. Die posterioren Lokalisationen waren diejenigen, die der Antenne, die hinter dem Kopf im Abstand von 40 cm montiert war, am nächsten lagen. Für die GSM-Expositionsbedingung waren die Ergebnisse nicht so eindeutig. Statistisch signifikante Unterschiede ließen sich lediglich für die β -Aktivität nach dem Ende der Exposition beobachten.

Gehlen et al. (1996) haben den Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich (mit 217 Hz gepulstes 914.2 MHz-Signal) auf das Spontan-EEG in einem doppelblinden Parallelgruppendesign an insgesamt 52 Probanden im Alter von 20 bis 38 Jahren untersucht. Die Zuordnung zu zwei Untersuchungsgruppen erfolgte randomisiert. In beiden Gruppen wurden Männer und Frauen untersucht: Expositionsgruppe: n=25 (12 Männer und 13 Frauen), Scheinexpositionsgruppe: n=27 (13 Männer und 14 Frauen). Die Untersuchung umfasste eine drei mal 10 Minuten dauernde EEG-Registrierung, wobei während der mittleren 10 Minuten in der einen Gruppe exponiert wurde. Eine Varianzanalyse ergab, dass die nach Frequenzbändern über 7 ausgewählte Elektroden (Cz, T3, T4, P3, P4, O1 und O2) getrennt berechneten mittleren Leistungen keine signifikanten Unterschiede zwischen der exponierten und der nicht exponierten Probandengruppe aufwiesen. Die Ergebnisse dieser Studie sind auch bei Spittler et al. (1997) publiziert.

An 34 jungen gesunden Männern (Nichtrauchern) im Alter von 21 bis 35 Jahren haben Röschke und Mann (1997) in einer einfach blinden, placebokontrollierten cross-over Studie Kurzzeiteffekte unter Exposition durch ein mit 217 Hz gepulstes GSM 900 ähnliches Feld untersucht. Die Antenne wurde 40 cm über dem Vertex platziert, die Spitzenleistung betrug 8 W, die mittlere Leistungsflussdichte in 40 cm Entfernung 0.5 mW/cm^2 , sie lag damit etwa um einen Faktor 20 unter dem erlaubten Grenzwert. Das Experiment wurde unter kontrollierten Versuchsbedingungen durchgeführt (standardisierte Tageszeit: 9.00 bis 12:00, kein Alkohol- und Kaffeekonsum in den vier Tagen vor Durchführung des Experiments). Abgeleitet wurden zwei monopolare Kanäle C3 und C4 gegen die ipsilateralen Mastoide (A1, A2) nach dem internationalen 10-20-System (Jasper 1958). Das Experiment umfasste zwei 10-minütige EEG-Aufzeichnungen unter Ruhebedingungen mit geschlossenen Augen, die von einer 30-minütigen Pause unterbrochen waren. Jede 10-minütige Aufzeichnung wurde in drei Intervalle unterteilt, wobei das jeweils mittlere Intervall (Dauer ca. 3.5 min) unter Exposition bzw. Scheinexposition abgeleitet wurde. Die flankierenden Intervalle dienten der Vigilanzkontrolle. Die Reihenfolge der Untersuchungsbedingungen Exposition/Scheinexposition wurde randomisiert zugeordnet. Die Powerspektralwerte wurden für die nach Herrmann et al. (1989) definierten Frequenzbänder berechnet. Als statistischer Test wurde ein Wilcoxon Test für gepaarte Beobachtungen verwendet. Für keines der vier Frequenzbänder wurden statistisch signifikante Veränderungen unter Exposition beobachtet, d.h. es konnten in dieser Studie keine Kurzzeiteffekte der speziellen Expositionsbedingungen auf das spontane Wach-EEG gefunden werden.

In einem Projekt, das von Mai 1995 bis Juni 1998 vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen gefördert wurde, haben Krafczyk et al. (1998, 2002) an 39 gesunden Probanden (21 Frauen und 18 Männer) im Alter zwischen 16 und 58 Jahren den Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich u.a. auf das spontane Wach-EEG untersucht. Es wurden handelsübliche Mobiltelefone für das D-Netz (Frequenz 902.4 MHz, 23 Probanden) und für das E-Netz (Frequenz 1760 MHz, 16 Probanden) benutzt. In einem einfachblinden cross-over Studiendesign wurden unter Ruhebedingungen 32 EEG-Kanäle abgeleitet. Die Expositionsdauer für das Ruhe-EEG-Experiment betrug 9 Minuten, die Sequenz der Feldtypen wurde randomisiert zugeordnet. Im D-Netz Frequenzbereich wurden Experimente mit drei verschiedenen Abständen der Expositionsquelle zum Kopf durchgeführt (siehe Tab. A1). Bereits die graphische Analyse der Daten zeigte, dass unter der Exposition die EEG-Aktivität im Streubereich der Nicht-Exposition bleibt. Eine statistische Analyse ergab, dass sich in keinem der experimentellen Ansätze eine signifikante Veränderung der EEG-Aktivität beobachten ließ.

In einer neueren finnischen Studie (Hietanen et al. 2000) wurde der Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Aktivität des Gehirns während der Exposition an insgesamt 19 Probanden (10 Männer und neun Frauen) untersucht. Die Expositionsquellen waren fünf verschiedene Mobiltelefone (analoge und digitale Modelle im 900 MHz oder 1800 MHz-Frequenzbereich). Das EEG (21 Kanäle: die 19 Kanäle des 10-20-Systems plus Fpz und Oz) wurde unter insgesamt sechs 30-minütigen experimentellen Bedingungen (einschließlich der Scheinexposition) im wachen Zustand bei geschlossenen Augen abgeleitet, wobei 20 Minuten tatsächlich exponiert wurde. Zur Reduktion der

Variablen wurde das EEG nicht für einzelne Ableitungen, sondern für vier Regionen ausgewertet: frontale, temporale, centroparietale und occipitale Region. Lediglich für eines der fünf Telefone konnte mittels t-Test für gepaarte Beobachtungen ein statistisch signifikanter Effekt beobachtet werden. Dieser bezieht sich auf die absolute (nicht jedoch auf die relative) Power des δ -Frequenzbandes, die unter Exposition durchschnittlich $0.5 \mu V^2$ größer war. Angesichts des Gesamtergebnisses bewerten die Autoren ihre Beobachtungen wie folgt: *"The findings of this study suggest that exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones has no abnormal effects on human EEG activity. The observed difference in 1 parameter was probably caused by statistical chance"* (Hietanen et al. 2000, S. 87). Es sei noch erwähnt, dass in dieser Studie darauf geachtet wurde, sowohl eine direkte elektrische Beeinflussung der EEG-Aufzeichnung durch das Expositionssignal als auch eine Veränderung der SAR-Verteilung durch die EEG-Elektroden auszuschließen.

In einer Studie an 24 Probanden haben Lebedeva et al. (2000) den Einfluss eines 902.4 MHz Mobiltelefonsignals auf das spontane Wach-EEG bei offenen und geschlossenen Augen untersucht. Die Leistungsflussdichte betrug 0.06 mW/cm^2 . Die Untersuchungen erfolgten in einem cross-over Design, wobei die Ableitungen jeweils für 60 Minuten durchgeführt wurden. Nach 15 Minuten Ruhe-EEG erfolgte eine 15-minütige Exposition / Sham-Exposition und danach wurden noch einmal 30 Minuten ohne Exposition aufgezeichnet. Es wurden 16 EEG-Kanäle abgeleitet, jeweils unter den Bedingungen „offene Augen“ und „geschlossene Augen“. Zur Auswertung wurde ein speziell entwickeltes Programm zur Analyse der nicht-linearen Dynamik herangezogen, mit dem als Zielparameter unter Berücksichtigung aller Kanäle eine globale Korrelationsdimension ermittelt wurde, welche nach Ansicht der Autoren den funktionalen Zustand des Gehirns widerspiegelt. Während und nach der Exposition zeigte sich eine signifikant erhöhte globale Korrelationsdimension. Dies war unter der Ableitebedingung „geschlossene Augen“ ausgeprägter als bei dem mit offenen Augen abgeleiteten EEG. Die Autoren werten ihre Ergebnisse als Ausdruck einer Cortex-Aktivierung unter Exposition.

In einer von Croft et al. (2002) publizierten einfachblinden cross-over Studie an ebenfalls 24 Probanden (16 Männer und 8 Frauen im Alter von 19 bis 48 Jahren) wurde u.a. der Einfluss einer Mobilfunkexposition (mit 217 Hz gepulstes 900 MHz Signal) auf das Ruhe-EEG untersucht. Die Expositionsquelle war in 5 cm Abstand zum Kopf zwischen den Elektrodenpositionen Pz und Oz lokalisiert. Die geschätzte (nicht gemessene) durchschnittliche Sendeleistung betrug 3-4 mW. Insgesamt wurden 19 Elektroden gegen A1 und A2 als gemittelte Referenz abgeleitet. Zunächst wurde drei Minuten EEG unter einer auditiven Diskriminationsaufgabe abgeleitet, es folgte eine zweiminütige Ruhe-EEG Aufzeichnung bei geöffneten Augen. Diese Sequenz wurde viermal wiederholt, woraus sich eine Versuchsdauer von 20 Minuten ergab. Diese 20-minütige Testreihe wurde jeweils nacheinander unter drei randomisiert zugewiesenen Versuchsbedingungen (ausgeschaltetes Mobiltelefon, aktives Mobiltelefon und aktives Mobiltelefon mit „Strahlungsreduktion“) durchgeführt, wobei die Bedingung aktives Mobiltelefon mit „Strahlungsreduktion“ in der Publikation nicht weiter betrachtet wird. Zur Auswertung der EEG-Daten wurden Powerspektralwerte für 5 Frequenzbänder (1-4 Hz, 4-8 Hz, 8-12 Hz, 12-30 Hz und 30-45 Hz) berechnet. Hinsichtlich der Lokalisation wurden die 19 Ableitpunkte zu neun Regionen: frontal,

central und parietal (jeweils links, rechts und Mitte) zusammengefasst. Als Funktion der Expositionsdauer war unter Exposition die Delta-Aktivität (1-4 Hz) im Ruhe EEG rechtshemisphärisch vermindert während die Alpha-Aktivität posterior in der Mediansagittalebene erhöht war.

In einer neueren Studie von Kramarenko und Tan (2003) an Erwachsenen und Kindern, für die uns bisher lediglich ein Abstract vorliegt und die deshalb nicht in Tab. A1 mit detaillierten Angaben gelistet ist, wurde der Einfluss der von einem Mobiltelefon ausgehenden elektromagnetischen Felder auf das spontane Wach-EEG mit Hilfe von Spektralmaps untersucht. Es zeigten sich Änderungen im langsamen Frequenzbereich für die kontralateralen frontalen und temporalen Hirnregionen. Informationen zum Versuchsdesign und den Expositionsparametern sind dem Abstract nicht zu entnehmen.

Die in Tab. A1 aufgeführten Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum spontanen Wach-EEG, wurden in der Regel mit einem einfach-blinden Design durchgeführt. Ein doppelblinded Design ist zu bevorzugen und inzwischen auch ohne größere Schwierigkeiten realisierbar. Eine Übereinstimmung gibt es ferner im Hinblick auf die untersuchten Personen, bei denen es sich ausschließlich um „gesunde“ Probanden im Erwachsenenalter bis 60 Jahre handelt. Nicht untersucht sind bisher ältere Personen, Kinder und Jugendliche sowie Personen mit einer selbst eingeschätzten Elektrosensibilität. Die Studien unterscheiden sich zum einen hinsichtlich der Exposition: Art des Signals, erreichte SAR-Werte und SAR-Verteilungen resultierend aus unterschiedlichen Antennentypen und Positionierungen der Antenne in Relation zum Kopf (Abstand und Richtung). Die Expositionsdauer in den bisherigen Experimenten variiert zwischen 3.5 und 20 Minuten und lässt somit lediglich Rückschlüsse auf mögliche Kurzzeiteffekte zu. Darüber hinaus unterscheiden sich die Studien im Hinblick auf die Anzahl der abgeleiteten Kanäle sowie die Anzahl der ausgewerteten Parameter. Je mehr Zielparameter ausgewertet werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit zufallsbedingt signifikanter Ergebnisse. Bei multiplen Testungen müsste entweder eine Bonferroni-Korrektur der Irrtumswahrscheinlichkeit erfolgen oder aber zumindest eine logische Abschätzung der Anzahl zufallsbedingt signifikanter Ergebnisse, wie sie sich z.B. bei Hietanen et al. (2000) findet. Mit zwei Ausnahmen ergaben sich für die vom Expositionssignal her mobilfunkbezogenen Studien keine Effekte auf das spontane Wach-EEG.

A 4.2 Evozierte Potentiale (EP), ereigniskorrelierte Potentiale (ERP) sowie ereigniskorrelierte Desynchronisation / Synchronisation des EEG (ERD/ERS)

Über das spontane Wach-EEG hinaus erlaubt eine Analyse des mittels spezieller Verfahren gemittelten EEG bei Anwesenheit externer oder interner Stimuli das Monitoring spezifischerer neuronaler Funktionen, wie Stimuluswahrnehmung (perception) und Stimulusverarbeitung (processing). Potentialschwankungen, die durch sensorische Stimulation hervorgerufen werden, werden im Allgemeinen als evozierte Potentiale (EP- stimulus dependent potentials) bezeichnet. Im Zusammenhang mit motorischen und kognitiven Prozessen auftretende Potentialschwankungen werden dagegen als ereigniskorrelierte Potentiale (ERP) bezeichnet. Die ERP können sowohl dem Ereignis vorausgehen (z.B. Contingent Negative Variation: CNV, Bereitschaftspotential) als auch nachfolgen, wie z.B. Hirnstamm-potentiale, die in den ersten 10 ms nach einem akustischen Stimulus auftreten oder die P300, die mit

einer Latenz von 300 ms auftritt (Hegerl 1998). Die Contingent Negative Variation (CNV) beschreibt eine zunehmende Negativierung des kortikalen elektrischen Potentials, die während einer antizipierten Antwort auf einen erwarteten Stimulus auftritt. Die zur Charakterisierung von EP und ERP herangezogenen Parameter sind in Abb. 3 exemplarisch für akustisch evozierte Potentiale (AEP) dargestellt. Die Benennung der einzelnen Komponenten ist unterschiedlich. Von einigen Autoren werden, wie in Abb. 3 dargestellt, die Potentiale mit P1, N1, P2, P3 etc. bezeichnet, andere Autoren verwenden zur Charakterisierung die Polarität (N für negativ, P für positiv) und die Latenz bis zum Auftreten des Gipfels (z.B. P300: Auftreten einer positiven Potentials nach ca. 300 ms).

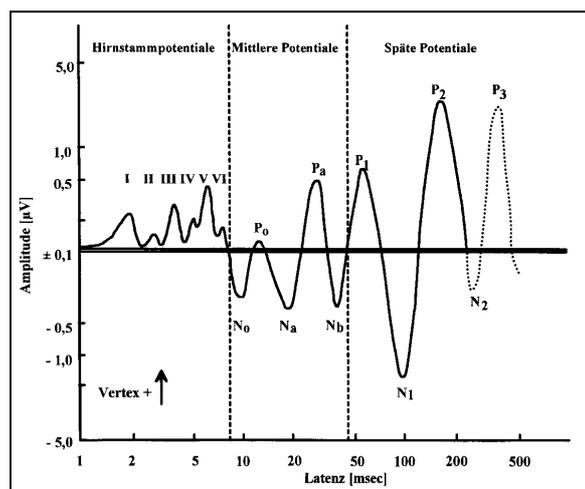


Abb. 3 Schematische im Zeitbereich logarithmische Darstellung der akustisch evozierten Potentiale (aus Hegerl 1998).

Bei Potentialen, die früh nach dem Stimulus auftreten, ist die intraindividuelle Variation im Wesentlichen durch physikalische Stimulus-Parameter bedingt. Bei späteren Potentialen ist die Variation dagegen eher durch psychologische Konstrukte wie z.B. Aufmerksamkeit, Motivation, Wachheit etc. erklärbar.

Zur Charakterisierung des ereigniskorrelierten Verlaufes der relativen spektralen Leistung für einzelne Frequenzbänder des EEG kann der Parameter ereigniskorrelierte Desynchronisation / Synchronisation herangezogen werden. Er beschreibt für jeden Zeitpunkt das prozentuale Verhältnis der relativen spektralen Leistung zu einem Bezugswert (z.B. Baseline, Stimulationszeitpunkt). Über die Trials wird gemittelt. Eine reduzierte relative spektrale Leistung wird Desynchronisation, eine erhöhte spektrale Leistung Synchronisation genannt. Zum Vergleich zweier Versuchsbedingungen können die ERD-/ERS-Verläufe für die beiden Bedingungen zueinander in Relation gesetzt werden.

In den vergangenen fünf Jahren wurden einige EP-, ERP- und ERD/ERS-Studien durchgeführt, die in Tab. A2 zusammengestellt sind. Urban et al. (1998, siehe auch Hladky et al. 1999) untersuchten in einer nicht-blinden cross-over Studie (Experimente mit und ohne Exposition wurden im Abstand von zwei Wochen durchgeführt) an 20 Probanden (10 Männer und 10 Frauen) im Alter von 19 bis 70 Jah-

ren den Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf visuell evozierte Potentiale. Die Exposition erfolgte über ein handelsübliches GSM Mobiltelefon, die visuelle Stimulation erfolgte durch einen klassischen Schachbrettmusterumkehrreiz (Frequenz: 1.5 Hz). Das EEG-Signal Oz-Fz wurde über einen Zeitraum von 5 Minuten abgeleitet. Eine varianzanalytische Auswertung ergab weder für die Latenzen der Komponenten N1, P1 und N2 noch für die peak-to-peak Amplituden N1P1 und P1N2 ein statistisch signifikantes Ergebnis.

In der bereits unter A 4.1 beschriebenen Studie von Krafczyk (1998, 2002) wurden in allen vier Experimenten neben dem Ruhe-EEG auch akustisch evozierte Potentiale (Oddball Paradigma) unter Darbietung von Tönen unterschiedlicher Frequenz abgeleitet. In dem Versuch mit dem E-Netz Mobiltelefon wurden darüber hinaus visuell evozierte Potentiale unter Darbietung eines Schachbrettmusterumkehrreizes (Frequenz: 8 Hz) abgeleitet. Eine varianzanalytische Auswertung ergab keine Hinweise auf eine durch elektromagnetische Felder bedingte Änderung der Hirnaktivität.

In einer Untersuchung der zeit- und nicht phasengebundenen Hirnaktivität mittels einer auditiven Diskriminationsaufgabe (Oddball-Paradigma) haben Eulitz et al. (1998) in einem blinden Versuch an 13 gesunden jungen Männern im Alter von 21 bis 27 Jahren keinen Zusammenhang zwischen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkfrequenzbereich und den gemittelten EEG-Antworten auf die Stimuli gefunden. Die normalisierte und über 13 Probanden gemittelte Spektralpower ließ dagegen im Frequenzband 18.75 – 31.25 Hz für die handlungsrelevante Versuchsbedingung (Tastendruck auf seltene Töne) Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen erkennen. Für nicht targetrelevante Stimuli (häufige Töne und seltene Novel-Töne) ließ sich ein solcher Unterschied nicht erkennen. Die größten Unterschiede für die Targetstimuli fanden sich an den Lokalisationen Cz und C3.

In einer weiteren Studie sind Eulitz et al. (2002) den Fragen nachgegangen, ob auch im Gamma-Frequenzband des EEG (> 30 Hz), in dem sich kognitive Informationsverarbeitungsprozesse abbilden, ein solcher Effekt zu beobachten ist und ob es einen Zusammenhang zwischen dem Expositionsort und dem Effekt gibt. Diese Studie wurde mit deutlich höheren SAR-Werten durchgeführt (vgl. Tab. A2). Untersucht wurden diese Fragen in einer einfach blinden cross-over Studie an 22 männlichen rechtehändigen Probanden im Alter von 20 bis 29 Jahren, wobei die Daten von 8 Probanden wegen einer zu hohen Artefaktrate (Augenartefakte kontrolliert durch Electrooculogramm (EOG)) für weitere Analysen nicht geeignet waren. Die Expositionsbedingungen (Verum vs. Sham und rechts vs. links) wurden randomisiert zugeordnet. Die Autoren fassen ihre Ergebnisse wie folgt zusammen: *„Die deutlichste Modulation der oszillatorischen Hirnaktivität durch EMF wurde in höherfrequenten Bereichen (ca. 60-80 Hz) ab ca. 350 bis 700 ms nach Reizdarbietung beobachtet. Interessant ist, dass diese Modulation in der verhaltensrelevanten Bedingung (Tastendruck auf seltene Töne) und hauptsächlich bei der Teilnehmergruppe mit rechtsseitiger EMF-Exposition erfolgte“* (Eulitz et al. (2002, S 137).

Einen anderen Aspekt einer möglichen Beeinflussung der Hirnaktivität durch hochfrequente elektromagnetische Felder, die zu den ereigniskorrelierten Hirnpotentialen gehörenden *Langsamen Potentiale* (LP, slow potentials SP), haben Freude et al. (1998, 2000 und 2002) untersucht. Langsame Hirn-

potentiale treten in Vorbereitung auf Ereignisse bzw. Informationsverarbeitungsleistungen als langsam ansteigende Negativierung in Erscheinung und werden als Indikator einer erhöhten kortikalen Erregbarkeit gewertet (Freude et al. 2002). Auf der Verhaltensebene führt dies zu einer schnelleren Informationsverarbeitungsleistung, verkürzten Reaktionszeiten bzw. Verringerung von Fehlerraten.

Die im Jahr 1998 veröffentlichten Ergebnisse basieren auf einer einfachblinden cross-over Studie an ursprünglich 20 rechtshändigen männlichen Probanden im Alter von 21 bis 30 Jahren. Vier Probanden mussten wegen einer zu hohen Anzahl von Artefakten später ausgeschlossen werden. Zur Erkennung von Augenartefakten wurden ein horizontales und ein vertikales EOG zusätzlich aufgezeichnet. Als Expositionsquelle diente ein am linken Ohr (posterior temporal) positioniertes GSM Mobiltelefon. Das EEG wurde mit einer Haube an insgesamt 30 Elektrodenpositionen abgeleitet. Es wurden zwei Tests durchgeführt: eine einfache Finger Tapping Aufgabe (Dauer ca. 3 Minuten) und eine visuelle Folgereaktionsaufgabe (Dauer ca. 5 Minuten). In der Finger Tapping Aufgabe ließen sich keine signifikanten Unterschiede im Bereitschaftspotential zwischen den zwei Versuchsbedingungen erkennen. In der visuellen Folgereaktionsaufgabe gab es zwar keine Verhaltensunterschiede, wohl aber einen Einfluss des elektromagnetischen Feldes auf das Langsame Potential. Eine Varianzanalyse für Messwiederholungen mit den Faktoren EMF (an/aus), Hemisphäre (links/rechts) und Hirnregion (frontal/central/temporo-parieto-occipital) ergab einen signifikanten Einfluss der Faktoren EMF, Hemisphäre und Hirnregion sowie einen signifikanten Einfluss der Interaktionen EMF x Hemisphäre und EMF x Gehirnregion. Unter EMF-Exposition wies das Bereitschaftspotential eine geringere Negativität auf. Dieser Unterschied war für die rechte Hemisphäre ausgeprägter als für die linke. Im Hinblick auf die Hirnregion ließ sich der größte EMF-Effekt für die rechte central/temporo-parieto-occipitale Region erkennen. Die Autoren deuten ihre Ergebnisse im Sinne einer auf zellulärer Ebene modulierten aufgabenspezifischen Veränderung der kortikalen Erregbarkeit.

Die für die visuelle Folgereaktionsaufgabe beobachteten Ergebnisse wurden in einem sechs Monate später durchgeführten Experiment an insgesamt 19 gesunden rechtshändigen Männern im Alter von 21 bis 26 Jahren repliziert (Freude et al. 2000). Acht von ihnen hatten bereits in der ersten Studie (Freude et al. 1998) teilgenommen. Die Daten von drei Probanden konnten aufgrund der großen Anzahl von Artefakten nicht in die Auswertung eingeschlossen werden. Zusätzlich wurde zu diesem Zeitpunkt eine Zwei-Stimulus-Aufgabe zur Erzeugung einer Contingent Negative Variation (CNV) durchgeführt. Für diese Aufgabe ließ sich kein signifikanter EMF-Effekt beobachten. Die Ergebnisse legen nach Ansicht der Autoren nahe, dass es EMF-Effekte auf selektive Aspekte der Informationsverarbeitung beim Menschen gibt, die sich auf der Verhaltensebene jedoch nicht abbilden lassen und die nicht als Indikator für „Well-being“ und Gesundheit gelten können.

In einer weiteren Studie an ursprünglich 16 rechtshändigen jungen Männern im Alter zwischen 20 und 29 Jahren (vier Probanden mussten wegen einer zu hohen Anzahl von Artefakten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden) wurden den Probanden wiederholt die visuelle Folgereaktionsaufgabe und die Aufgabe zur Auslösung einer Erwartungswelle präsentiert. Die Exposition erfolgte in diesem Experiment auf beiden Seiten des Kopfes mit je einem GSM Mobiltelefon, wobei die Exposi-

tion links und rechts nach einem ausbalancierten Design abwechselnd durchgeführt wurde. Die Sendeleistung lag in diesem Experiment deutlich höher als in der ersten Studie (SAR-Werte: 5.66 W/kg gemittelt über 1g und 3.65 W/kg gemittelt über 10g). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die EEG-Haube einen dämpfenden Effekt hat, ohne Haube waren die entsprechenden SAR-Werte: 6.95 W/kg (1g) bzw. 4.25 W/kg (10g). Trotz der vierfach höheren Sendeleistung konnte kein Einfluss der elektromagnetischen Exposition auf die Leistung (Verhaltensparameter) in der visuellen Folgereaktionsaufgabe beobachtet werden. Der Einfluss auf das Bereitschaftspotential konnte jedoch erneut bestätigt werden. Die Amplitudendifferenz variierte nicht in Abhängigkeit von der Sendeleistung, allerdings war der EMF-Effekt bei der höheren Sendeleistung nicht mehr auf bestimmte Hirnregionen beschränkt. Gleiches gilt für die weniger komplexe Aufgabe zur Erzeugung einer Erwartungswelle. Hier ist die Amplitude des langsamen EEG-Signals allerdings im Gegensatz zur visuellen Folgereaktionsaufgabe signifikant erhöht. Die Autoren weisen darauf hin, dass die zugrunde liegenden Mechanismen noch ungeklärt sind. Spekulativ kann möglicherweise von einem allgemein (kurzzeitig) aktivierenden Einfluss der gepulsten elektromagnetischen Felder auf die Strukturen des Zentralnervensystems ausgegangen werden.

In einer Studie an 22 Patienten (9 Männer und 13 Frauen, mittleres Alter 48 Jahre) mit einer klinisch diagnostizierten Narkolepsie mit Kataplexie haben Jech et al. (2001) u.a. den Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf visuell evozierte Potentiale untersucht. Für die VEP wurden drei Arten von Targetstimuli verwendet: a) horizontale Linien auf der linken Bildschirmhälfte, b) horizontale Linien auf der rechten Bildschirmhälfte und c) horizontale Linien auf dem gesamten Bildschirm. Die Ergebnisse basieren auf Daten von 17 Patienten, vier mussten wegen einer zu hohen Artefaktrate ausgeschlossen werden, ein weiterer wegen einer zu hohen Schläfrigkeit, die es ihm nicht erlaubte, die kognitive Aufgabe zu bewältigen. Die cross-over Studie wurde doppelblind an zwei Tagen durchgeführt. Die Exposition erfolgte mit einem Mobiltelefon, das mit einer speziellen Halterung am rechten Ohr der Patienten fixiert war. Die maximale Sendeleistung betrug 2 W, die SAR gemittelt über 10 g: 0.06 W/kg. Die Expositionsdauer betrug insgesamt 45 min, wobei das 12.5 Minuten dauernde ERP-Experiment 5 min nach Beginn der Exposition startete. Vor Beginn des Experiments durften die Patienten 20 min schlafen. Abgeleitet wurden die im 10-20-System definierten 19 Standardkanäle. Die visuell evozierten Potentiale wurden anhand der Komponenten N2, P3a und P3b der parietalen Ableitungen (P3, Pz und P4, jeweils gegen M1,2 abgeleitet) sowie der occipitalen Ableitung Oz-M1,2 bewertet. Es zeigte sich eine statistisch signifikante ($p < 0.01$) Erhöhung der Positivität des ERP-Komplexes (nur) nach dem Auftreten von Targetstimuli in der rechten Bildschirmhälfte. Zusammen mit dem Ergebnis, dass auch die Reaktionszeiten in diesem Test verkürzt wurden (siehe 4.3), stellen die Autoren fest, dass die von Mobiltelefonen ausgehenden elektromagnetischen Felder die erhöhte Tagesschläfrigkeit bei Narkolepsiepatienten unterdrücken und deren Leistung verbessern können.

Der Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Synchronisation / Desynchronisation der oszillatorischen Hirnaktivität während einer kognitiven Bearbeitung einer auditiven Gedächtnisaufgabe mit Wörtern als Stimuli wurde von der finnischen Arbeitsgruppe um Krause (Krause et al. 2000a, 2002, 2004) untersucht.

Die erste Studie (Krause et al. 2000a) wurde an 16 gesunden jungen Probanden (je acht Männer und Frauen; Durchschnittsalter 23.2 Jahre) durchgeführt. Die Exposition mit einem GSM Mobiltelefon erfolgte einfachblind im cross-over Design auf der rechten Kopfseite. Die Ergebnisse basieren auf Daten von 14 Probanden. Der Einfluss der elektromagnetischen Felder wurde für die Encoding- und die Retrieval-Phase getrennt ausgewertet. Für die Encoding Phase ließ sich kein signifikanter Effekt der Exposition auf die ereigniskorrelierte Synchronisation bzw. Desynchronisation der Hirnaktivität beobachten. Für die Retrieval-Phase zeigte sich dagegen für alle untersuchten Frequenzbänder ein Einfluss der Exposition: 4-6 Hz: Exposition vermindert und verzögert die ERS-Antwort, in der Varianzanalyse mit Messwiederholungen ist EMF allein kein statistisch signifikanter Einflussfaktor, wohl aber der Interaktionsfaktor Zeit x EMF; 6-8 Hz: Verstärkung der ERS und verminderte ERD, EMF allein kein signifikanter Effekt, der Interaktionsfaktor Zeit x EMF ist statistisch signifikant; 8-10 Hz: EMF weist einen statistisch signifikanten Haupteffekt auf, d.h. EMF erhöht die relative Power in diesem Frequenzband, der Interaktionsterm Zeit x EMF ist ebenfalls statistisch signifikant; 10-12 Hz: EMF allein ist kein statistisch signifikanter Einflussfaktor, wohl aber der Interaktionsfaktor Zeit x EMF. Die Autoren schlussfolgern aus ihren Ergebnissen: *„We suggest that whereas the spontaneous EEG might be unaffected by EMF, the exposure to EMF has influence on neural oscillatory systems during cognitive tasks. Brain oscillatory systems associated with memory retrieval seem to be mostly affected“* (Krause et al. 2000a, S. 764).

Die Ergebnisse dieser Studie konnten von den Autoren in einer als Replikationsstudie angelegten doppelblinden cross-over Untersuchung an 24 gesunden jungen Probanden (je 12 Männer und Frauen, Durchschnittsalter 24.3 Jahre) nicht repliziert werden (Krause et al. 2004). Das einzige signifikante Ergebnis war, dass die frühe ERS und die folgende ERD abnehmen. Dieses Ergebnis war in der vorhergehenden Studie nicht signifikant. Alle signifikanten Ergebnisse aus der früheren Studie erwiesen sich in der Replikationsstudie als nicht signifikant. Die Autoren folgern daraus: *„EMF effects on the EEG and on the performance on memory tasks may be variable and not easily replicable for unknown reasons“* (Krause et al. 2004).

Darüber hinaus hat die finnische Arbeitsgruppe die Auswirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf die Bearbeitung einer visuellen Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis untersucht (Krause et al. 2000b). Die Ergebnisse basieren auf Daten von 24 Probanden (je 12 Männer und Frauen) im Alter von 20 bis 30 Jahren, die in einer einfachblinden cross-over Studie mit randomisierter Expositionszuordnung eine visuelle Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis, eine visual sequential letter task (n-back-task) mit drei unterschiedlichen Schweregraden: 0-, 1- und 2-back durchgeführt haben. Es zeigte sich, dass die Unterschiede in den ERD/ERS-Antworten zwischen den Targets und den non-Targets im 6-8 Hz-Frequenzband (besonders in der linken Hemisphäre) unter der EMF-Bedingung kleiner waren. In der 2-back Versuchsbedingung verstärkte EMF die initiale ERS-Antwort im 8-10 Hz Frequenzband, insbesondere bei der Präsentation von non-Targets. In den 0-back und 1-back Versuchsbedingungen erhöhte und verzögerte EMF zusätzlich die später auftretenden ERD-Antworten, insbesondere bei der Präsentation von Targets. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass elektromagnetische

Felder einen Einfluss auf neuronale oszillatorische Systeme bei ca. 8 Hz zu haben scheinen, insbesondere bei mentalen Prozessen, die Aufmerksamkeit erfordern.

In der in Kap. A 4.1 bereits näher beschriebenen Studie von Croft et al. (2002) wurde u.a. der Einfluss des aus einem aktiven Mobiltelefon resultierenden elektromagnetischen Feldes auf evozierte Potentiale bei einer akustischen Diskriminationsaufgabe untersucht. Die Autoren beschreiben unter Exposition veränderte evozierte Potentiale, die durch eine verminderte Abnahme der 4-8 Hz Komponente im Verlauf der Zeit charakterisiert sind sowie durch eine abnehmende globale Response im 12-30 Hz Frequenzband. Im 30-45 Hz Frequenzband wurde ein Anstieg der Response in zwei von neun Hirnregionen beobachtet.

In einer neueren Studien wurde an 45 jungen Probanden (21 Männern und 14 Frauen) im Alter von durchschnittlich 24 (Frauen) bzw. 25 (Männer) Jahren der akute Einfluss elektromagnetischer Felder in den Mobilfunkfrequenzbereichen 450 MHz, 900 MHz und 1800 MHz (je 15 Probanden) auf akustisch evozierte Hirnstammopotentiale (ABR) untersucht. Die Exposition wurde über eine insgesamt 40-minütige Aktivierung der Mobiltelefone erzeugt. Mit Hilfe von Messungen an einem Phantom konnte ein Einfluss der Exposition auf die Messeinrichtung ausgeschlossen werden. Eine Analyse der Latenzen der Wellen I, III und V, sowie der Latenz zwischen den Wellen I und V ergab, dass bei allen drei Expositionsfrequenzen kein Einfluss des elektromagnetischen Feldes auf die frühen evozierten Potentiale zu beobachten war. Die Autoren folgern aus ihren Beobachtungen: „*This implies that commonly used mobile phones do not affect propagation of electrical stimuli along the auditory nerve to auditory brainstem centers*“ (Bak et al. 2003, 201).

Eine ähnliche Studie wurde von Arai et al. 2003 durchgeführt. Sie untersuchten 15 Probanden (10 Männer und 5 Frauen) im Alter von 26 bis 50 Jahren. Für die Exposition wurde ein Mobiltelefon mit dem in Japan verwendeten Frequenzbereich 800 MHz verwendet. Untersucht wurden vor und nach einer 30-minütigen Expositionssituation die Amplituden und Latenzen der Wellen I, III und V der akustisch evozierten Hirnstammopotentiale (ABR), die ABR Erholungsfunktion sowie die Middle Latency Response (MLR). Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass eine 30-minütige Mobilfunkexposition keine kurzfristigen Effekte auf das auditive System hat.

In einer neueren australischen Pilotstudie untersuchten et al. (2004) den Einfluss eines GSM Mobilfunksignals im 900 MHz Frequenzbereich auf akustisch evozierte Potentiale. Da es sich um eine Pilotstudie handelt, ist der Stichprobenumfang mit 12 gesunden rechtshändigen Probanden (acht Frauen und 4 Männer) im Alter von 19 bis 44 Jahren (im Mittel: 23 Jahre) vergleichsweise gering. Die Studie wurde einfachblind im cross-over Design (Abstand zwischen den Untersuchungen 1 Woche) durchgeführt, wobei die Reihenfolge der Exposition randomisiert zugewiesen wurde. Abgeleitet wurden 62 Elektroden, die zu sechs Regionen: links, Mitte und rechts frontal, sowie links, Mitte und rechts central zusammengefasst wurden. Die Versuchsdauer betrug insgesamt 60 Minuten, davon 30 Minuten unter Expositionsbedingung. Die geschätzte SAR betrug 0.87 W/kg am Kopf. Als Zielparame-ter für die Analyse dienten die N100- und die P200-Komponente des evozierten Potentials für die non-Tar-

gets (da sie von kognitiven Prozessen weniger beeinflusst sind) und die N200- und P300-Komponente für Targetstimuli. Wenn nötig, wurden die Daten durch Transformation in eine Normalverteilung überführt. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen für die Amplituden und Latenzen der vier ERP-Komponenten umfasste drei within-subject Faktoren: Exposition, frontal vs. central, links vs. rechts. Nach signifikanten Ergebnissen wurden post hoc t-Tests mit Bonferroni-korrigierten Irrtumswahrscheinlichkeiten durchgeführt. Die Ergebnisse ließen eine statistisch signifikant reduzierte N100-Amplitude sowie eine verringerte N100-Latenz für non-Targets unter Exposition erkennen, beides tendenziell ausgeprägter für die mittlere Hirnregion sowie die rechte Hemisphäre. Die P300-Latenz, die für Targets ausgewertet wurde, war in der Expositionsbedingung verzögert. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass Mobilfunkexposition die neurale Aktivität beeinflussen kann, insbesondere in der Nähe des Mobiltelefons. Sie weisen jedoch darauf hin, dass die Ergebnisse auf Untersuchungen an einer kleinen Stichprobe basieren.

Die in Tab. A2 aufgeführten Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zu mittleren und späten evozierten und ereigniskorrelierten Potentialen sowie ereignisbezogener Synchronisation / Desynchronisation wurden mit einer Ausnahme blind durchgeführt, in zwei Studien sogar doppelblind. Die beiden Studien zu akustisch evozierten Hirnstammpotentialen wurden nicht blind mit einem prä-post Design durchgeführt, was für diese physiologischen Untersuchungen kein Nachteil ist. Bei den untersuchten Stichproben handelte es sich mit einer Ausnahme (Narkolepsiepatienten) um gesunde Erwachsene, vorwiegend jüngeren Alters. In ca. der Hälfte der Studien wurden nur Männer untersucht, in den übrigen Studien Männer und Frauen zu etwa gleichen Anteilen. Nicht untersucht sind bisher Kinder und Jugendliche sowie Personen mit einer selbsteingeschätzten Elektrosensibilität. Für die Mehrheit der Studien bildete die Exposition etwa den normalen Mobiltelefongebrauch bei meist hoher Sendeleistung nach. In der Studie von Croft wurde dagegen mit einer relativ geringen Sendeleistung (geschätzt: 3-4 mW) gearbeitet. Untersucht wurde GSM 900 MHz, lediglich eine Studie bezieht den 1800 MHz Frequenzbereich ein. Die Expositionsdauer definierte sich über die Dauer des jeweiligen EP-, ERP- bzw. ERD/ERS-Experiments, sie variierte zwischen 3 und 30 Minuten. Wie beim spontanen Wach-EEG unterscheiden sich die Studien hinsichtlich der Anzahl der abgeleiteten Kanäle sowie der ausgewerteten Zielparameter, woraus die unter A 4.1. bereits genannten Konsequenzen für zufallsbedingt signifikante Ergebnisse resultieren.

Insgesamt ist die Zahl der Studien, in denen ein signifikanter Effekt der Exposition gezeigt werden konnte, größer als beim spontanen Wach-EEG. Allerdings ist eine inhaltlich konsistente Interpretation dieser Ergebnisse schwierig. Dies wird insbesondere in der explizit als Replikationsstudie angelegten Untersuchung von Krause et al. (2004) deutlich, in der frühere Ergebnisse nicht bestätigt werden konnten. Auch die australische Arbeitsgruppe um Hamblin hat vor, die Ergebnisse ihrer Pilotstudie in einer größeren Studie zu verifizieren. Die Ergebnisse bleiben abzuwarten.

A 4.3 Kognitive Funktionen

Während der Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im vorhergehenden Kapitel auf der Basis der gemessenen Hirnaktivität betrachtet wurde, sollen hier Studien vorgestellt werden, welche

die Frage auf der Ebene des Verhaltens, d.h. von Leistungen in kognitiven Tests untersucht haben. Die hierzu durchgeführten Studien sind in Tab. A3 zusammengestellt.

In einer Untersuchung an n=52 Probanden (je 26 Männer und Frauen) im Alter von 20 bis 38 Jahren wurde der Einfluss eines mit 217 Hz gepulsten 914.2 MHz-Signals auf Gedächtnis- und Aufmerksamkeitsfunktionen überprüft (Gehlen et al. 1996, Spittler et al. 1997). Für die Studiendurchführung wurde ein einfachblindes cross-over Design gewählt. Die Dauer der Exposition betrug ca. 60-70 Minuten. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Gedächtnisfunktion wurde die auditiv-verbale Lern- und Merkfähigkeit herangezogen, die mit dem auditiv-verbale Lerntest (AVLT) aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) überprüft wurde. Aus dem Bereich Aufmerksamkeit wurden die Komponenten Alertness, Vigilanz, Go/NoGo und das Arbeitsgedächtnis überprüft. Insgesamt zeigte eine Analyse der Daten mittels t-Test bzw. Wilcoxon Test für gepaarte Beobachtungen, dass sich die Leistungen in den erhobenen kognitiven Parametern zwischen Exposition und Nicht-Exposition statistisch nicht signifikant unterscheiden.

In der vom Bayerischen Staatsministerium in Auftrag gegebenen Studie (Krafczyk et al. 1998) mussten die Probanden zur Registrierung der Reaktionszeiten die Präsentation eines bestimmten Tonreizes bei der Ableitung der ereigniskorrelierten Potentiale mit einem Tastendruck quittieren. Die Reaktionszeiten zeigten in den unter A 4.1 und A 4.2. bereits ausführlicher beschriebenen Experimenten keine Veränderungen durch Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern.

In einer Studie von Preece et al. (1999) an 36 Probanden wurde der Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf kognitive Funktionen in insgesamt 10 computerbasierten Tests mit Parallelformen (Immediate Word Recall, Picture Presentation, Simple Reaction Time, Digit Vigilance Task, Choice Reaction Time, Spatial Working Memory, Numeric Working Memory, Delayed Word Recall, Delayed Word Recognition und Delayed Picture Recognition) überprüft. Die Stichprobe setzte sich aus zwei Teilstichproben mit je 18 Probanden zusammen. Eine Teilstichprobe umfasste je 9 Männer und Frauen im Alter von 21 bis 60 Jahren. Die zweite Teilstichprobe mit ebenfalls je 9 Männern und Frauen hatten einen Altersrange von 20 bis 28 Jahren. Sie wurde rekrutiert, um u.a. die statistische Power nachträglich zu erhöhen. Als Exposition wurde ein simuliertes GSM-Signal verwendet (915 MHz, moduliert mit 217 Hz). Die Tests wurden in einem einfachblinden cross-over Design mit randomisierter Zuordnung von drei Expositionsbedingungen durchgeführt: Exposition mit einem ungepulsten und einem gepulsten Signal sowie Scheinexposition. Die drei je ca. 25 – 30 min dauernden Testdurchgänge wurden im Abstand von jeweils 48 Stunden durchgeführt. Lediglich in einem der durchgeführten Tests ließ sich ein signifikanter Effekt beobachten. Es handelt sich dabei um den Wahlreaktionstest, in dem unter Exposition ein signifikanter Anstieg der Geschwindigkeit in der Entscheidungsfindung beobachtet wurde. Da diese Ergebnisse von einer finnischen Arbeitsgruppe (Koivisto et al. 2000a) an einer größeren Stichprobe bei Verwendung anderer Tests und einer anderen Exposition zunächst ebenfalls beobachtet wurden, schließt Preece (2002), dass die biologischen Effekte zwar klein, aber dennoch robust sind.

In der unter A 4.2 bereits beschriebenen Studie von Hladky et al. (1999), in der zum einen der Einfluss drei verschiedener „Expositionsbedingungen“ (ohne Telefon, mit einem normalem Telefon und mit einem Mobiltelefon) auf evozierte Potentiale untersucht wurde (Urban et al. 1998), wurde darüber hinaus mit zwei Tests (Subtraktionsaufgabe und Test of Switching Attention) der Einfluss auf Gedächtnis und Aufmerksamkeit untersucht. Obwohl das Telefonieren als solches einen statistisch signifikanten Effekt auf die Fehlerrate im Subtraktionstest hatte, sowie einen statistisch signifikanten Effekt auf die Leistung im Aufmerksamkeitsstest, gab es keinen Unterschied zwischen den „Expositionsbedingungen“ Mobiltelefon und reguläres Telefon.

Freude et al. (1998, 2000, 2002) konnten in den von ihnen durchgeführten Experimenten, die in 4.2 ausführlicher beschrieben sind, auf der Verhaltensebene dagegen keine Effekte von EMF auf kognitive Funktionen beobachten.

In der ebenfalls unter A 4.2 bereits näher beschriebenen Studie von Jech et al. (2001) an Patienten mit Narkolepsie fand sich in einer visuellen Diskriminationsaufgabe für alle Target-Stimuli eine statistisch signifikant verringerte Reaktionszeit.

In einer Pilotstudie an 11 Probanden beiderlei Geschlechts im Durchschnittsalter von 39.1 Jahren hat Maier (2001) den Effekt des von einem GSM-Mobiltelefon (902 MHz) ausgehenden elektromagnetischen Feldes auf kognitive Leistungen bzw. die mentale Regeneration untersucht. Er verwendete die auditive Ordnungsschwelle (OS), die definiert ist als der minimale Zeitabstand, bei dem 1. zwei sequentiell angebotene Reize noch als getrennt-appliziert erkannt werden und 2. die zeitliche Abfolge der Seitenzuordnung (rechts/links bzw. links/rechts), noch fehlerfrei erkannt wird. Die Untersuchung wurde doppelblind im cross-over Design an zwei verschiedenen Tagen bei kontrollierter Tageszeit durchgeführt. Jedes Experiment umfasste eine Basiserhebung von OS-Messdaten, gefolgt von einer 50-minütigen Exposition / nicht-Exposition während einer liegend verbrachten Ruhephase. Nach der Ruhephase, in der die Expositionsbedingung variiert wurde, erfolgte eine erneute Bestimmung der Ordnungsschwelle. Erwähnt sei an dieser Stelle, dass bei dieser Studie eine sehr geringe Leistungsflussdichte von $1\text{mW}/\text{m}^2$ gewählt wurde. Die Dauer der Messung der Ordnungsschwelle betrug jeweils ca. 8 Minuten. Die mittels t-Test für gepaarte Beobachtungen ausgewerteten Daten ergaben einen statistisch signifikanten Unterschied im OS-Zuwachs (vor Ruhephase / nach Ruhephase) zwischen den Expositionsbedingungen. Der unter Exposition - aber nicht unter Scheinexposition - beobachtete Anstieg des Wertes spricht für einen erhöhten kognitiven Zeitbedarf im Test, was eine Verschlechterung der Diskriminationsleistung widerspiegelt. Der Autor kommt somit zu dem Schluss, dass eine unter Exposition verbrachte Ruhepause zu einer reduzierten mentalen Regeneration führt, woraus ein kognitiver Leistungsabfall resultiert, der im Test zu einer Steigerung der Ordnungsschwelle führt. Die Autoren erwähnen, dass die Ruhepause von den Probanden häufig für einen Schlaf genutzt wurde. Leider wurde der Einfluss des Faktors geschlafen ja/nein, der einen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte, in dieser Studie nicht kontrolliert.

Der Effekt hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit (zwei Tests: Serial Subtraction und Verbal Fluency) und die Aufmerksamkeitsspanne (vier Tests: Digit Span Forwards - DSF, Digit Span Backwards - DSB, Spatial Span Forwards - SSF und Spatial Span Backwards - SSB) wurde von Edelstyn und Oldershaw (2002) an 38 Psychologiestudenten im Alter von 20 bis 22 Jahren untersucht. Die Probanden wurden gematcht nach der Baseline-Performance zwei Gruppen zugeordnet, einer Experimentalgruppe, die später exponiert wurde und einer Kontrollgruppe (Parallelgruppendesign). Die Exposition / Scheinexposition erfolgte über ein an das linke Ohr gehaltene GSM-Telefon (900 MHz Trägerfrequenz), die Dauer der Exposition betrug 30 Minuten. Die Tests, die ca. 8 Minuten dauerten, wurden zum einen vor Beginn der Exposition (ohne Telefon) und zum anderen 15 und 30 Minuten nach Testbeginn durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass es zwischen den exponierten und den nicht-exponierten Probanden in drei der sechs kognitiven Tests (DSF, SSB und Serial Subtraction) statistisch signifikante Unterschiede gab, welche die Autoren im Sinne einer begünstigenden Wirkung der elektromagnetischen Felder deuten.

Krause et al. (2000a, 2004) haben in ihren Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf die Bearbeitung einer auditiven Gedächtnisaufgabe neben dem EEG (siehe Kap. A 4.2) auch die Anzahl der falschen Antworten als Zielparameter herangezogen. Während in der früheren Studie kein Unterschied in der Anzahl falscher Antworten zwischen den Expositionsbedingungen zu beobachten war, wurde in der neueren Arbeit ein signifikant höherer Anteil falscher Antworten unter Exposition beobachtet.

Die Ergebnisse spezieller Untersuchungen der finnischen Arbeitsgruppe zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf kognitive Leistungen finden sich bei Koivisto et al. (2000a,b) und Haarala et al. (2003a). In einer Untersuchung an 48 gesunden rechtshändigen Probanden (je 24 Männer und Frauen) im Alter von 18 bis 49 Jahren (Mittel: 26 Jahre) wurde in einem einfachblinden cross-over Design der Einfluss eines mit 217 Hz gepulsten 902 MHz-Feldes auf die Leistung in 12 Reaktionszeittests überprüft. Es zeigte sich, dass unter Exposition die Reaktionszeit in einer einfachen Reaktionszeitaufgabe sowie in einer Vigilanzaufgabe statistisch signifikant reduziert war und dass die Zeit, die zur Lösung mentaler Rechenaufgaben benötigt wurde, ebenfalls signifikant niedriger war. In der Vigilanzaufgabe war darüber hinaus unter der Expositionsbedingung eine signifikant niedrigere Fehlerrate zu beobachten. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass hochfrequente elektromagnetische Felder im Mobilfunkfrequenzbereich einen begünstigenden Effekt auf Gehirnfunktionen haben, insbesondere bei Aufgaben, die Aufmerksamkeit und die Manipulation von Informationen im Arbeitsgedächtnis voraussetzen (Koivisto et al. 2000a).

In einer Untersuchung zur Beeinflussung der Leistung im Arbeitsgedächtnis wurde in einer einfachblinden cross-over Studie an 48 rechtshändigen gesunden Probanden (je 24 Männer und Frauen) im Alter von 18 bis 34 Jahren eine n-back Aufgabe durchgeführt, wobei n von 0 bis 3 variiert wurde (Koivisto et al. 2000b). Die Zuordnung der Expositionsbedingung erfolgte randomisiert. Exponiert wurde mit einem gepulsten (217 Hz) 902 MHz GSM-Signal. Eine Varianzanalyse der logarithmisch transfor-

mierten Reaktionszeiten (es wurden nur Reaktionszeiten für korrekte Antworten herangezogen) mit Exposition (ja/nein), Schwierigkeitsgrad (0 bis 3) und Typ (Target vs. non-Target) als within-subject Faktoren und Expositionsreihenfolge als between-subject Faktor, ließ für die Exposition allein sowie für die Interaktion Exposition und Schwierigkeitsgrad keinen statistisch signifikanten Effekt erkennen. Lediglich die Interaktion Exposition x Schwierigkeitsgrad x Typ erwies sich als signifikant ($p < 0.01$). In einer für Targets und non-Targets getrennt durchgeführten Varianzanalyse erwies sich für die Targets der Interaktionsterm Exposition x Schwierigkeitsgrad als signifikant, was die Autoren dahin gehend deuten, dass der Expositionseffekt nur bei schwierigeren Aufgaben messbar ist. Eine für Aufgaben mit unterschiedlichem Schweregrad getrennt durchgeführte Analyse ergab, dass in der schwierigsten Bedingung (3-back Aufgabe) ein statistisch signifikanter Effekt ($p < 0.05$) im Sinne einer Beschleunigung der Reaktionszeit zu beobachten war, für alle anderen Aufgaben dagegen nicht. Für non-Targets ließ sich kein statistisch signifikanter Effekt der Exposition erkennen. Eine entsprechende Varianzanalyse für die Anzahl der Fehler ergab keine Hinweise auf einen Einfluss der Exposition. Die Autoren schließen aus ihren Ergebnissen, dass hochfrequente elektromagnetische Felder im Mobilfunkfrequenzbereich einen messbaren Einfluss auf die Funktion des Gehirns haben und zwar im Sinne einer Begünstigung kognitiver Prozesse.

Im Jahr 2003 hat die finnische Arbeitsgruppe die Ergebnisse einer Replikationsstudie zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Reaktionszeiten in kognitiven Tests publiziert (Haarala et al. 2003a). Es wurden sechs der Tests aus der früheren Studie (Koivisto et al. 2000a) erneut verwendet und auch die Exposition blieb gleich. Eine Verbesserung der Methodologie ist in einem doppelblinden Versuchsdesign, einer größeren Stichprobe und einem multizentrischen Ansatz zu sehen. Es wurden insgesamt 64 gesunde Probanden (je 32 Männer und Frauen) im Alter von 20 bis 42 Jahren untersucht. Eine Hälfte der Probanden wurde in Finnland untersucht, die andere in Schweden, wobei die schwedischen Probanden signifikant älter waren als die finnischen (24.2 vs. 29.3 Jahre). Insgesamt wurden 9 computerbasierte Tests durchgeführt: Simple Reaction Time Task, eine Two Choice Reaction Time Task, eine Ten Choice Reaction Time Task, eine Subtraction Task, eine Verification Task und eine Vigilance Task sowie drei Aufmerksamkeitstests. Die Tests wurden von jedem Probanden zweimal an verschiedenen Tagen mit einem Abstand von 24 ± 1 h durchgeführt. Die Reihenfolge der Exposition war für die Probanden und das Geschlecht ausbalanciert. Eine MANOVA ergab, dass weder das Zentrum noch die Expositionsbedingung einen signifikanten Effekt auf die Reaktionszeiten aufwiesen. Der Untersuchungstag (erster oder zweiter Tag – unabhängig von der Exposition) und die Aufgabe ließen dagegen einen signifikanten Effekt erkennen. Auch die a posteriori durchgeführten aufgaben- und laborspezifischen ANOVAs ergaben keinen Hinweis auf einen Effekt der Exposition. Auch im Hinblick auf die Fehlerraten in den Tests ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen. Die Autoren bewerten ihre Ergebnisse wie folgt: *„Our results indicate either that EMF has no effect on the cognitive functioning and the reported findings are just statistical noise, or that the EMF effect is so small that it can be detected on a behavioral level only occasionally. That all the statistically significant findings reported so far indicate that EMFs facilitate cognitive functioning, would suggest the latter explanation. However, the variance*

in the within-subject and especially in the between-subject performance is larger than any potential EMF effect on cognitive functions" (Haarala et al. 2003a, S 287).

In der in Kap. A 4.1 und A 4.2 bereits näher beschriebenen Studie von Croft et al. (2002) wurden neben dem Ruhe-EEG und akustisch evozierten Potentialen in einer auditiven Diskriminationsaufgabe auch die Reaktionszeit und die Anzahl der Fehler in dieser Aufgabe als Zielparameter herangezogen. Eine Analyse der Daten ergab, dass weder für die logarithmisch transformierten Reaktionszeiten, noch für die Anzahl der Fehler ein Effekt der Exposition bzw. des Interaktionsfaktors Exposition * Dauer zu beobachten war.

Von der Niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaften (TNO) wurde eine doppelblinde, randomisierte dreifach cross-over Studie zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf das Wohlbefinden und kognitive Funktionen durchgeführt (Zwamborn et al. 2003). Untersucht wurden zwei Gruppen von Personen mit einem jeweiligen Stichprobenumfang von n=36. Die eine Gruppe setzte sich aus Personen (11 Männer und 25 Frauen im Alter von 31 bis 74 Jahren, Mittelwert 55,7 Jahre) zusammen, die subjektiv unter Beschwerden litten, die sie auf eine GSM-Exposition zurückführten. Diese Gruppe wurde über das in den Niederlanden etablierte *Monitoring Network for Environmental Health rekrutiert*, einer non-profit Organisation, bei der sich landesweit Personen melden können, die über Beschwerden klagen, welche sie auf Umweltfaktoren zurückführen. Die andere Gruppe umfasste 22 Männer und 14 Frauen im Alter von 18 bis 72 Jahren (Mittelwert: 46,6 Jahre) ohne entsprechende Symptomatik. D.h. die Vergleichsstichproben unterscheiden sich hinsichtlich der Zusammensetzung nach Alter und Geschlecht. Verglichen wurden vier Versuchsbedingungen: GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, UMTS 2100 MHz und Scheinexposition, wobei Signale von Mobilfunkbasisstationen simuliert wurden. Bei den GSM-Signalen wurden vier aufeinander folgende Zeitschlitze belegt, dies bedeutet ein Tastverhältnis von 50%. Die Spitzenfeldstärke wurde in den Bedingungen mit Exposition zu 1 V/m gewählt.

Es wurden computerbasierte kognitive Tests zu Reaktionszeiten, zum Erinnerungsvermögen, zur visuellen Aufmerksamkeit und zum Dual-Tasking (allgemeine Reaktionszeit und Filtern relevanter Informationen) durchgeführt. Darüber hinaus wurden zwei Fragebögen zum Persönlichkeitsprofil und einer zum Wohlbefinden eingesetzt. Die Dauer der kognitiven Tests betrug 20 Minuten, das Ausfüllen des Fragebogens zum Wohlbefinden dauerte 10 Minuten, ebenso das nur einmalig erfolgte Ausfüllen des Fragebogens zum Persönlichkeitsprofil. Vor Beginn der Versuchsdurchführung mit randomisierter Exposition gab es eine Trainingssitzung mit allen Tests (inklusive Persönlichkeitsfragebogen). Im Folgenden wurde jeder Teilnehmer unter drei der insgesamt vier experimentellen Bedingungen untersucht. In jedem Fall zählte zu den drei Bedingungen die Scheinexposition sowie zwei von drei Bedingungen mit tatsächlicher Exposition. Dieses Vorgehen wurde mit zeitlichen Beschränkungen begründet. Alle Tests (inklusive der Trainingssitzung) fanden an einem Tag statt (je 50% vormittags und nachmittags), wobei zwischen den insgesamt 30 Minuten dauernden Experimentalbedingungen jeweils eine 30 minütige „wash-out“-Phase vorgesehen war. Daraus resultiert eine Gesamtdauer für die Versuchsdurchgänge von 3 Stunden und 40 Minuten. Durch dieses Versuchsdesign reduzierte

sich die Stichprobengröße unter realen Expositionsbedingungen auf $n=24$ im Vergleich zur Scheinexposition mit $n=36$. Die mittels gut dokumentierter Fallzahlplanung ermittelte Stichprobengröße bei einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$ und einer Power von 0.8 von $n=28$ wurde damit in drei der vier Gruppen unterschritten.

Bei simultaner Betrachtung aller vier Gruppen ließen sich für keine der Zielvariablen statistisch signifikante Unterschiede beobachten. Diese Ergebnisse finden sich jedoch leider nur als Fußnoten in den entsprechenden Tabellen mit den Resultaten von a posteriori durchgeführten paarweisen Vergleichen, wobei bei den paarweisen Vergleichen keine Bonferroni-Korrektur der Irrtumswahrscheinlichkeit vorgenommen wurde. Während sich für beide untersuchten Probandengruppen im Wohlbefinden keine Unterschiede zwischen der Scheinexposition und den GSM-Expositionen beobachten ließen, waren beim Vergleich UMTS und Scheinexposition bei Personen mit subjektiv empfundener Elektrosensibilität in allen Teilscores des Fragebogens sowie im Summenscore statistisch signifikante Unterschiede zu beobachten. Für die Referenzgruppe konnte ein entsprechender Unterschied im Gesamtscore sowie für einen der fünf Teilscores beobachtet werden. Im Hinblick auf die kognitiven Leistungen und das Erinnerungsvermögen waren die Ergebnisse heterogener. Insgesamt ließen sich bei der Referenzgruppe mehr statistisch signifikante Ergebnisse (fünf) beobachten als für die Gruppe der Personen mit Elektrosensibilität (drei). Das für die Autoren überraschendste Ergebnis war der für UMTS-Exposition in beiden Gruppen beobachtete Unterschied zur Scheinexposition im Wohlbefinden. Insgesamt waren die Unterschiede klein und bedürfen einer Replikation. Für die kognitiven Tests wurden zwar mehr statistisch signifikante Ergebnisse beobachtet als zufallsbedingt zu erwarten waren, sie sind inhaltlich jedoch schwer zu interpretieren.

In einer Untersuchung an 62 Probanden (33 Männer und 29 Frauen) im Alter von 18 bis 53 Jahren (mittleres Alter: 26,7 Jahre) sind Smythe and Costall (2003) der Frage nachgegangen, ob es einen Effekt hochfrequenter elektromagnetischer Felder (hier hervorgerufen durch ein im 1800 MHz Frequenzbereich betriebenes Mobiltelefon, SAR 0.79 W/kg) auf das Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis in einer einfachen Word Recall Aufgabe gibt. Die Akquisitionsphase dauerte 3 min, es folgte eine 12-minütige Pause, in der die Probanden laut in einer Zeitung lesen mussten, um einer weiteren Einprägung der Wörter durch Wiederholung vorzubeugen. Danach wurden die Begriffe zur Überprüfung des Kurzzeitgedächtnisses abgefragt. Die einfachblind durchgeführte Exposition erfolgte während der Akquisitions- und der nachfolgenden Lese-Phase über insgesamt 15 Minuten. Es gab drei Versuchsbedingungen: kein Telefon, inaktives Telefon und aktives Telefon. Die Probanden wurden in einem Parallelgruppen-Design randomisiert einer dieser Gruppen zugeordnet. In der darauf folgenden Woche wurden die gelernten Wörter unter einer bekannten Nicht-Expositionsbedingung abgefragt. Die Probanden wurden zu dieser Überprüfung des Langzeitgedächtnisses einbestellt, ohne dass sie wussten, welche Aufgabe sie erwartet. Eine geschlechtsspezifische Analyse der Fehlerraten zeigte, dass Männer, die mit einem aktiven Mobiltelefon exponiert wurden, weniger Fehler aufwiesen als nicht exponierte. Diese Beobachtung veranlasst die Autoren zu dem Schluss, dass die Nutzung von Mobiltelefonen kognitive Funktionen beschleunigen kann. Allerdings gilt dies nur für Männer und nur

für das Kurzzeitgedächtnis. Die z.T. etwas unübersichtlich und widersprüchlich dargestellten Ergebnisse geben unter Berücksichtigung des Versuchsdesigns (Parallelgruppen) und der kleinen Fallzahlen jedoch Anlass, die Tragfähigkeit der Aussagen mit Vorsicht zu bewerten.

Ein erster Ansatz, den Einfluss der von Mobiltelefonen ausgehenden elektromagnetischen Felder auf Aufmerksamkeitsprozesse bei Kindern zu untersuchen, findet sich bei Lee et al. (2001). Sie untersuchten 72 Teenager (Schüler einer bestimmten Klassenstufe), von denen 37 Mobiltelefonnutzer waren, 35 Schüler gehörten einer alters- und geschlechts-gematchten Kontrollgruppe an. Die Schüler führten drei Aufmerksamkeitstests durch: den Symbol Digit Modalities Test (SDMT), mit dem geteilte Aufmerksamkeit erfasst werden kann, den Stroop Color Word Test (CST) zur Erfassung der selektiven Aufmerksamkeit und den Trail Making Test (TMT). Während für den SDMT und dem CST keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Testleistung zwischen Mobilfunknutzern und denen ergaben, die kein Mobiltelefon nutzen, waren die Mobiltelefonnutzer in beiden Subtests des Trail Making Test statistisch signifikant schneller. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass elektromagnetische Felder im Mobilfunkfrequenzbereich einen milden begünstigenden Effekt auf Aufmerksamkeitsfunktionen hat. Das Design dieser Studie und daraus resultierend auch deren Aussagekraft im Hinblick auf den Effekt elektromagnetischer Felder weicht deutlich von den bisher beschriebenen experimentellen Studien zu diesem Thema ab, weshalb die Studie nicht in Tab. A3 aufgelistet ist.

In einer Folgestudie sind Lee et al. (2003) der Frage nachgegangen, ob zwischen dem zuvor beobachteten begünstigenden Effekt auf Aufmerksamkeitsfunktionen und der Expositionsdauer ein Zusammenhang besteht. Zu diesem Zweck haben sie 78 Studenten in zwei Gruppen unterteilt, die hinsichtlich des Alters, des Geschlechts, des Ausbildungsgrades und der Gesamtnutzungsdauer von Mobiltelefonen gematcht waren. Die Aufmerksamkeit wurde in dieser Untersuchung mit den beiden Subtests des Trail Making Test (TMTA und TMTB) und dem Sustained Attention to Response Test (SART) überprüft. Die Exposition erfolgte einfachblind in Parallelgruppen, exponiert wurde mit einem GSM 1900 MHz Mobiltelefon. Wegen eines starken Lerneffekts und möglicher mentaler Ermüdung, wurde die Zahl der Versuchsdurchgänge auf zwei begrenzt und die Dauer der Testung auf ca. 60 Minuten limitiert. Im ersten Testdurchgang wurden die Teilnehmer je nach Gruppenzugehörigkeit 25 min exponiert oder nicht (einfachblind). Der zweite Versuchsdurchgang erfolgte nach einer zweiminütigen Pause, in beiden Gruppen ohne Exposition, d.h. die Zuordnung der Versuchsbedingung exponiert / nicht exponiert erfolgte in der Experimentalgruppe nicht randomisiert. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen ergab zwar keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Gruppe (Exposition), wohl aber einen signifikanten Interaktionseffekt, der nahe legt, dass die (lernbedingte) Veränderung der Reaktionszeit im SART zwischen der Experimentalgruppe und der Kontrollgruppe statistisch signifikant unterschiedlich ist. Für den TMT ergab sich kein Hinweis dieser Art. Folgende Schlussfolgerung der Autoren ist auf der Basis der Ergebnisse der statistischen Tests einerseits sowie des Parallelgruppendesigns andererseits mit Vorsicht zu bewerten: *„Participants in the experimental group performed better on one of the two measures of attention only after they had been exposed to the electromagnetic field emitted by the mobile phone for some time. The results seem to suggest that attention func-*

tions may be differentially enhanced after exposing to the electromagnetic field emitted by mobile phones. Furthermore, this transient facilitation effect might be dose dependent“ (Lee et al. 2003, S. 1361).

In einer kürzlich erschienenen Publikation von Hamblin et al. (2004) werden in erster Linie die Ergebnisse einer Studie zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf akustisch evozierte Potentiale beschrieben (vgl. A 4.2), es wurden als Leistungsparameter aber auch die Reaktionszeit auf Targetstimuli und die Fehlerrate in diesem Oddball-Paradigma untersucht. Im Gegensatz zu den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen war in dieser Studie die mittlere Reaktionszeit unter Exposition statistisch signifikant erhöht, die Fehlerrate „accuracy“ wies dagegen keine Unterschiede auf.

Nach der ersten von Lee et al. (2001) publizierte Studie an Kindern haben sich inzwischen zwei weitere Arbeitsgruppen mit dem Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf kognitive Prozesse bei Kindern beschäftigt. Es handelt sich dabei um die finnische Arbeitsgruppe um Haarala und die englische Arbeitsgruppe um Preece. Die Ergebnisse liegen noch nicht in publizierter Form vor. Sie wurden auf dem 5th COST281 MCM and Workshop, der vom 15. bis 19. November 2003 in Budapest stattfand, in einem gemeinsamen Vortrag vorgestellt. Das Abstract kann unter <http://www.cost281.org> im Internet eingesehen werden. Preece und Mitarbeiter haben 36 Kinder im Alter von 10 bis 11 Jahren 10 kognitiven Tests unter drei Expositionsbedingungen (Scheinexposition sowie mittlere Sendeleistungen von 0.025 W und 0.25 W) unterzogen. In einer Pilotstudie an 18 der 36 Kinder wurden die Tests von verschiedenen Untersuchern durchgeführt. Es zeigte sich eine beträchtliche interindividuelle Variation der Testleistungen, die im Zusammenhang mit den Untersuchern standen. Die zweite Gruppe von 18 Kindern wurde von einem einzigen Tester untersucht. Hier fand sich kein Zusammenhang zwischen der kognitiven Leistung und der Expositionsbedingung. Ähnliche Ergebnisse fanden Haarala und Mitarbeiter in einer Studie an je 16 Jungen und Mädchen im Alter von 10 bis 14 Jahren. Unter doppelblinden Versuchsbedingungen wurden die Tests im cross-over Design durchgeführt. Es fanden sich keine Unterschiede in den Reaktionszeiten zwischen den Expositionsbedingungen. In beiden Studien zeigten sich bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen deutlich langsamere Reaktionszeiten.

In den in Tab. A3 aufgeführten Studien zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf kognitive Prozesse wurden mit einer Ausnahme lediglich GSM Signale für die Exposition benutzt. In vier Experimenten wurde der Frequenzbereich 1800 bzw. 1900 MHz verwendet, in allen anderen (ausschließlich oder zusätzlich) der 900 MHz Frequenzbereich. Lediglich in einer Studie wurde darüber hinaus zusätzlich auch ein UMTS Signal (2100 MHz) verwendet. In den meisten Studien wurden Sendeleistungen eingestellt, bzw. SAR-Werte erreicht, die dem Telefongebrauch bei ungünstigen Empfangsverhältnissen entsprechen. In zwei der aufgeführten Experimente kamen sehr schwache Expositionen zum Einsatz. Die TNO-Studie benutzte approximierete Basisstationssignale.

Meist wurden zur Exposition Mobiltelefone in normaler Haltung eingesetzt. Allerdings kamen nur zum Teil Halteeinrichtungen zum Einsatz, die für eine einheitliche Positionierung des Mobiltelefons über die Versuchsdauer und über die Probanden sorgten. Den Publikationen ist nur z.T. zu entnehmen, ob Maßnahmen ergriffen wurden, die eine thermische oder akustische Wahrnehmung des Betriebszustandes des Mobiltelefons durch die Probanden vermeiden können. Dies ist von Bedeutung, da sich GSM Mobiltelefone im Sendebetrieb stärker erwärmen und zum Teil durch parasitäre Effekte leise Geräusche aussenden. Die Expositionsdauer variierte zwischen 4 und 65 Minuten.

Im Hinblick auf das Studiendesign, den zeitlichen Bezug zwischen Exposition und Test sowie die berücksichtigten kognitiven Aspekte und ausgewählten Tests weisen die aufgeführten Studien ausgeprägte Unterschiede auf. Einige Experimente wurden doppelblind durchgeführt, eines nicht blind und die meisten einfachblind, d.h. die Probanden sind über die Expositionsbedingung nicht informiert, wohl aber der Untersucher. Wenige Studien arbeiteten mit Parallelgruppen, die meisten verwendeten ein cross-over Design. Zur Elimination interindividueller Unterschiede ist ein cross-over Design zu bevorzugen, wobei jedoch bei psychometrischen Tests Lerneffekte (statistisch) zu kontrollieren sind.

Die Studien unterscheiden sich auch im Hinblick auf den zeitlichen Bezug zwischen Exposition und Testung. In einigen Experimenten wurde die Testung während der Exposition durchgeführt, in anderen danach. Neben den bereits erwähnten Unterschieden zwischen den Studien erschwert die Vielzahl der verwendeten Tests und deren unterschiedliche Komplexitätsgrade eine Verallgemeinerung der Aussagen. Eine inhaltlich konsistente Interpretation dieser Ergebnisse ist schwierig. Dies wird insbesondere in der als Replikationsstudie angelegten Untersuchung von Haarala et al. (2003a) deutlich, in der frühere Ergebnisse (Koivisto et al. 2000a) nicht bestätigt werden konnten.

A 4.4 Schlaf

Bis zum Ende der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts konnte Schlaf lediglich verhaltensbiologisch als Zustand der Ruhe und aus dem subjektiven Erleben heraus beschrieben werden. Mit der Einführung des Elektroenzephalogramms (EEG) durch den deutschen Psychiater Hans Berger (1929) wurde der Schlaf auf physiologischer Ebene messbar. Es zeigte sich, dass Schlaf eine ganz spezielle dynamische Aktivität des Gehirns ist. Der Übergang vom Wachzustand in den Schlaf ist gekennzeichnet durch eine Umorganisation der neuronalen Funktion in mehreren Stufen. Diese Umorganisation äußert sich u.a. in einer zunehmenden Verlangsamung der Hirnstromaktivität, die in regelmäßigen Abständen durch Phasen von Aktivierung unterbrochen wird, sowie im Auftreten besonderer Potentialmuster, die einen im Vergleich zum Wach andersartigen Zustand signalisieren. Die im EEG nachweisbare unterschiedliche neuronale Aktivität im Schlaf hat zur Unterscheidung von 5 Schlafstadien geführt: der durch schnelle Augenbewegungen (rapid eye movements) gekennzeichnete REM-Schlaf, sowie vier weitere non-REM (NREM) Schlafstadien (NREM1 – NREM4), die auf der Basis des Anteils langsamer und hochamplitudiger Wellen im EEG differenziert werden.

Schlaf ist ein sehr komplexer vom Zentralen Nervensystem gesteuerter biologischer Prozess, der einerseits sensitiv auf externe Einflüsse reagiert (z.B. Lärm) und andererseits exogene Einflüsse und

Stressoren auch weitgehend ausschaltet. Es ist ein Zustand, der im Allgemeinen 6 bis 8 Stunden anhält, so dass der Effekt über einen längeren Zeitraum beobachtet werden kann.

Aus Veränderungen des Schlafes unter Expositionsbedingungen kann nicht unmittelbar auf eine Gefährdung der Gesundheit geschlossen werden. Entsprechende Veränderungen können jedoch externe Einflüsse auf das Zentrale Nervensystem (ZNS) abbilden. Obwohl der Schlaf inter-individuell und auch intra-individuell stark variieren kann, konnten Finelli et al. (2001) zeigen, dass die Muster der spektralen Verteilung des EEG im NREM-Schlaf individuenspezifisch im Sinne eines „Fingerprints“ sind und individuelle Charakteristika der funktionellen Anatomie widerspiegeln.

Drei frühe Arbeiten aus derselben Arbeitsgruppe, die in Übersichten zum Thema Einfluss elektromagnetischer Felder auf den Schlaf häufig zitiert werden, sind die Arbeiten von Reite et al. (1994), Lebet et al. (1996) und Pasche et al. (1996). Diese Arbeiten unterschieden sich insofern von den in Tab. A4 zusammengestellten, als sie ein anderes Expositionssignal benutzen. Es handelt sich um ein amplitudenmoduliertes elektromagnetisches Feld. Die Frequenz dieses Signals beträgt 27.12 MHz, moduliert wird mit einer 42.7 Hz Sinuswelle für 3 Sekunden, gefolgt von einer Pause, deren Dauer eine Sekunde beträgt. Sowohl in den Studien von Reite et al. (1994) und Lebet et al. (1996) an je 52 gesunden Probanden als auch in der Studie von Pasche et al. (1996) an 106 Insomnie-Patienten zeigte sich ein schlaffördernder Effekt der Exposition. Pasche et al. (1996) sehen in der Low Energy Emission Therapy (LEET) eine attraktive Alternative zur medikamentösen Behandlung einer chronischen Insomnie.

Die erste und in entsprechendem Zusammenhang häufig zitierte experimentelle Untersuchung zum Einfluss von EMF im Mobilfunksendefrequenzbereich auf den Schlaf stammt aus dem Schlaflabor der Psychiatrischen Klinik in Mainz (Mann und Röschke 1996). Aus diesem Labor stammen zwei weitere Untersuchungen (Wagner et al. 1998, 2000), deren Ergebnisse ebenso wie die von drei weiteren experimentellen Arbeiten zu diesem Thema aus dem Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Universität Zürich (Borbély et al. 1999; Huber et al. 2000, 2002) sowie Studien von Jech et al. (2001) an Narkolepsiepatienten und von Lebedeva et al. (2001) in Tab. A4 zusammengestellt sind.

In der Untersuchung von Mann und Röschke (1996) an 12 Männern im Alter zwischen 21 und 34 Jahren wurde der Einfluss eines GSM Signals (900 MHz, gepulst mit 217 Hz) auf den Schlaf untersucht. Das Signal wurde durch ein Mobiltelefon erzeugt, das in 40 cm Abstand vom Vertex positioniert war. Die Peak Power betrug 8 W, die durchschnittliche Leistungsflussdichte in 40 cm Abstand 0.5 W/m^2 . Jeder Proband verbrachte drei Nächte im Labor, davon eine Adaptationsnacht und zwei Experimentalnächte. Die Versuchsdurchführung erfolgte einfachblind im cross-over Design, die Zuordnung der Reihenfolge von tatsächlicher und Scheinexposition erfolgte randomisiert. Die Datenauswertung umfasste zum einen eine visuelle Schlafstadienklassifikation und zum anderen die Berechnung von Powerspektralwerten. Im Hinblick auf die aus den Hypnogrammen ermittelten quantitativen Schlafparameter ließen sich eine verkürzte Einschlafzeit und eine verkürzte REM-Schlaf-Dauer beobachten. Eine Analyse der Powerspektralwerte ergab eine reduzierte mittlere EEG-Amplitude im REM-Schlaf.

Aus den Ergebnissen wurde geschlossen, dass EMF-Exposition einen schlafanstoßenden und einen REM-Schlaf supprimierenden Effekt hat.

In einer Nachfolgeuntersuchung, deren Ergebnisse zwei Jahre später publiziert wurden (Wagner et al. 1998), wurde der Effekt eines mit 217 Hz gepulsten 900 MHz Signals mit einer geringeren Leistungsflussdichte (durchschnittlich 0.2 W/m^2 in 40 cm Abstand) untersucht. Exponiert wurde mit einer zirkular polarisierenden logarithmisch-periodischen Flachantenne ($r = 20 \text{ cm}$), die in 40 cm Abstand vom Kissen positioniert war. Untersucht wurden 24 Männer im Alter von 18 bis 37 Jahren mit je drei Untersuchungs Nächten im Labor (Adaptationsnacht und je eine Nacht unter experimentellen Bedingungen mit und ohne Exposition). Die Datenerhebung erfolgte einfachblind im cross-over Design mit randomisierter Zuordnung der Expositionsreihenfolge. In dieser Studie ließen sich die früheren Beobachtungen zwar tendenziell bestätigen, die Unterschiede erreichten jedoch keine statistische Signifikanz. Als mögliche Erklärungen ziehen die Autoren eine im Vergleich zur ersten Studie abweichende Exposition (linear vs. zirkular) sowie eine geringere Leistungsflussdichte (0.2 W/m^2 vs. 0.5 W/m^2) heran.

Schließlich wurde von der Mainzer Arbeitsgruppe noch eine dritte Studie durchgeführt, deren Ergebnisse im Jahr 2000 publiziert wurden (Wagner et al. 2000). In dieser Studie wurden 20 junge Männer im Alter von 19 bis 36 Jahren untersucht. Sie verbrachten zweimal drei aufeinander folgende Nächte im Schlaflabor, wobei die jeweils erste Nacht der Eingewöhnung diente. Der Abstand zwischen den Datenerhebungen betrug mindestens 7 Tage. Die Studie wurde einfachblind im cross-over Design durchgeführt, 50% der Probanden wurden in den Nächten 1 und 2 exponiert, die anderen 50% in den Nächten 3 und 4. Exponiert wurde wie bei Wagner et al. (1998) mit einer zirkular polarisierenden logarithmisch-periodischen Flachantenne, die 40 cm unterhalb des Kissens positioniert war. Die erzeugte Leistungsflussdichte war mit durchschnittlich 50 W/m^2 (in 40 cm Abstand) allerdings deutlich höher als in den vorangehenden Experimenten. Wie in der Studie mit der geringen Exposition (0.2 W/m^2) konnte auch in dieser Studie kein signifikanter Effekt der Exposition auf die aus dem Hypnogramm abgeleiteten Schlafparameter sowie auf die Powerspektralwerte beobachtet werden. Nach Ansicht der Autoren könnte auch hier eine im Vergleich zur ersten Studie abweichende Exposition (zirkular vs. linear) von Bedeutung sein. Zum anderen könnte eine Durchschnittsbildung über je zwei Nächte mit und ohne Exposition einen gewissen Glättungseffekt haben. Denkbar wäre auch, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen Exposition und Effekt gibt, sondern vielmehr einen sogenannten Window-Effekt, d.h. dass nur bei einer bestimmten Exposition ein Effekt zu beobachten ist. Schließlich führen die Autoren an, dass in allen drei Studien eine mögliche Elektrosensitivität der Probanden nicht berücksichtigt wurde. Eine knappe Übersicht über alle drei Studien aus der Mainzer Arbeitsgruppe findet sich bei Mann et al. (2002).

In einer experimentellen Studie aus dem Züricher Schlaflabor konnte dagegen erneut ein schlaffördernder Effekt von EMF (bei linearer Polarisation) nachgewiesen werden (Borbély et al. 1999). Untersucht wurden 24 junge Männer im Alter von 20 bis 25 Jahren. Jeder Proband verbrachte insgesamt fünf Nächte im Schlaflabor: eine Screeningnacht und zwei Experimentalnächte mit jeweils vorhergehender Adaptationsnacht. Zwischen den Experimentalnächten lag mindestens eine Woche Abstand.

Die von der Schweizer Arbeitsgruppe um Kuster eingerichtete Expositionsanlage ermöglichte eine Exposition mit drei senkrecht zur Bettoberfläche linear polarisierten Antennen, die in 30 cm Abstand vom Kopf lokalisiert waren. Als Signal wurde ein mit 217 Hz gepulstes 900 MHz Signal verwendet. Die Exposition erfolgte über einen 8-stündigen Nachtschlaf mit intermittierendem An- und Abschalten in 15-minütigem Wechsel. Das erzeugte Signal approximiert – anders als in den Studien der Mainzer Arbeitsgruppe – ein Basisstationssignal. Die Untersuchung wurde doppelblind mit einem cross-over Design durchgeführt, die Zuordnung der Expositionsreihenfolge erfolgte randomisiert. Ausgewertet wurden neben quantitativen Schlafparametern, die aus einem visuellen Schlafstadienscoring abgeleitet wurden, stadienspezifische Powerspektralwerte. Es zeigte sich, dass der Anteil an Wach nach Schlafbeginn (WASO) unter der Expositionsbedingung signifikant reduziert war, was für einen schlaf-fördernden Effekt des applizierten elektromagnetischen Feldes spricht. Gleichzeitig ließ sich eine erhöhte EEG-Amplitude im NREM-Schlaf, insbesondere zu Beginn der Nacht beobachten.

In einem weiteren Experiment wurde von der Züricher Arbeitsgruppe der Einfluss von Exposition vor Schlafbeginn auf den nachfolgenden Schlaf untersucht (Huber et al. 2000). Die Ergebnisse basieren auf Untersuchungen an 16 jungen Männern im Alter von 20 bis 25 Jahren. Jeder Proband hatte drei Untersuchungstage, die jeweils durch ein einwöchiges Zeitintervall getrennt waren. Die Expositionsbedingung (Exposition der rechten Hemisphäre, Exposition der linken Hemisphäre und Scheinexposition) wurden in einem doppelblinden, cross-over Design randomisiert zugeordnet. Die Exposition erfolgte über zwei planare Antennen, die beidseits des Kopfes in ca. 11 cm Abstand positioniert waren. Verwendet wurde ein mit 217 Hz gepulstes 900 MHz Signal, das ein Basisstationssignal approximiert. In den Nächten, die den Untersuchungstagen vorausgingen, war der Nachtschlaf auf vier Stunden begrenzt. Am Morgen wurde für 30 Minuten exponiert und 10 Minuten nach Ende der Exposition begann eine 3stündige Schlafphase, deren Beginn auf eine feste Zeit am späten Vormittag gelegt wurde. Es zeigte sich, dass die EEG-Amplituden in den ersten 30 Minuten nach Schlafbeginn in den Frequenzbereichen 9.75-11.25 Hz und 12.25-14.25 Hz erhöht waren, woraus geschlossen werden kann, dass eine EMF-Exposition in der Wachphase den nachfolgenden Schlaf beeinflusst. Die beiden bisher erwähnten Studien der Züricher Arbeitsgruppe sind bei Huber et al. (2003) unter besonderer Berücksichtigung der geschätzten SAR-Verteilung noch einmal vergleichend diskutiert. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse dieser beiden Studien findet sich auch bei Graf et al. (2002).

In einer weiteren Studie von Huber et al. (2002) wurden komplette Schlafnächte im Anschluss an eine 30-minütige Exposition vor dem Schlafengehen untersucht. Diese Untersuchung wurde an 16 Männern im Alter von 20 bis 25 Jahren durchgeführt. Sie umfasste drei Untersuchungs-nächte im Abstand von einer Woche mit jeweils vorhergehender Adaptationsnacht. Exponiert wurde wie im Tagschlafexperiment (Huber et al. 2000) mit zwei planaren Antennen, die beidseits am Kopf in einem Abstand von ca. 11 cm positioniert waren. Um thermische Effekte getrennt erkennen zu können, wurden in diesem Experiment neben der Scheinexposition pulsmodierte (pm) und unmodulierte (cw) Signale gleicher mittlerer Leistung verwendet. Mit der Exposition wurde ein approximatives Endgerätesignal erzeugt, die durchschnittliche SAR (10g) betrug 1 W/kg. Die Expositionsbedingung wurde doppelblind in einem

cross-over Design randomisiert zugeordnet, die Schlafaufzeichnung begann 10 Minuten nach Ende einer 30-minütigen Exposition. Die Studie ergab keine signifikanten Effekte auf die aus den Hypnogrammen ermittelten quantitativen Schlafparameter. Hinsichtlich der Powerspektralwerte ließ sich im NREM2-Schlaf für das Frequenzband 12.35 – 13.5 Hz eine signifikante Erhöhung beobachten, nicht jedoch für das cw-Signal. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, dass eine Pulsmodulation des EMF-Signals Voraussetzung für Veränderungen im Schlaf-EEG ist. Im Rahmen der gleichen Studie wurde gezeigt, dass auch eine Veränderung des Wach-EEG vor Schlafbeginn im Sinne einer Erhöhung der Alpha-Power nach Exposition nur bei pulsmoduliertem Signal zu beobachten ist.

Angeregt durch die Untersuchungen von Mann und Röschke (1996) haben Hinrichs und Heinze (1998) an 14 nicht schlafgestörten Probanden (zwei Männer und 12 Frauen) im Alter von 20 bis 28 Jahren eine doppelblinde cross-over Studie zum Einfluss eines mit 1736 Hz gepulsten GSM-1800 Feldes auf den Schlaf durchgeführt. Die Antenne war in ca. 1.4 m Entfernung vom Kopf der Probanden positioniert, die Leistungsflussdichte betrug unter Expositionsbedingung 0.2 mW/cm^2 (2 W/m^2). Das Studiensetup simulierte eine Expositionssituation, wie sie bei einer voll ausgelasteten Basisstation entsteht. Insgesamt wurden pro Proband fünf konsekutive Nächte aufgezeichnet, die erste Nacht diente als Adaptationsnacht, in den folgenden vier Nächten wurde randomisiert zweimal schein- und zweimal tatsächlich exponiert. Weder die visuellen Schlafstadienscorings (Consensus-Scoring von zwei unabhängigen Experten) noch die für verschiedene Schlafstadien getrennt ermittelten Powerspektralwerte (insgesamt 48 Variablen bei Berücksichtigung von acht EEG-Kanälen) ließen in einer Varianzanalyse statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen erkennen.

Erwähnt sei an dieser Stelle eine weitere Studie, deren Ergebnisse zur Publikation eingereicht sind. Es handelt sich um eine Studie aus dem Schlaflabor der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Kiel. Zitiert sind die Ergebnisse unter Fritzer et al. (2000) bei Silny (2000, S. 59). In einem Parallelgruppendesign wurden 20 Männer im Alter zwischen 20 und 50 Jahren randomisiert in eine Expositions- und eine Kontrollgruppe unterteilt. Jeder Proband verbrachte acht Nächte im Schlaflabor. Die Expositionsgruppe wurde nach einer Adaptationsnacht über einen Zeitraum von sieben Nächten mit einem 900 MHz-GSM Feld exponiert. Die Antenne befand sich 30 cm entfernt, die erreichten SAR-Werte werden als weit unterhalb von 2 W/kg angegeben. Das EEG wurde an 15 Positionen abgeleitet, darüber hinaus wurden nicht näher spezifizierte psychologische Tests durchgeführt. Eine Auswertung der Schlafdaten nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales (1968) ließ nach Silny (2000) keinen Effekt der Exposition erkennen.

In der von Jech et al. (2001) an $n=17$ Narkolepsiepatienten durchgeführten Studie wurde u.a. der Einfluss einer 45-minütigen Exposition (Details zur Exposition siehe Kap. 4.3) auf eine mögliche kurze Schlafphase am Tag untersucht. Die Registrierung des EEG startete 15 Minuten nach Ende der 45-minütigen Exposition, d.h. 60 Minuten nach Expositionsbeginn und dauerte insgesamt 20 Minuten. Als Zielparameter wurden die Latenz der Alphawellenextinktion (Intervall bis zum letzten Auftreten von Alpha vor einer mindestens 5 Sekunden dauernden Extinktionsphase), die Thetawellen-Onset Latenz

(Intervall bis zum ersten Auftreten von Theta-Wellen von mindestens 1 Sekunde Dauer), die Schlaf latenz (definiert als Intervall von der Extinktion der Alphawellen bis zum Auftreten von Thetawellen bzw. REM-Schlaf) sowie die Latenz bis zum ersten Auftreten eines K-Komplexes bzw. einer Spindel. In keinem der berücksichtigten Zielparameter zeigte sich ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit von der vorhergehenden Exposition.

In einer russischen Studie wurde in einem cross-over Design an 20 jungen Männern im Alter von 20 bis 28 Jahren der Einfluss einer 8-stündigen Exposition gegenüber einem Mobiltelefon auf manuell gescorte Schlafstadien, die nicht lineare Dynamik (Korrelationsdimension D_2) und die Powerspektralwerte untersucht. Die Expositionsparameter sind in der Publikation von Lebedeva et al. (2001) nicht näher spezifiziert. Abgeleitet wurde das EEG an den Positionen Cz und Pz mit Fz als Referenzelektrode, d.h. eine Auswertung der Schlafstadien nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales (1968), dem heute noch gültigen Standard für manuelle Schlafstadienauswertungen war damit nicht möglich. Es zeigte sich, dass die Schlafstadien keine signifikanten expositionsbedingten Veränderungen aufwiesen. Die Korrelationsdimension D_2 war für beide Kanäle unter Exposition signifikant reduziert, und die Alpha-Power an Pz war unter Exposition statistisch signifikant erhöht. Unter Berücksichtigung von Tendenzen kommen die Autoren zu dem Schluss: *„Hence, the electromagnetic field of a mobile phone affects the sleep structure and reduces slow-wave and REM-stage sleep percentage, which is able to decrease the adaptive reactions of human beings and to impair their state of health as a result of this“* (Lebedeva et al. 2001, S132). Diese Schlussfolgerung – insbesondere im Hinblick auf den gesundheitlichen Effekt - erscheint auf der Basis der vorliegenden statistisch signifikanten Ergebnisse nicht tragfähig.

In allen in Tab. A4 aufgeführten Studien wurden Signale des GSM-Mobilfunks verwendet. Bei Huber et al. (2002) wurde darüber hinaus zur Untersuchung des Einflusses der niederfrequenten Modulation ergänzend ein unmoduliertes Signal genutzt. Die Mehrheit der Studien verwendete tatsächliche oder approximierte Endgerätesignale. Lediglich in zwei Studien aus der Züricher Arbeitsgruppe (Borbély et al. 1999 und Huber et al. 2000) sowie bei Hinrichs (1998) wurden approximierte Basisstationssignale benutzt. Der Unterschied zwischen den Signalen besteht im Wesentlichen im Tastverhältnis. Während beim Endgerät für 1/8 der Zeit Leistung abgestrahlt wird, sind bei den benutzten approximierten Basisstationssignalen die Pausen im Verhältnis zur Gesamtzeit nur kurz. Demzufolge haben Endgerätesignale bei gleicher mittlerer Leistung bzw. gleichen zeitgemittelten SAR-Werten deutlich höhere Spitzenleistungen bzw. Maximalamplituden. Die in den Studien zum Schlaf verwendeten Leistungsflussdichten bzw. SAR-Werte variieren von Expositionen, wie sie in der Nähe von Basisstationen anzutreffen sind, bis zu den beim Telefongebrauch auftretenden hohen Expositionen.

In einigen Studien wurden (z.T. modifizierte) Mobiltelefone zur Exposition benutzt. Teilweise kamen spezielle Expositionsanlagen zum Einsatz, mit denen eine gleichmäßigere Feldverteilung im Kopf erreicht wurde, bzw. bei der Befeldung während des Schlafes auch zeitlich homogenere zu erwartende SAR-Werte. Das Expositions muster variierte von einer 30- bzw. 45-minütigen Exposition vor

Schlafbeginn über eine intermittierend an- und abgeschaltete Expositionsquelle im Verlaufe eines 8-stündigen Nachtschlafes bis zur kontinuierlichen Exposition über die gesamte Schlafdauer.

Die meisten Studien wurden im cross-over Design durchgeführt, wobei einfachblinde oder doppelblinde Protokolle annähernd gleich häufig zum Einsatz kamen. Eine konsistente Interpretation der vorliegenden Ergebnisse ist äußerst schwierig. Die mit Einschränkungen als Replikationsstudien zu wertenden Untersuchungen von Wagner et al. (1998, 2000) konnten die Ergebnisse der Studie von Mann und Röschke (1996) aus demselben Labor nicht bestätigen. Die späteren Studien unterscheiden sich von der ersten durch abweichende Expositionsparameter, die Leistungsflussdichte war einmal leicht geringer und einmal deutlich höher. In den Experimenten der Schweizer Arbeitsgruppe gab es gleichgerichtete Ergebnisse bezüglich eines Einflusses auf die Powerspektralwerte im Spindelfrequenzbereich des NREM2-Schlafes.

Wie die Zusammenstellung der bisher vorliegenden Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf den Schlaf zeigt, sind die Ergebnisse immer noch kontrovers. Dies hat die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. zum Anlass genommen, um gemeinsam mit COST 281 und dem Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg einen Workshop zur Frage „*Can electromagnetic fields used in mobile communications provoke sleep disorders and other cognitive changes?*“ zu veranstalten. Dieser Workshop fand vom 8. – 10. Dezember in Immenstaad statt. Die Abstracts der Beiträge der Experten, die drei Tage intensiv über das Thema diskutiert haben, sind im Internet unter folgender Adresse unter dem Verweis auf den Workshop abzurufen <http://www.cost281.org>.

Fazit der Veranstaltung war, dass durchaus noch Forschungsbedarf in diesem Bereich besteht. Dieser spiegelt sich auch in den Themen der geförderten EMF-Projekte auf nationaler und internationaler Ebene wider (vergl. Kap. A 5).

A 4.5 Regionaler Blutfluss (rCBF) in *in vivo* PET Studien

Mit Hilfe der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) werden auf nichtinvasivem Weg quantitative Untersuchungen physiologischer Funktionen und biochemischer Vorgänge durchgeführt. Hierbei kommen radioaktiv markierte stoffwechselrelevante Moleküle als molekulare Sonden zum Einsatz. Es sind bisher zwei Studien publiziert, in denen diese Methode zur Untersuchung des Einflusses hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf die Funktion des Gehirns in *in vivo* Studien am Menschen zur Anwendung gekommen ist: Huber et al. (2002) und Haarala et al. (2003b).

In der unter A 4.4. bereits näher ausgeführten Studie von Huber et al. (2002) wurde erstmals eine *in vivo* Untersuchung an Menschen zu einem möglichen Einfluss von pulsmodulierter EMF-Exposition, wie sie für das Schlafexperiment verwendet wurde, auf die Gehirnaktivität im Wachzustand von 13 männlichen Probanden im Alter von 20 bis 25 Jahren nach 30-minütiger unilateraler Exposition mittels

PET untersucht. Die PET Untersuchung erfolgte nach einer 10-minütigen Pause. Es zeigte sich, dass die pm-EMF Exposition den relativen Blutfluss (rCBF) ipsilateral im dorsolateralen präfrontalen Cortex erhöhte.

Die zweite publizierte *in vivo* Studie zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf den cerebralen Blutfluss stammt von der finnischen Arbeitsgruppe, die sich auch schon mit dem Einfluss auf kognitive Prozesse ausführlicher beschäftigt hat. Basierend auf den Ergebnissen ihrer früheren Studien postulieren Haarala et al. (2003b), dass der Einfluss von EMF ein unmittelbarer ist. Sie haben deshalb an 14 jungen Männern im Alter von 21 bis 35 Jahren in einem doppelblinden cross-over Design den Einfluss eines mit 217 Hz gepulsten 900 MHz-Signals bei der Durchführung einer Aufgabe zum visuellen Arbeitsgedächtnis auf den regionalen Blutfluss untersucht. Die Untersuchung dauerte insgesamt 90 Minuten, ca. 45 Minuten davon war die Exposition kontinuierlich präsent. Die mittlere Sendeleistung betrug 0.25 W, die SAR 0.993 W/kg gemittelt über 10g. Es zeigte sich eine bilaterale Deaktivierung in den auditiven Cortices, nicht aber in der Region der maximalen EMF-Belastung. Die Autoren diskutieren ihre Ergebnisse zusammenfassend wie folgt: *„The present finding might be caused by the EMF if it is assumed that this area is more susceptible to EMF than the area of maximum exposure in which we failed to find any effects. More likely the present finding is caused by an auditory signal emitted by the battery of the active mobile phone. In short, we could not unequivocally establish a causal relationship between EMF and changes in human rCBF in vivo“* (Haarala et al. 2003b, S. 2022).

Die Studien zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf den regionalen Blutfluss sind hinsichtlich der Aussagekraft vergleichbar mit den Studien zum Einfluss auf das spontane Wach-EEG, evozierte und ereigniskorrelierte Potentiale, kognitive Prozesse und den Schlaf. Die Ergebnisse sind widersprüchlich und dokumentieren weiteren Forschungsbedarf.

A 5 Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem in nationalen und internationalen Forschungsprogrammen

Der Forschungsbedarf zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich ergibt sich zum einen aus den in Kap. A 2 und A 3 dargestellten Reviews sowie zu anderen aus den in Kap. A 4 zusammengestellten Untersuchungsergebnissen. Er spiegelt sich aber auch in den derzeit geförderten bzw. ausgeschriebenen nationalen und internationalen Forschungsprogrammen wider. Bevor im Folgenden die Forschungsförderung und –koordination auf weltweiter, europäischer und nationaler Ebene näher ausgeführt wird, sei an dieser Stelle auf einen Service der Weltgesundheitsorganisation für Wissenschaftler verwiesen. Im Rahmen ihres internationalen EMF-Projekts (siehe A 5.1), hat die WHO eine Datenbank mit Untersuchungen zu biologischen Effekten und gesundheitlichen Risiken von elektromagnetischen Feldern eingerichtet (WHO database), die unter <http://www.who.int/peh-emf/research> abzurufen ist. Dort ist auch die Datenbank des *Institute of Electric and Electronic Engineers* (IEEE database) abrufbar, die mehr Einträge enthält, als die Datenbank der WHO.

A 5.1 Das *International EMF Project* der WHO

Auf internationaler Ebene wird der Forschungsbedarf im Wesentlichen von der WHO definiert. Als Teil ihrer Aufgabe zum Schutz der öffentlichen Gesundheit sowie in Reaktion auf die Bedenken der Öffentlichkeit im Hinblick auf gesundheitliche Effekte, die von einer Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ausgehen, hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 1996 das *International EMF Project* ins Leben gerufen. Aufgabe dieses Projektes ist es, die wissenschaftlichen Hinweise auf mögliche gesundheitliche Konsequenzen einer EMF Exposition im Frequenzbereich 0 bis 300 GHz zu bewerten. In diesem Projekt wird unterschieden zwischen statischer Exposition (0 Hz), extrem niedrigen Frequenzen (ELF, >0 bis 300 kHz), intermediären Frequenzen (IF, > 300 kHz bis 10 MHz) und Radiofrequenzen (RF, 10 MHz bis 300 GHz). Zu den acht spezifizierten Schlüsselaufgaben zählen u.a. die Identifikation von Wissenslücken sowie die Entwicklung und Förderung von Forschungsprogrammen, mit denen die bestehenden Wissenslücken gefüllt werden können. Bis zum Jahr 2007 soll das *International EMF Project* seine Bewertung zum Gesundheitsrisiko abgeschlossen haben. Es wird davon ausgegangen, dass bis zu diesem Zeitpunkt die gegenwärtig geförderten Projekte sowie die geplanten Projekte genügend Resultate liefern, um definitive Aussagen treffen zu können.

Aus einem im Jahr 1997 in Genf abgehaltenen Koordinations-Meeting resultierte die WHO *EMF Research Agenda*, die in periodischen Abständen aktualisiert wird. Eine wesentliche Ergänzung erhielt die Agenda durch den Beitrag eines *ad hoc Komitees* eingeladener Experten vom Juni 2003.

Die *2003 WHO Research Agenda for Radiofrequency Fields* definiert Forschungsansätze mit hoher Priorität, die zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos durch die WHO beitragen sollen. Wissenschaftler sowie nationale Fördereinrichtungen bzw. -institutionen auf Regierungs- und Industriebene sind aufgefordert, sich an dieser Agenda zu orientieren. Die Research Agenda ist im Hinblick auf die Bedeutung der Forschungsansätze für die Bewertung des Gesundheitsrisikos in Teilbereiche untergliedert: Epidemiologie, Laborstudien an Menschen, Laborstudien an Tieren sowie Laborstudien an Zellkulturen, Zellen und zellfreien Systemen. Während die beiden erstgenannten Bereiche sich direkt mit gesundheitsbezogenen Endpunkten beschäftigen, sind Studien an Tieren und Zellen von größerer Bedeutung für die Bewertung von Kausalität und biologischer Plausibilität. In jedem der Teilbereiche sind die Aktivitäten wiederum unterschieden in „overarching issues“, die für einen Forschungsbereich übergreifende Anwendbarkeit haben, „ongoing“, d.h. Studien, die gegenwärtig durchgeführt werden, „short-term or urgent needs“, Forschungsaspekte, die so schnell wie möglich initiiert werden sollten und „long-term or future needs“, womit Studien gemeint sind, von denen nicht erwartet wird, dass sie noch zur Risikobewertung durch die WHO beitragen können, sondern die vielmehr für spätere Reviews von Bedeutung sein werden.

An dieser Stelle sei lediglich der Bereich von Humanstudien näher ausgeführt. Als „overarching issues“ wird in diesem Zusammenhang ausgeführt, dass bei der Planung von Studien insbesondere auf das Design zu achten ist, d.h. dass methodische Fehler zu vermeiden sind, welche die Aussagekraft von Studien in der Vergangenheit eingeschränkt haben. Dies gilt u.a. im Hinblick auf kontrollierte Expositionsbedingungen. Darüber hinaus sollten das Alter der Probanden (Kinder vs. Erwachsene)

sowie zeitliche Variationen des Expositionsmusters berücksichtigt werden. Unter „ongoing“ werden Studien zum Einfluss von RF Exposition auf Reaktionszeiten und Gedächtnisleistungen genannt. Zu den „short-term or urgent needs“ gehören a) eine Replikation und Erweiterung von Studien zum Einfluss von RF Exposition auf den Schlaf (hier wird das vom Bundesamt für Strahlenschutz an uns vergebene Forschungsvorhaben einen Beitrag leisten), b) Studien zum Einfluss von RF Exposition auf Kopfschmerzen unter kontrollierten Laborbedingungen und c) Studien zur Gedächtnisleistung sollten auf Kinder ausgedehnt werden. Unter „long-term or future needs“ werden Studien zur kognitiven Leistungsfähigkeit bei einer Ganzkörper-Erwärmung bzw. einer auf den Kopf begrenzten Erwärmung eingeordnet, wobei insbesondere auf eine gut definierte Methode zu achten ist.

In einer im Jahr 2002 publizierten Arbeit hat Repacholi in einer Übersicht über den gegenwärtigen Stand des *International EMF Project* darauf hingewiesen, dass das größte Forschungsdefizit im Bereich von Laboruntersuchungen an Freiwilligen besteht. Er führt dazu u.a. aus: *„there is a need to investigate:*

- *Psychological effects related to the use of mobile phones as well as measurable changes in blood pressure, brain and cognitive function (including memory or learning), any other effects likely to effect the CNS, reaction times, auditory evoked potentials, EEG, ECG, EKG and others*
-
- *People who claim to show a greater sensitivity to RF fields; hypersensitivity reactions, sleep disturbances, other subjective effects“* (Repacholi 2002, S18 Originalmanuskript).

A 5.2 EMF-Forschungsförderung auf europäischer Ebene

Auf der Ebene der Europäischen Union wurden bzw. werden im 5. Rahmenprogramm acht Projekte mit einem Gesamtmittelvolumen von 10 Millionen EUR gefördert. Im 6. Forschungsrahmenprogramm sind für Koordinationsmaßnahmen insgesamt 1.5 Millionen EUR vorgesehen, eine direkte Förderung von EMF-Projekten ist nicht vorgesehen.

Zu den von der EU geförderten Maßnahmen gehört auch die COST action. COST ist ein Akronym für *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*. Es handelt sich dabei um eine grundlegende Struktur zur Koordination von Forschung auf europäischer Ebene, d.h. es wird keine direkte Forschungsförderung betrieben. Innerhalb von COST gibt es 18 Schwerpunkte (actions), darunter auch die *COST 281 action*, mit dem Titel *Potential Health Implications from Mobile Communication Systems*, die im Jahr 2001 ihre Arbeit aufgenommen hat. An dieser *COST 281 action* nehmen gegenwärtig 24 europäische Länder aktiv teil. Primäres Ziel ist es, zu einem besseren Verständnis gesundheitlicher Risiken zu kommen, die aus sich entwickelnden Technologien erwachsen, insbesondere aus neuen Kommunikations- und Informationstechnologien, die zu einer Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern führen können.

Zu den regelmäßigen Aktivitäten von COST 281 gehört die Organisation von Workshops zu speziellen Themen. Der fünfte COST 281 Workshop, der vom 15.- 16. November 2003 in Budapest stattgefunden hat, stand in direktem thematischen Bezug zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer

Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf das Zentrale Nervensystem: *Mobile Telecommunications and the Brain*. Das Programm und die Abstracts sind auf der Homepage von COST 281 (<http://www.cost281.org>) nachzulesen. Zu erwähnen sei in diesem Zusammenhang noch, dass COST 281 sich auch an der Organisation eines von der Forschungsgemeinschaft Funk (FGF) organisierten Workshops zum Thema *Can electromagnetic fields in mobile communications provoke sleep disorders and other cognitive changes?* beteiligt hat, der vom 7. - 10. Dezember in Immenstaad stattgefunden hat. Das Programm und die Abstracts dieser Veranstaltung sind ebenfalls auf der COST 281 Homepage nachzulesen.

Auf der Veranstaltung in Immenstaad wurden u.a. Studien vorgestellt, die derzeit in der Planungs- bzw. Durchführungsphase sind. Unter dem Aspekt experimenteller Humanstudien im Labor seien hier die von Lowden und Berz vorgestellten Studien erwähnt. In der von Lowden und Åkerstedt geplanten schwedischen Studie, die von der EU gefördert wird, sollen n=60 Probanden im Alter von 20 bis 45 Jahren (50% davon mit Kopfschmerzen und Hautsymptomen als angenommene Folgen von Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern) doppelblind im Hinblick auf die Auswirkungen einer dreistündigen Exposition, wie sie beim Gebrauch von Mobiltelefonen entsteht, untersucht werden. Als Zielparameter sind u.a. polysomnographisch erfasste Schlafparameter, subjektive Angaben zu Hautsymptomen und zur Aufmerksamkeit sowie die Ergebnisse von Reaktionszeittests vorgesehen. In einer früheren Studie aus demselben Labor zum Einfluss eines niederfrequenten elektromagnetischen Feldes (50 Hz) auf den Schlaf fanden Åkerstedt et al. (1999) unter Exposition eine signifikant reduzierte Gesamtschlafzeit, eine signifikant reduzierte Schlafeffizienz sowie einen signifikant reduzierten Tiefschlafanteil.

Berz und Mitarbeiter planen die Durchführung einer Fall-Kontrollstudie zum Einfluss verschiedener elektromagnetischer Felder (GSM 900, UMTS 2000 und WLAN) mit unterschiedlichen Intensitäten (SAR 0.2 und 2.0 W/kg) an ca. 30 gesunden jungen Männern in einem doppelblinden Studiendesign. Als Zielparameter sollen in dieser Studie das EEG, evozierte Potentiale und ein modifizierter Continuous Performance Test (CPT) durchgeführt werden.

A 5.3 Forschungsförderung durch das Bundesamt für Strahlenschutz

Das Bundesamt für Strahlenschutz ist eine organisatorisch selbständige wissenschaftlich – technische Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Am 25. September 2003 fand in Berlin das 2. Fachgespräch des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) zum Thema „Forschungsprojekte zur Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks“ statt. Das BfS setzt auf dieser Basis und unter Berücksichtigung der Ergebnisse des ersten Fachgesprächs im Juni 2001 das *Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm* um. Das *Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm* wird mit insgesamt 17 Millionen EUR gefördert, 8.5 Millionen EUR wurden vom Bundesumweltministerium für die Jahre 2002 bis 2005 zur Verfügung gestellt, die restlichen 50% haben die Mobilfunkbetreiber in ihrer Selbstverpflichtung vom 6. Dezember 2001 zugesagt. Ziel des *Deutschen Mobilfunk Forschungsprogrammes* ist es, nach Ausführungen des Präsidenten des

BfS, Wolfram König, vorhandene Unsicherheiten zu reduzieren, drängende, in der Wissenschaft und in der Öffentlichkeit diskutierte Fragen zu klären und zur sachlichen Aufklärung der Bevölkerung beizutragen.

Das komplexe Themengebiet wird in vier Bereiche untergliedert: Biologie, Dosimetrie, Epidemiologie und Risikokommunikation. Im Vorfeld des Fachgesprächs, an dem Vertreter aus der Politik, Wissenschaft, Wirtschaft, Umwelt- und Verbraucherverbänden teilgenommen haben, wurde die Öffentlichkeit über ein Internetportal an der Diskussion um relevante Forschungsprojekte beteiligt. Sachbezogene Beiträge wurden in der Diskussion berücksichtigt. Insgesamt wurden für den hier interessierenden Bereich Biologie 25 Projekte vorgestellt, acht der Projekte sind bereits vergeben, eines ist in der Vergabe, 12 sind geplant und vier sind Neuvorschläge. Eine detaillierte Auflistung der Projekte findet sich in dem im Internet unter www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de abrufbaren Tagungsbericht von Kreuzer et al. (2003). Unter den 25 gelisteten Studien sind mehrere dem Bereich experimenteller Humanstudien zuzuordnen. Neben dem bereits vergebenen Projekt *Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen*, in dem als Zielparame-ter sowohl der Schlaf, als auch das spontane Wach-EEG, evozierte und ereigniskorrelierte Potentiale sowie kognitive Funktionen untersucht werden sollen, ist für die hier behandelte Thematik insbesondere das in Planung befindliche Projekt „Kurz- und mittelfristige Effekte durch GSM- und UMTS-Signale auf das EEG, die kognitive Leistungsfähigkeit und den regionalen cerebralen Blutfluss“ zu erwähnen.

A 5.4 Forschungsförderung durch die Forschungsgemeinschaft Funk e.V.

Die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. (FGF) ist ein gemeinnütziger Verein, dem Behörden, Dienst-anbieter, Netzbetreiber, Industrie sowie Vereine und wissenschaftliche Einrichtungen als Mitglieder angehören. Die FGF hat sich u.a. zur Aufgabe gemacht, offenen Fragen der biologischen Wirkung elektromagnetischer Felder auf Mensch und Umwelt nachzugehen. In diesem Zusammenhang stehen die von der Forschungsgemeinschaft Funk e.V. veranstalteten Workshops (siehe auch A 5.2). Ein weiteres Ziel der FGF ist eine umfassende Aufklärung der Öffentlichkeit über den Stand der Wissenschaft. Und als drittes schließlich hat die FGF in der Vergangenheit Forschung zu diesem Thema gefördert. Im Jahr 2001 wurden zwei Forschungsprojekte ausgeschrieben: „*Possible effects of mobile phones on central nervous systems in humans*“, dieses Projekt wurde an eine finnische Arbeitsgruppe vergeben, und „*Influence of high-GHz signals on the vegetative nervous system (VNS) and hormone parameters*“, dieses Projekt wurde an ein deutsches universitäres Forschungsinstitut vergeben. Zurzeit gibt es keine aktuellen Ausschreibungen der FGF. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang, dass die FGF im Jahr 2000 eine Studie zum Thema „*Kurz- und Langzeitauswirkungen elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf die Qualität des menschlichen Schlafes und die hieraus resultierende Tagesbefindlichkeit*“ an Prof. Aldenhoff von der Universität Kiel vergeben hat. Die Datenerhebung erfolgte im Jahr 2001, der Abschlussbericht wurde im Jahr 2002 abgenommen, derzeit ist ein Manuskript für eine peer-reviewed Publikation eingereicht. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Kap. A 4 als Ergebnisse von Fritzer et al. (2000) nach Silny (2000) sekundär zitiert.

A 6 Biologische Effekte und gesundheitliche Relevanz

Wie die in Kap. A 4 zusammengestellten Untersuchungen belegen, sind die Ergebnisse zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf das spontane Wach-EEG, auf evozierte und ereigniskorrelierte Potentiale sowie ereigniskorrelierte Desynchronisation / Synchronisation des EEG, auf kognitive Funktionen und auf den Schlaf nicht konsistent. Neben Studien, die keinen Effekt finden konnten, gibt es Studien, die einen Effekt beobachten und statistisch absichern konnten, wobei die Richtung des Einflusses durchaus unterschiedlich sein kann. Allen Studien, in denen ein Effekt beobachtet werden konnte, ist jedoch gemein, dass es sich um einen biologischen Effekt handelt, in keinem Fall kann daraus auf ein bestehendes Gesundheitsrisiko geschlossen werden.

Biologische Effekte sind zunächst messbare Reaktionen des Organismus (bzw. von Teilsystemen des Organismus) auf Reize oder Veränderungen in der Umwelt. Die Fähigkeit zu einer solchen Reaktion war und ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Evolution unserer Spezies. Dieser Adaptabilität des menschlichen Organismus ist es zu verdanken, dass Menschen in ganz unterschiedlichen Biotopen bzw. unter ganz unterschiedlichen Umweltbedingungen erfolgreich existieren können. Die biologische Reaktionsfähigkeit des menschlichen Organismus ist eine unabdingbare Voraussetzung, um auf Veränderungen in der Umwelt adäquat reagieren zu können. Wenn jedoch externe Reize bzw. Veränderungen der Umwelt im biologischen System Veränderungen bzw. physiologische Reaktionen hervorrufen, die außerhalb der physiologischen Variationsbreite liegen, so kann es zu einer gesundheitlich schädigenden Wirkung kommen. Eine gesundheitlich schädigende Wirkung kann somit als die Folge einer biologischen Reaktion definiert werden, die zu einer feststellbaren Beeinträchtigung der Gesundheit oder des Wohlbefindens exponierter Personen führt (World Health Organisation 2002).

Innerhalb des *International EMF Projects* wurde eine eigene Definition für Gesundheitsrisiken entwickelt: „*A health hazard is a biological effect outside the normal range of physiological compensation that is detrimental to health or well-being*“ (Repacholi 2001, S. 324). In dieser Definition ist mit „Effekt“ eine physiologische Reaktion auf die Exposition gemeint. Damit ein biologischer Effekt zu einem Gesundheitsrisiko wird, muss er also außerhalb der normalen Kompensationsmöglichkeit des Organismus liegen (Repacholi 2001).

Gesundheit wird jedoch von der WHO allgemein wie folgt definiert: „*Health is a state of complete physical, mental and social well-being, not merely the absence of disease or infirmity*“ (Repacholi 2001, S. 324). Diese Definition impliziert, dass Gesundheit eine wichtige subjektive Komponente beinhaltet, was insbesondere bei der Bewertung von möglichen Gesundheitsrisiken, die von Mobilfunkbasisstationen ausgehen, berücksichtigt werden muss.

Im Hinblick auf den Schlaf sei ergänzt, dass Schlafstörungen im Sinne einer Insomnie (Mangel an Schlafqualität und/oder Schlafquantität) oder Hypersomnie (exzessive Tagesmüdigkeit, die auf eine ungenügende Nachtschlafdauer zurückzuführen ist) zunächst subjektiv empfundene Beschwerden sind. Zu einer klinisch relevanten Erkrankung werden Insomnien wenn die Beschwerden innerhalb eines Monats mindestens dreimal pro Woche auftreten und zu Einbußen des Wohlbefindens und der

Leistungsfähigkeit am Tag führen. Die Hypersomnie wird zu einer klinisch relevanten Erkrankung wenn die Beeinträchtigung über eine Dauer von mindestens einem Monat nahezu täglich auftritt oder episodisch über einen längeren Zeitraum. Die hypersomnischen Beschwerden müssen so schwerwiegend sein, dass daraus Beeinträchtigungen der beruflichen Leistungsfähigkeit oder Einschränkungen der üblichen sozialen Aktivität und zwischenmenschlichen Beziehungen resultieren. Angesichts dieser Definitionen wird deutlich, dass es derzeit keine Hinweise darauf gibt, dass elektromagnetische Felder im Mobilfunkfrequenzbereich zu klinisch relevanten Schlafstörungen führen.

Bei Verwendung der WHO Definition von Gesundheit, sind (nicht klinisch relevante) Schlafstörungen im Sinne des englischen Begriffs *sleep complaints*, d.h. im Sinne einer subjektiv empfundenen Beeinträchtigung des Schlafes (im Gegensatz zu *sleep disorders*), durchaus als Gesundheitsproblem zu werten. Dem wird in der Forschung zu Effekten von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkfrequenzbereich dadurch Rechnung getragen, dass insbesondere in epidemiologischen Studien neben den klassischen Endpunkten, wie z.B. Krebs, in zunehmendem Maße auch Befindlichkeitsstörungen herangezogen werden. Während in epidemiologischen Studien „Schlafprobleme“ als subjektiv empfundene Beeinträchtigung in der Regel insomnische Beschwerden reflektieren, sprechen einige Befunde experimenteller Schlafstudien im Labor – sofern überhaupt ein Effekt beobachtet wurde – eher für eine schlafanstoßende bzw. schlaffördernde Wirkung (Röscke und Mann 1996, Borbély et al. 1999). Es wird Aufgabe zukünftiger experimenteller Studien im Labor und im Feld sein, diesen vermeintlichen Widerspruch aufzuklären.

A-0 Update zur Literaturübersicht

Seit Erstellung der Literaturübersicht sind weitere Arbeiten zum Thema publiziert worden, die in den folgenden Kapiteln getrennt für den Schlaf und die Gehirnfunktionen am Tag zusammengefasst sind. Eine Übersicht der einzelnen Studien findet sich in den Tabellen A5 bis A8 im Anhang.

A-0 1 Originalarbeiten zu biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem

A-0 1.1 Update Spontanes Wach-EEG

Eine Übersicht der Artikel zum spontanen Wach-EEG findet sich in Tabelle A5.

Papageorgiou et al. (2004) untersuchten den Einfluss von GSM 900 MHz auf die spektrale Leistungsdichte des EEGs bei 19 jungen gesunden Probanden (10 Frauen, 9 Männer, Alter: 23.3 ± 2.2 Jahre) in Hinblick auf Geschlechtsunterschiede. In einem cross-over Design bearbeiteten die Probanden im Abstand von 2 Wochen die akustische Version der Zahlenspannen (Wechsler Gedächtnistest) einmal unter unilateraler Befeldung (rechtes Ohr) und einmal ohne Befeldung in einer jeweils 45 Minuten dauernden Version. Der Ausgangswert im EEG war bei den männlichen Probanden höher. Die Spektrale Leistungsflussdichte nahm unter Exposition bei Männern bei 5 von 15 Elektroden ab, bei Frauen nahm sie bei 4 von 15 Elektroden zu. Weder das Geschlecht noch die EMF Exposition hatten einen Einfluss auf die Gedächtnisleistung im Wechsler Test. Problematisch erscheint bei dieser Studie die äußerst geringe Fallzahl in Bezug auf die Fragestellung „Geschlechtsunterschiede“, die widersprüchlichen Ergebnisse und die fehlende Information zu Verblindung und zur SAR. Außerdem wurde keine Basistestung in Bezug auf die Lernfähigkeit und Lernleistung der Probanden durchgeführt. Hypothesen für den Geschlechtsunterschied fehlen und die Relevanz der beobachteten Unterschiede und Veränderungen für die Gesundheit ist unklar.

Curcio et al. (2005) fanden in einer doppel-blinden Studie eine Zunahme der spektralen Leistungsdichte in Teilfrequenzen des Alpha-Bandes im Wach-EEG unter EMF (mit 217 Hz gepulstes 902.4 MHz Signal) bei 20 jungen gesunden Probanden (10 Frauen, 10 Männer, Alter: 26.4 ± 2.9 Jahre). Es wurden zwei Gruppen mit unterschiedlichen zeitlichen Rahmen- und Expositionsbedingungen verglichen. In der ersten Gruppe wurde ein 7-Minuten Ruhe-EEG bei geschlossenen Augen jeweils *nach* einer 45 Minuten dauernden Basis-Untersuchung, nach einer „EMF-ON Bedingung“ und nach einer „EMF-OFF“-Bedingung analysiert. In der 2. Gruppe waren zwar die 3 Bedingungen (Basis, EMF-ON, EMF-OFF) gleich, allerdings wurde die EEG-Ableitung jeweils bereits während der letzten 7 Minuten der 45 Minuten dauernden Untersuchungszeit durchgeführt. Der o.g. Effekt war während der Exposition stärker als unmittelbar danach. Beide Gruppen durften vor der EEG-Untersuchung nach Belieben Lesen, sich unterhalten, Musikhören oder Ähnliches tun. Die Dauer dieser Aktivitäten war in der ersten Gruppe um 7 Minuten länger als in der zweiten und zusätzlich durch eine Pause unterbrochen, über die keine weiteren Angaben gemacht wurden. Da sowohl die Art als auch die Dauer der Beschäftigung einen Einfluss auf das nachfolgende Ruhe-EEG haben können, wären diese konfundierenden Faktoren zu berücksichtigen gewesen bzw. wäre eine einheitliche Bedingung vor

dem Ruhe-EEG notwendig gewesen. Die Gesundheitsrelevanz der beobachteten Veränderungen ist zusätzlich unklar, was von den Autoren aber auch selbst angemerkt wurde.

Hinrichs und Heinze (2006) untersuchten das Wach-EEG von 27 Personen unter Einfluss eines GSM 1800 MHz Feldes, welches mit vier verschiedenen Modulationsschemata (2 x 217 Hz, 108 Hz, 27 Hz) und Feldstärken (Peak-power: 1/4, 2, 1, 8W) im Abstand von 10mm am Kopf appliziert wurde (SAR pro 10g: 1.22 oder 0.61 W/kg) und unter Scheinexposition. Die Probanden wurden auf einem Stuhl sitzend bei geschlossenen Augen untersucht. Die insgesamt 6 Ableitungen pro Person dauerten je 4 Minuten (inkl. Scheinexposition), dazwischen gab es jeweils eine 3.5 Minuten dauernde Pause. In die Analyse konnten aufgrund von Fluktuationen in der Vigilanz und Artefakten im EEG nur Daten von 18 Personen (11 Frauen, mittleres Alter: 29.7 Jahre) einbezogen werden. Die Powerspektren wurden für 6 Frequenzbänder berechnet. Unter Anwendung einer Multivariaten Varianzanalyse waren nur 5 gering signifikante Differenzen zwischen den Feldbedingungen beobachtbar, die aufgrund der großen Anzahl von untersuchten Variablen (200) bei einem $p=0.05$ als statistisch nicht bedeutsam gewertet wurden. Zusätzlich bildeten diese Variablen keine systematischen Cluster hinsichtlich ihrer Frequenz oder topografischen Verteilung. Die Autoren schlossen daher, dass sich die Powerspektren zwischen den genannten Bedingungen nicht unterscheiden.

In einer doppelblinden cross-over Studie von Croft et al. (2007), die sich am Design von Curcio et al. (2005) orientierte, wurde bei 120 gesunden Probanden (Alter: 18-69 Jahre; 74 Frauen, 46 Männer) im Abstand von einer Woche das Wach-EEG während und nach einer 30 Minuten dauernden Exposition (GSM 895MHz Signal mit 217Hz Pulsmodulation) bzw. Scheinexposition abgeleitet. Die Power im Alphafrequenzband nahm während der EMF-Exposition zu. Dieser Effekt war auf der ipsilateralen Seite über posterioren Regionen am größten. Nach Beendigung der Exposition war die Alpha-Power zwar kontralateral im Vergleich zur ipsilateralen Alpha-Power während der Exposition geringer, es zeigten sich aber keine auf alle Regionen übergreifende Veränderungen. Zum Zeitpunkt der Testungen wurden keine Angaben gemacht, auch nicht, ob die Vigilanz der Personen während der 2x10 Minuten Ruhe-EEG mit offenen Augen kontrolliert wurde.

Regel et al. (2007) untersuchten 24 männliche Probanden (Alter: 22.1 ± 0.4 Jahre) in einer doppelblinden cross-over Studie im Abstand von je einer Woche 3 unterschiedlichen Expositionsbedingungen zugeteilt: GSM 900 MHz, entweder als kontinuierliches Signal oder moduliert (2, 8, 217, 1733 MHz) oder Scheinexposition. Die Untersuchungen fanden nachmittags zwischen 14:45 und 18:00 Uhr statt. Es wurden 2 Antennen im Abstand von 115mm vom Kopf über den Ohren angebracht. Nach einer Baseline-EEG Ableitung absolvierten die Probanden während 30 Minuten dauernder linksseitiger Exposition 3 kognitive Tests je zweimal (einfache Reaktionszeitaufgabe, 2-Fach-Wahlreaktionstest, n-Back Task). Das Wach-EEG (C3-A2), EMG und EKG wurden direkt nach der Exposition, sowie 30 und 60 Minuten nach Ende der Exposition jeweils für 3 Minuten mit offenen und 3 Minuten mit geschlossenen Augen abgeleitet. Die Power im Alpha-Band zwischen 10.5-11.0 Hz nahm 30 Minuten nach pulsmodulierter Exposition in der 3-Minuten Ableitung bei geschlossenen Augen zu. Bei offenen Augen wirkte sich die Art der Exposition nicht aus.

Vecchio et al. (2007) veröffentlichten Daten zum Effekt von EMF eines GSM 900 Handys auf die interhemisphärische Synchronisation des Wach-EEG. Die Probanden wurden in einem doppel-blinden cross-over Design im Abstand von einer Woche einmal GSM- exponiert (902.40 MHz, Pulsmodulation: 217 Hz; maximale Power: 2W) und einmal scheinexponiert. Die Exposition erfolgte ausschließlich linksseitig in 1,5 cm Abstand vom Ohr über ein Handy, welches an einem Helm befestigt wurde und dessen Antenne in ca. 40 mm Entfernung vom Kopf parietotemporal ausgerichtet war. Auf der rechten Seite war zusätzlich ein Handy ohne Akku angebracht. In der Scheinexposition hatten beide Handys keinen Akku. Während der jeweils 45 Minuten dauernden Exposition durften die Probanden im Untersuchungsraum umher gehen und sich mit dem Untersuchungsleiter unterhalten. Die Untersuchungsleiter wurden angehalten, Inhalt und emotionalen Gehalt der Gespräche und die Dauer des Umhergehens für alle Probanden gleichermaßen zu beeinflussen. Das Ruhe-EEG bei geschlossenen Augen wurde bei 10 männlichen Probanden (27.9 ± 4.5 Jahre) für 5 Minuten vor und nach der 45 Minuten dauernden Exposition von 19 Elektroden abgeleitet. Die funktionelle interhemisphärische Konnektivität wurde mittels EEG-Kohärenzanalyse der Powerspektren für Delta (ca. 2-4 Hz), Theta (ca. 4-6 Hz), Alpha 1 (ca. 6-8 Hz), Alpha 2 (ca. 8-10 Hz) und Alpha 3 (ca. 10-12 Hz) zwischen den frontalen, zentralen und parietalen Elektroden-Paaren berechnet. Unter GSM 900-Exposition kam es zu einer Abnahme der ereigniskorrelierten Kohärenzwerte (ERCoh) im Alpha 2- und Alpha 3- Frequenzband in frontalen Bereichen und zu einer Zunahme des ERCoh in Alpha 2 in temporalen Arealen. Die Autoren schließen daraus, dass eine GSM-Exposition einen positiven Effekt auf Verarbeitung akustischer Informationen haben könnte, indem die temporale Synchronisation verbessert wird. Die Abnahme der Synchronisation in frontalen Regionen würde in der Folge entstehen, da sie unter diesen Umständen weniger „gebraucht“ würden. Diese Interpretation ist höchst spekulativ und wurde bisher nicht bestätigt.

A-0 1.2 Update Evozierte Potentiale (EP) und Ereigniskorrelierte Potentiale (ERP)

Zum Bereich Evozierte Potentiale und Ereigniskorrelierte Potentiale konnten acht neue Studien ausfindig gemacht werden, die nachfolgend beschrieben und in Tabelle A6 des Anhangs tabellarisch dargestellt sind.

Maby et al. (2005) untersuchten in einer Studie an 9 gesunden Versuchspersonen (Alter: 25 ± 3 Jahre, 6 weiblich, 3 männlich) und 6 Epilepsie- Patienten (Alter: 32 ± 4 Jahre) in einer einfach-blinden Versuchsanordnung Akustisch Evozierte Potentiale (AEP) unter EMF, von einem 900 MHz Signal generiert, im Vergleich zu keiner Befeldung. Im Design werden zwar insgesamt vier Phasen der Exposition beschrieben (keine, minimal, maximal, minimal), im Artikel wird allerdings lediglich auf einen Vergleich der Phase 1 (=keine Exposition) mit Phase 3 (=maximale Power: SAR= 1.4 W/kg) eingegangen. Die Epilepsie-Patienten durchliefen nur die Phasen 1 und 3. Die Reihenfolge der Expositionsbedingungen war nicht randomisiert. Die Ableitung erfolgte an 32 Elektroden, Angaben zur Expositionsdauer fehlen. Die Analysen der EEG-Parameter (zeitliche und Frequenzbereiche) erfolgte für die Gruppe der Gesunden und der Patienten getrennt. Lediglich bei FP2 kam es in beiden Gruppen zu Veränderungen der Korrelationskoeffizienten zwischen Phase 1 und Phase 3, die aber

von den Autoren elektrophysiologisch nicht interpretiert werden konnten. Abgesehen von der geringen Anzahl an Probanden und Patienten und den widersprüchlichen Ergebnissen könnten die gefundenen Signifikanzen auch rein zufällig entstanden sein, da keine Alpha-Fehler-Korrektur aufgrund multipler Testungen vorgenommen wurde.

In einer weiteren Studie zu akustisch evozierten Potentialen, die allerdings frühere Reizantworten untersuchte, fanden Sievert et al. (2005) keine Effekte eines kontinuierlichen und eines gepulsten Signals auf die absoluten und Inter-Peak Zeiten der akustischen Hirnstammpotentialen. Es wurden 12 Probanden (7 Frauen, 5 Männer) im Alter zwischen 19 und 57 Jahren mittels Klicklauten über Kopfhörer (Brain stem Electric Response Audiometrie, BERA) zuerst ohne Exposition und danach unter Exposition (889.6 MHz) mit einem gepulsten (217 MHz) und darauf folgend mit einem kontinuierlichen Signal stimuliert. Die SAR betrug 1.9mW/g. Die Befeldung erfolgte über zwei Handys, die links und rechts auf Ohrenhöhe an der Rückenlehne eines Lehnstuhls angebracht waren. Die durchschnittliche Expositionsdauer war interindividuell verschieden und lag im Durchschnitt bei ca. 20 Minuten pro Person.

Eine der wenigen Studien, die eine große Anzahl von Probanden mit einem doppel-blinden cross-over Design untersuchten, ist jene von Hamblin et al., die 2006 publiziert wurde. Es wurden 120 Personen (74 Frauen, 46 Männer) im Alter zwischen 18 und 69 Jahren in zwei Durchgängen, im Abstand von einer Woche, einmal unter Sham- und einmal unter Verum- Expositionsbedingung mit einer akustischen und einer visuellen Oddball Aufgabe getestet. Die Exposition erfolgte mit einem 895 MHz Signal (250 mW; SAR 0.11 W/kg) während 30 Minuten. Als Zielparameter wurden die Latenzen und Amplituden der Komponenten N100 und P300 der ereigniskorrelierten Potentiale, sowie die Reaktionszeit erhoben und zwischen den beiden Bedingungen verglichen. Es zeigte sich kein Einfluss auf die erhobenen Parameter. Diese Ergebnisse widersprachen den in der Pilotstudie (Hamblin et al. 2004) gefundenen. Die Autoren führen die nun nicht replizierbaren Effekte auf die größere Anzahl an Probanden (120 vs. 12) und unter Umständen auch auf die kürzere Expositionsdauer (30 min. vs. 60 min.) zurück.

Eine Studie zu Somatosensorisch Evozierten Potentialen (SEP) an 12 gesunden Probanden (7 Frauen, 5 Männer; Alter: 22-50 Jahre), die vor und nach 30 Minuten dauernder Exposition (900 MHz; 270 mW; oder Sham erhoben wurden, zeigte keinen Einfluss der Befeldung auf die Latenz, Amplitude und Refraktärzeit der SEP (Yuasa et al., 2006). Letztere wurde nur bei 7 Probanden erhoben. Die Probanden mussten das Handy selbst an das rechte Ohr halten, wodurch keine konstante Exposition gewährleistet werden konnte. Bei Messungen am Phantom mit unterschiedlichen Positionen wurde eine SAR von 0.054 W/kg gemittelt über 10g erreicht. Es fehlen genauere Angaben zum Design, wie z.B. zeitlicher Ablauf und Verblindung.

Ferreri und Mitarbeiter präsentierten 2006 Daten zum Effekt von EMF von GSM 900 auf die Exzitabilität des Gehirns bei 15 männlichen Probanden (Alter: 20-36 Jahre) unter den gleichen Expositionsbedingungen wie zuvor bei Vecchio et al. (2007) (Kap. A-0 1.1) beschrieben. Vor, direkt im Anschluss und eine Stunde nach der Exposition wurden Motorisch Evozierte Potentiale (MEP) während einer transkraniellen Magnetstimulation (TMS) abgeleitet. Die MEPs wurden getrennt für jede

Hemisphäre aufgezeichnet. Vor jeder Ableitung wurde die Temperatur von beiden Mittelohren erfasst. Direkt nachdem mit GSM 900 exponiert wurde, verändert sich die intrakortikale Exzitabilität der exponierten Hemisphäre im Vergleich zur kontralateralen und scheinexponierten Seite, dahingehend, dass sich die Inhibition während kurzer Intervalle verringerte und die Bahnung verstärkte. Nach einer Stunde wurde das Niveau der Baseline wieder erreicht. Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass EMF bei Patienten mit Veränderungen in der cerebralen Aktivität (Bsp. Epilepsie) sowohl eine schädigende als auch förderliche Wirkung haben könnte.

Krause und Mitarbeiter publizierten 2007 eine weitere Replikationsstudie zu ihren Experimenten, die 2000 und 2004 (Krause et al. 2000a, 2000b, 2004; siehe auch Literaturübersicht A 4.2) veröffentlicht wurden. In einem doppel-blinden Design wurde die ereigniskorrelierte Desynchronisation/Synchronisation (ERD/ERS) bei 72 männlichen Probanden während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben erfasst. Die eine Hälfte der Gruppe (Alter: 23.6 ± 2.38 Jahre) absolvierte einen akustischen Gedächtnistest (Wörter erinnern), die andere (Alter: 22.9 ± 2.4 Jahre) bearbeitete eine visuelle Gedächtnisaufgabe (n-back Task), jeweils unter 3 verschiedenen Expositionsbedingungen: Scheinexposition, kontinuierliches 902 MHz EMF (Power: 0.25 W), mit 217 Hz moduliertes 902 MHz EMF. Alle 3 Expositionen wurden sowohl links- als auch rechtsseitig durchgeführt. Die Antenne war jeweils ca. 20mm entfernt vom Temporallappen positioniert und die SAR betrug 1.1 W/kg gemittelt über 1g. Beim akustischen Gedächtnistest wurden zuerst 24 Wörter präsentiert, die dann aus Sets von bereits bekannten und neuen Wörtern wiedererkannt werden mussten. Pro Expositionsseite wurde das EEG nach dem 10-20 System während dieser Aufgabe für ca. 27 Minuten aufgezeichnet, ein Durchgang dauerte in etwa 54 Minuten (inkl. Fixation und Entfernung der Elektroden). Die visuelle Gedächtnisaufgabe bestand aus vier ca. 10 Minuten dauernden Durchgängen, die sich im Schweregrad unterschieden (siehe Kap. A 4.2). Die Gesamtzeit pro Expositionsseite betrug 80 min (inkl. Fixation und Entfernung der Elektroden). Die EEG-Daten wurden mit non-parametrischen Quade Tests analysiert, die Gedächtnistestparameter mit Varianzanalysen mit Messwiederholungen. Wie auch in den vorangegangenen Studien zeigten sich nur moderate Effekte im Alpha-Frequenzbereich (ca. 8-12 Hz), die jedoch unsystematisch und im Vergleich zu früheren Ergebnissen inkonsistent waren. Die behavioralen Maße wurden durch keine der dargestellten Expositionsbedingungen beeinflusst. Krause et al. (2007) gehen davon aus, dass elektromagnetische Felder nur sehr subtile Effekte auf das Gehirn ausüben, die schwer replizierbar sind und unter Umständen auch durch andere Faktoren wie z.B. Aufmerksamkeit und natürliche Fluktuationen im EEG hervorgerufen werden.

Im Jahr 2006 publizierten Maby et al. (2006) weitere Details ihrer Studie, die bereits 2005 veröffentlicht wurde und zuvor beschrieben wurde (siehe oben). Diesmal wurden Ergebnisse zu den Komponenten N100, P200 und der N1-P2 Komplex der AEP berichtet, die zuerst ohne Exposition und dann unter Exposition mit GSM900 MHz abgeleitet wurden. Die Reihenfolge der Expositionsbedingungen wurde nicht variiert, die Exposition erfolgte einfachblind. Unter Exposition mit einem GSM900- EMF zeigte sich bei den Epilepsie-Patienten eine verlängerte Latenz der N100 im kontralateralen frontalen EEG, während sie bei gesunden Probanden occipital und rechts parietal abnahm, was mit einer Abnahme der Reaktionszeit verbunden war. Die Amplitude der N100 nahm unter EMF bei den Gesunden ab und verringerte sich bei den Epilepsie-Patienten v.a. frontal nahe der

exponierten Seite, was die Autoren in Zusammenhang mit einer Abnahme der Vigilanz brachten. Bei den gesunden Probanden nahm die Amplitude der P200 im frontalen Bereich zu. Es ist kritisch anzumerken, dass die Exposition mit EMF jeweils nach der Kontrollbedingung ohne EMF-Exposition durchgeführt wurde, was zu einer Abnahme der Vigilanz und zu Übungs- bzw. Gewöhnungseffekten geführt haben könnte.

Auch Papageorgiou et al. (2006) veröffentlichten weitere Ergebnisse zur bereits dargestellten Studie (Papageorgiou et al., 2004), diesmal zu akustisch evozierten Potentialen, nämlich zur Komponente P50 der Potentiale, welche prä-attentive Prozesse abbildet und während der Bearbeitung eines Tests zum Arbeitsgedächtnis (Zahlenspanne des Wechsler Gedächtnistests) abgeleitet wurde. Im Abstand von 2 Wochen wurde der Test zum Arbeitsgedächtnis in zufälliger Reihenfolge entweder rechtsseitiger unter Exposition oder im „off Modus“ durchgeführt. Je nachdem, ob ein hohes (3000Hz) oder tiefes Warnsignal (500Hz) zu hören war, mussten die Probanden die nachfolgend akustisch präsentierte Zahlenreihe in derselben Reihenfolge nachsprechen (nach niedrigem Ton) oder in umgekehrter Reihenfolge (nach hohem Ton). Die Anzahl der erinnerten Zahlen unterschied sich weder zwischen der Exposition „on“ und „off“, noch zwischen den Geschlechtern oder zwischen den Reihenfolgen des Nachsprechens (vorwärts- rückwärts). Multivariate Varianzanalysen zeigten unter EMF eine Zunahme der Amplitude der P50 nach niedrigem Warnton bei der Elektrodenposition Fp1 und O1 und eine Abnahme der Amplitude nach hohem Warnton bei Fp1. Ohne Befeldung war die Amplitude nach hohem Warnton ebenfalls geringer. Wie schon unter Papageorgiou et al. (2004) angemerkt, fehlen Informationen zu Verblindung und SAR. Die Veränderungen könnten auch andere Ursachen als die der EMF haben und müssten – wie auch die Autoren meinen - mit einer größeren Anzahl von Versuchspersonen und Aufgaben repliziert werden.

A-0 1.3 Update Kognitive Funktionen

Zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf Kognitive Funktionen wurden 14 neue Studien gefunden, sie nachfolgend besprochen und in Tabelle A7 dargestellt werden.

In einer doppel-blinden Studie von Curcio et al. (2004) wurden 20 junge gesunde Probanden (10 Frauen, 10 Männer, Alter: 26.4 ± 2.9 Jahre) in zwei gleich große Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe wurde 45 Minuten lang *vor* der Testung exponiert (mit 217 Hz gepulstes 902.4 MHz Signal), die zweite über 45 Minuten *während* der Testung. Die Gesamtdauer des Experiments betrug 90 Minuten. Die Testung selbst dauerte ca. 22 Minuten und setzte sich aus vier Tests zusammen, die stets in derselben Reihenfolge vorgegeben wurden: eine akustische Einfachwahlreaktionsaufgabe, ein visueller Durchstreichtest, eine Subtraktionsaufgabe und eine akustische Wahlreaktionsaufgabe. Zusätzlich wurde die Temperatur im linken und rechten Mittelohr in der 1., 22., 45., 67. und in der 90. Minute gemessen. Alle Probanden wurden im Abstand von mindestens 48 Stunden unter 3 Bedingungen untersucht: Baseline, Schein- und GSM-Exposition. Die Probanden wurden linksseitig, mit einem Antennenabstand von 1,5 cm vom Kopf, exponiert. Aus der Beschreibung der Studie geht nicht hervor, ob die Messung auch zusätzlich rechtsseitig durchgeführt wurde. Auf der rechten Seite war zusätzlich ein Dummy-Handy angebracht. Über die Art der Aktivitäten während der ersten 45 Minuten gibt dieser Artikel keine Auskunft, auch nicht darüber, inwiefern die Vigilanz und z.B.

Einschlafen kontrolliert wurden. Da es sich um dieselbe Stichprobe wie bei Curcio et al. (2005) handeln dürfte (siehe Alter, Geschlecht, Ablauf), ist davon auszugehen, dass es sich auch um dieselben Rahmenbedingungen gehandelt haben dürfte, die nicht standardisiert waren. Varianzanalysen zeigten signifikante Abnahmen der Reaktionszeiten im Einfach- und im Wahlreaktionszeittest unter EMF, wobei dieser Effekt deutlicher in der Gruppe zu sehen war, die vor der Testung exponiert worden war. Die Genauigkeit der Bearbeitung wurde durch EMF nicht beeinflusst. Die im Mittelohr gemessene Temperatur war auf der exponierten Seite signifikant höher (+0.15 °C) als auf der nicht-exponierten und erreichte den Höchstwert 25-30 Minuten nach Beginn der Exposition. Die Autoren schließen sowohl für die Bearbeitungsgeschwindigkeit als auch die Temperatur auf einen ähnlichen zeitlichen Verlauf, die beiden Parameter korrelierten allerdings nicht signifikant.

In einer doppel-blinden Studie von Besset et al. (2005) wurde der Einfluss von EMF auf 4 Bereiche der kognitiven Funktionen untersucht: Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeitskapazität, Gedächtnis-funktion und Exekutivfunktionen. 55 Personen (28 Frauen, 27 Männer; Altersmittelwert: 24.3 Jahre, Range: 18-40) wurden in einem Parallelgruppendesign entweder einer Gruppe zugeteilt, die mit 900 MHz, moduliert mit 217 Hz, exponiert wurde (on) oder einer Schienexposition (off). Die Gruppen waren hinsichtlich Alter, Geschlecht und IQ vergleichbar. In der Expositions- und Scheinexpositionsbedingung mussten die Probanden ein aktives/inaktives Handy in der von ihnen bevorzugten Hand konstant am gleichen Ohr halten. Während der 2 Stunden dauernden Exposition/Scheinexposition saßen die Probanden in einem Lehnssessel und sahen einen Film neutralen Inhalts. Jede Versuchsperson wurde an insgesamt 5 Tagen innerhalb von 6 Wochen jeweils von 18:00 bis 20:00 exponiert oder scheinexponiert. Die neuropsychologische Testung wurde zuerst in einer Baseline Messung durchgeführt, zweimal 13 Stunden nach der Exposition/Scheinexposition zwischen 9:00 und 11:00, sowie am letzten Tag (Tag 45) ohne vorangegangene Exposition. Eine zweifache Varianzanalyse für Messwiederholungen mit dem Faktor „Exposition“ (on oder off) und dem Faktor „Phase“ (Baseline, Exposition, Erholungszeit) erbrachte zwar einen Effekt der „Phase“ auf verschiedene Testparameter wie z.B. eine Verbesserung der Reaktionszeit, was als Übungseffekt interpretiert werden kann, zeigte aber keinen Interaktionseffekt zwischen „Exposition“ und „Phase“.

Haarala und Mitarbeiter publizierten 2004 weitere Ergebnisse ihrer Replikationsstudie (Haarala et al. 2003a; siehe auch Literaturübersicht A 1.3) zu Koivisto et al. (2000a,b). Diesmal wurden die Resultate aus dem „n-back Test“ zur Messung des Kurzzeitgedächtnisses präsentiert. Das Studiendesign wurde bereits im ersten Abschnitt beschrieben (siehe auch Tab. A7). Es zeigten sich keine Effekte von 902 MHz (moduliert mit 217Hz) auf die Reaktionszeit und Genauigkeit bei 64 Probanden.

Hinrichs und Heinze (2004) setzten die Magnetencephalographie (MEG) ein, um räumlich-zeitliche Veränderungen der neuronalen Aktivität während des Lernens von 200 Worten unter Exposition und Scheinexposition zu erfassen. 12 Probanden (10 Frauen, 2 Männer, Alter: 18-30, Mittelwert 23.6 Jahre) erlernten 200 Worte, die nacheinander auf einem Monitor präsentiert wurden. Gleichzeitig mussten sie bei jedem Wort entscheiden, ob dieses lebendig oder nicht lebendig ist, und dies mit einer zugeordneten Reaktionstaste beantworten. In einem doppelblinden, cross-over Design wurden alle Probanden einmal einem elektromagnetischen Feld durch ein Handy, welches am linken Ohr

fixiert wurde (1.87 GHz, moduliert bei 217 Hz, Peak Power 1 W), während einer 20-minütigen Entspannungsphase mit anschließender Lernphase (6.6 Min.) ausgesetzt und einmal einer Sham-Bedingung in ausbalancierter Reihenfolge. Nach einer 15 Minuten dauernden Pause mussten die zuvor präsentierten 200 Worte aus 400 (inklusive 200 Distraktoren) Worten wiedererkannt und durch Knopfdruck bestätigt werden. Parallel dazu wurde das MEG abgeleitet. Die Reaktionszeit, die Anzahl der korrekt erkannten alten und neuen Worte, sowie ein Verhältnismaß der korrekten Antworten zur Anzahl der falsch genannten Worte unterschieden sich nicht signifikant zwischen der GSM- und der Sham- Exposition (ANOVA mit Messwiederholung). Obwohl keine statistische Signifikanz erreicht wurde ($p=0.097$), sprechen die Autoren von einem GSM modulierten Effekt auf frühe Komponenten (300-400ms) des ereigniskorrelierten MEGs für das Wiedererkennen alter Wörter. Da die Nomenklatur in der Darstellung der behavioralen Daten wiederholt wechselt bzw. nicht eindeutig ist („Percentage of correctly detected old words =“Hits“ und „Correct rejections“), ist eine Interpretation der Ergebnisse schwierig.

In einer Pilotstudie von Maier et al. (2004) wurden 11 Probanden (Männer und Frauen ohne konkrete Angaben zur Anzahl) im Alter zwischen 23 und 48 Jahren vor und nach Exposition oder Scheinexposition einer auditiven Diskriminationsaufgabe unterzogen. Die Expositions- und Scheinbedingungen fanden in einer jeweils 50 Minuten dauernden Entspannungsphase auf einer Couch statt. Über den Zustand der Vigilanz wurden weder objektive noch subjektive Daten präsentiert. Die Exposition erfolgte doppelblind mit einem Motorola 920 (902 MHz; moduliert mit 217 Hz; Leistungsflussdichte $S=1 \text{ mW/m}^2$), welches 4 cm vom linken Ohr entfernt positioniert wurde. 9 der 11 Probanden zeigten nach Exposition „schlechtere“ Ergebnisse in Form einer verlängerten „Ordnungsschwelle“, die restlichen zwei eine Verbesserung (2-seitige t-Tests). Unter der „Ordnungsschwelle“ wird die kürzeste Zeitspanne verstanden, die notwendig ist, um 2 Stimuli voneinander unterscheiden zu können und korrekt zu bestimmen, auf welcher Seite über Kopfhörer der erste Stimulus zu hören war). In der Beschreibung der Studie wird zwar angegeben, dass alle Versuchspersonen an zwei verschiedenen Tagen einmal vor/nach Sham und einmal vor/nach Exposition getestet wurden, jedoch nicht ob die Reihenfolge ausreichend ausbalanciert wurde und wie groß der Abstand zwischen den Tagen war. Die Reihenfolge der Testung (Übungseffekt) wurde auch in der statistischen Analyse nicht berücksichtigt. Die Autoren schließen aus ihren Ergebnissen, dass neuronale Regenerationsprozesse durch gepulste elektromagnetische Felder beeinflusst werden

Eliyahu et al. (2006) wählten in ihrer Studie zur Wirkung elektromagnetischer Felder auf Kognitive Funktionen vier Aufgabentypen, von denen bekannt ist, dass sie überwiegend eine Gehirnhälfte zur Ausführung beanspruchen: verbale Wiedererkennungsaufgabe (linke Seite), eine räumliche Wiedererkennungsaufgabe (rechte Seite), sowie zwei räumliche „Kompatibilitätstests“ (je nach Stimulus rechte oder linke Seite). An Zielvariablen wurden die Antwortzeiten, sowie der Prozentsatz an falschen Antworten bei 36 männlichen Rechtshändern zwischen 19 und 27 Jahren erhoben. Die Testung mit paralleler Exposition wurde in 2 aufeinander folgenden Durchgängen zu je einer Stunde Dauer, unterbrochen von einer 5-Minuten Pause durchgeführt. Die Exposition erfolgte links, rechts oder als Scheinexposition über zwei Handys, die am linken und rechten Ohr angebracht wurden. Im Expositionsmodus wurde mit 890.2 MHz beaufschlagt mit einer typischen GSM Pulsmodulation mit einem

Tastverhältnis von 1/8 und einer Pulsbreite von 577 μ s. Sowohl die Art der Exposition als auch die Reihenfolge der Tests waren ausbalanciert, die Verblindung war einfach. Bei linksseitiger Exposition wurde eine signifikante Verlangsamung der Reaktionszeit der linken Hand im zweiten Durchgang des Tests zur räumlichen Wiedererkennung registriert. Tendenziell wurde diese Beobachtung auch beim räumlichen Kompatibilitätstest gemacht. In der verbalen Wiedererkennungsaufgabe zeigten sich solche Verlangsamungen nicht im Mittelwert der Reaktionszeit, sondern in den 25. Perzentilen. Bei allen drei Aufgaben kam der Effekt erst im 2. Durchgang zur Wirkung, d.h. nach einer Gesamtexpositionsdauer von ca. 40 Minuten.

Eine doppelblinde, cross-over Studie zum Einfluss von UMTS (1970 MHz) auf vier verschiedene Tests zur visuellen Wahrnehmung bei 58 Probanden (29 Frauen, 29 Männer; Alter: 29.1 \pm 5.1 Jahre) erbrachte keinen Unterschied zwischen den zwei Expositionsbedingungen („High“= 0.63 W/kg; „Low“=1/10 von „High“) und einer Sham-Bedingung (Schmid et al., 2005). Die Exposition erfolgte über eine Kopfhörerhalterung, an der links und rechts ein Handy angebracht wurde. Die Exposition erfolgte ausschließlich links und in zufälliger Reihenfolge. Jede Versuchsperson absolvierte alle vier Tests (Flimmer-Verschmelzungsfrequenz Analysator; Linienvorfolgungstest, Tachistoskopischer Verkehrsauffassungstest Mannheim, sowie eine Kontrastschwellenmessung) unter allen drei Expositionsbedingungen. Zum Schluss wurden in einer Positivkontrolle die letzten drei genannten Tests nur unter Flackerlicht ausgeführt, was im Tachistoskopischen Verkehrsauffassungstest Mannheim und in der Kontrastschwellenmessung zu signifikanten Veränderungen führte. Die statistische Auswertung inkludierte Varianzanalysen mit Messwiederholung für parametrische Daten und Friedmann Tests für non-parametrische Verteilungen und zeigte keinen Unterschied in der Testleistung zwischen den 3 Expositionsbedingungen.

Keetley et al. (2006) testeten 120 gesunde Versuchspersonen (62 Frauen, 58 Männer; Altersmittelwert: 33 \pm 2 Jahre; Range: 18-70 Jahre alt) mit insgesamt 8 neuropsychologischen Tests in einem doppelblinden cross-over Design sowohl unter Exposition als auch unter Scheinexposition. Alle Probanden durchliefen im Abstand von ca. einer Woche zweimal zuerst die gesamte Testbatterie (Dauer: 60 Minuten). Danach erfolgte eine 30-minütige Verumexposition oder Shamexposition am linken Ohr mit einem Antennenabstand von 1.5 \pm 0.5 cm vom Kopf und unter Weiterführung der Exposition wurde die Testbatterie erneut 60 Minuten lang vorgegeben. Zur Vermeidung von Übungseffekten wurden verschiedene Parallelformen der Tests verwendet. Die Reihenfolge der Testvorgabe war zufällig. Da das Handy bei voller Power sowohl Geräusche als auch Erwärmung mit sich brachte, wurde es mit schall-isolierendem Material ausgekleidet und zwischen Kopf und Handy wurde ein 5mm dicker Schaumstoff angebracht. In Voruntersuchungen konnten nur 2 von 19 Personen korrekt feststellen, ob das Handy ein- oder ausgeschaltet war. Fraglich ist, ob diese Vorrichtungen eine Doppel-Verblindung gewährleisten können, denn die Testleiter wurden diesbezüglich nicht untersucht. Dies wäre wichtig gewesen, da fünf der acht Tests Papier-Bleistift-Tests waren und die Probanden in diesen Fällen vom Testleiter instruiert werden mussten. Lediglich 3 Tests wurden am Computer bearbeitet. Insgesamt wurden 18 Variablen in Kovarianzanalysen mit Messwiederholung analysiert. Der Faktor Reihenfolge wurde in die statistische Analyse nicht inkludiert. Erst nach Berücksichtigung der Kovariaten Alter, Geschlecht und Bildung fanden sich unter

Exposition signifikante Veränderungen in 4 Papier-Bleistift-Tests. Die Leistung im Audio-Visuellen Lerntest von Rey verschlechterte sich in 2 Variablen, worauf die Autoren aber in der Diskussion nicht näher eingehen. Beim Zahlenverbindungstest in der Version A kam es zwar auch zu einer Verschlechterung (Verbinden von 25 verschiedenen Zahlen), allerdings in der Version B (Verbinden von Zahlen und Buchstaben) zu einer Verbesserung in der Dauer der benötigten Bearbeitungszeit. Im einfachen Reaktionstest und im Wahlreaktionszeittest nahm der Median der Reaktionszeit unter Befeldung signifikant ab. Es wurden keine Korrekturen für multiples Testen angewendet. Die Autoren schließen aus ihren Ergebnissen, dass EMF zwar einfache Funktionen des Gehirns beeinträchtigen, höhere kortikale Funktionen aber positiv beeinflussen.

In der doppel-blinden cross-over Studie von Regel et al. (2006) nahmen 84 Personen (43 Frauen, 41 Männer) teil, die sich selbst als „sensitiv“ gegenüber EMF bezeichneten sowie 33 „Nicht-sensitive“ (14 Frauen, 19 Männer). Das Alter der Gesamtgruppe lag zwischen 20 und 60 Jahren mit einem Mittelwert von 38.7 ± 10.9 Jahren. Ca. eine Woche nach einer Basistestung fanden im Abstand von jeweils einer Woche die 3 Experimentalbedingungen statt, während der die Probanden unter einer von drei möglichen Expositionsbedingungen (Schein, UMTS 1 V/m, UMTS 10 V/m; SAR: 6.2 ± 1.8 und 620 ± 180 $\mu\text{W/kg}$ für 1 V/m und 10 V/m) sechs verschiedene kognitive Tests bearbeiteten und 4 Fragebogen zur Befindlichkeit und Wahrnehmung der Feldstärke ausfüllten. Die Probanden wurden von hinten auf der linken Körperhälfte mit einer Antenne aus einer Entfernung von zwei Metern während 45 Minuten exponiert. Während dieser Zeit absolvierten sie alle Tests zweimal. Befindlichkeit und Wahrnehmung der Feldstärke korrelierten nicht mit dem aktuellen Expositionslevel. Unter Anwendung von gemischten linearen Modellen und eines Modells in dem der Achsenabschnitt (Intercept) als Zufallsvariable behandelt wurde zeigte sich bei einer Feldstärke von 10V/m in der Gruppe der „Sensitiven“ im 2-Fach-Wahlreaktionstest im Gegensatz zur Sham und zur 1V/m Bedingung keine Abnahme der Bearbeitungsgeschwindigkeit. In der Gruppe der „Nicht-Sensitiven“ nahm die Genauigkeit der Bearbeitung im 1-Back Task unter 10V/m-Exposition ab. Diese Ergebnisse verloren nach Anwendung einer Bonferroni-Korrektur allerdings ihre Signifikanz.

Russo et al. (2006) versuchten mit ihrer doppel-blinden cross-over Studie Ergebnisse anderer Studien, die einen Effekt von GSM auf kognitive Funktionen des Menschen fanden, durch Anwendung der gleichen Tests an einer größeren Stichprobe von 168 Personen zu replizieren. 99 Frauen und 69 Männer (mittleres Alter: 23.5 Jahre) wurden in zwei Durchgängen im Abstand von einer Woche mit vier verschiedenen Aufmerksamkeitstests untersucht. In ausbalancierter Reihenfolge wurde einmal die Hälfte der Personen mit einem gepulsten 888 MHz-GSM Signal befeldet, die andere mit einem kontinuierlichen, und in einem weiteren Durchgang wurden alle scheinexponiert. Die Exposition erfolgte mit einem Handy, welches mittels einer speziellen Haube an der linken oder rechten Kopfhälfte so angebracht wurde, dass die Antenne knapp hinter dem Ohr den Kopf berührte oder „sehr nahe“ am Kopf positioniert war (SAR: 11.2 W/kg). Die Expositionsdauer lag zwischen 35-40 Minuten, ein Testdurchgang dauerte allerdings 50 Minuten. Ungewöhnlich erscheint eine „Aufwärmrunde“ für das Handy von maximal 10 Minuten, welche jeweils vor Beginn der eigentlichen Testung stand, um das Handy nach dem Einschalten „aufzuwärmen“. Während dieser „Aufwärmphase“ bearbeiteten die Probanden 10 Aufgaben des Raven Matrizentests, die jedoch nicht

ausgewertet wurden. Als Zielvariablen wurden die Reaktionszeiten der Tests hinsichtlich der Expositionsbedingungen, der Expositionsseite und des Geschlechts mit einer gemischt faktoriellen Varianzanalyse analysiert. Es zeigten sich keine Effekte der genannten Faktoren auf die Leistung in den vier Aufmerksamkeitstests. Die Angaben zur Expositionsdauer und Expositionsort sind ungenau, die „Aufwärmphase“ lässt an einem „doppelblinden“ Design zweifeln.

In einer weiteren Studie der Arbeitsgruppe um Russo versuchten Cinel et al. (2007) die Studie zu einer auditiven Diskriminationsaufgabe von Maier et al. (2004) mit einer höheren Anzahl von Probanden zu replizieren. Sie untersuchten 168 Probanden, davon waren 114 weiblich und 54 männlich (mittleres Alter: 23 Jahre). Die Aufgabe zur auditiven Ordnungsschwelle wurde in zwei Durchgängen, jeweils zu Beginn und am Ende nach ca. 40 Minuten bearbeitet. Die Probanden mussten in gleicher Weise wie bei Maier et al. (2004) angeben, auf welcher Seite der erste von zwei präsentierten Stimuli zu hören war, während sie entweder rechts oder links exponiert wurden. Die Exposition erfolgte wie zuvor bei Russo et al. (2006) dargestellt. Zwischen den 2 Tests absolvierten die Probanden noch drei Tests zu visueller Aufmerksamkeit und zum Gedächtnis, die nicht Gegenstand dieser Brief Communication sind. Die Datenanalyse erfolgte mit einer gemischt faktoriellen Varianzanalyse. Die Ordnungsschwelle war jeweils zu Beginn einer Session geringer als am Ende, unabhängig davon, ob und wie exponiert wurde. Cinel et al. (2007) konnten damit das Ergebnis von Maier et al. (2004) nicht bestätigen.

Wilen et al. (2006) untersuchten die Auswirkungen von EMF, die von einem GSM 900 MHz Signal generiert wurden, auf psychophysiologische Messgrößen (Herzratenvariabilität, Atmung, lokaler Blutfluss am Finger und elektrodermale Aktivität), sowie auf die Flimmer-Verschmelzungs-Frequenz und das Kurzzeitgedächtnis bei 20 „Elektrosensitiven“ und 20 Kontrollen. Die beiden Gruppen waren in Bezug auf Alter und Geschlecht vergleichbar (je 16 Männer, 4 Frauen, Mittelwert des Alters: 45.4 Jahre vs. 44.9 Jahre). Die Probanden wurden an zwei verschiedenen Tagen getestet, einmal vor und nach Schein- und einmal vor und nach GSM-Befeldung. Die Reihenfolge der Expositionsbedingung war randomisiert. Die Exposition erfolgte einfach-blind und ausschließlich auf der rechten Seite (max. SAR: 1 W/kg), auf der linken Seite wurde eine Dummy-Antenne eingesetzt. Der Abstand der Antennen vom Kopf betrug 8,5 cm. Die Expositionsdauer betrug 30 Minuten, während dieser Zeit sahen die Probanden einen Film. Während des gesamten Experiments erfolgte die Aufzeichnung der psychophysiologischen Parameter. Multivariate Varianzanalysen zeigten bei den „Elektrosensitiven“ unabhängig von der Art der Exposition eine Dominanz des Sympathikus in Form einer höheren Ratio der niedrigen zu hohen Frequenzen in der Herzrate unter Bearbeitung der Tests. In beiden Gruppen wurden weder Effekte der Exposition auf die physiologischen Parameter, noch auf die Flimmer- und Verschmelzungsfrequenz und das Kurzzeitgedächtnis gefunden.

Haarala et al. (2007) präsentierten Daten von 36 männlichen Probanden (Mittelwert des Alters: 23.81 Jahre), die einmal unter GSM 902 MHz mit moduliertem Signal (217 Hz), einmal mit kontinuierlichem Signal und einmal scheinexponiert getestet wurden. Während jeder Expositionsbedingung bearbeiteten die Probanden 9 verschiedene Tests, die bereits in älteren Studien der Arbeitsgruppe zum Einsatz kamen (siehe Literaturübersicht A 4.3: Koivisto et al., 2000a, 2000b, Haarala et al., 2003a, 2004) einmal unter linksseitiger und einmal unter rechtsseitiger Exposition. Die

Gesamttestdauer betrug 90 Minuten, die Testungen unter den drei Expositionsbedingungen wurden jeweils im Abstand von einer Woche durchgeführt. Die Reihenfolge der Bedingungen und Expositionszeiten war ausbalanciert, die Verblindung doppelt. Zur Kontrolle des Effekts der reinen Anwesenheit der Expositionseinrichtung wurden 16 weitere Probanden ohne jegliche technische Ausstattung getestet. Non-parametrische statistische Analysen zeigten keinerlei Einfluss der EMF auf die erhobenen Zielparameter.

In einer weiteren Studie von Regel et al. (2007), deren Design bereits im Update zum spontanen Wach-EEG (vgl. Kap. A-0 1.1) beschrieben wurde, wurden 24 junge männliche Probanden drei verschiedenen Expositionsbedingungen zugeteilt: GSM 900 MHz (kontinuierliches Signal) und moduliert (2, 8, 217, 1733 MHz) und Scheinexposition. Nach einer Baseline-EEG Ableitung wurden die Probanden während 30 Minuten dauernder linksseitiger Exposition je zweimal mit einer einfachen Reaktionszeitaufgabe, einem 2-Fach-Wahlreaktionstest, und einem n-Back Task getestet. Die Befeldung hatte keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit in den Reaktionszeittests. Im n-Back Test nahm die Reaktionszeit unter gepulstem Feld ab. Mit zunehmender Dauer der Exposition (Pulsmodulation) verbesserte sich die Genauigkeit im Test mit der höchsten Anforderung an die kognitive Leistungsfähigkeit (3-Back Task). Die Autoren schlossen daraus, dass sich ein EMF-Effekt entweder erst nach länger dauernder Exposition oder unter höheren kognitiven Anforderungen zeigt und dass dieser Effekt allerdings nicht sehr stark ausgeprägt ist.

A-0 1.4 Update Schlaf

Seit Veröffentlichung der Literaturübersicht sind vier weitere Arbeiten zum Einfluss elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf den Schlaf erschienen, zwei aus deutschen Arbeitsgruppen (Hinrichs et al. 2005; Fritzer et al. 2007), eine aus einer australischen Arbeitsgruppe (Loughran et al. 2005) und eine aus Großbritannien (Hung et al. 2007). Die wichtigsten Charakteristika und Ergebnisse dieser Studien sind tabellarisch im Anhang in Tab. A8 zusammengefasst.

Loughran et al.(2005) untersuchten initial 55 Personen (30 Männer und 25 Frauen) im Alter zwischen 18 und 60 Jahren. Der Ausschluss von Probanden mit Schlafstörungen reduzierte die ursprüngliche Stichprobe um 10% auf 50 auswertbare Studienteilnehmer (27 Männer und 23 Frauen). Das experimentelle Design sah zwei Untersuchungsdurchgänge mit je zwei Nächten (einer Adaptationsnacht und einer Studiennacht) im Abstand von einer Woche vor. Die in einem randomisierten, doppel-blinden cross-over Design applizierte Exposition erfolgte über einen Zeitraum von 30 Minuten, der 20 Minuten vor Schlafbeginn endete. In diesen 20 Minuten wurden die Elektroden zur Registrierung der bioelektrischen Signale angebracht. Zur Auswertung wurden 10 visuell gescorte Schlafparameter sowie Powerspektralwerte der ersten 30 Minuten des NREM-Schlafes ab Schlafbeginn herangezogen. Von den visuellen Auswerteparametern ließ die REM-Schlaflatenz als einziger Parameter eine signifikante Veränderung unter Exposition erkennen. Sie war unter Exposition um 17.6 min ($p= 0.020$) kürzer (90 vs. 107 Minuten). Da die Dauer des REM-Schlafes sich in dieser Studie nicht unterscheidet (Differenz < 1 min) ist die von den Autoren angeführte Überlegung, dass cholinerge Mechanismen hier eine Rolle spielen könnten, eher unwahrscheinlich. Eine Analyse der

Powerspektralwerte ergab eine signifikante Erhöhung im Frequenzbereich 11.5-12.25 Hz zu Beginn des Schlafes. Dieses Ergebnis entspricht früheren Beobachtungen der Schweizer Arbeitsgruppe (siehe Literaturübersicht A 4.4: Borbély et al. 1999, Huber et al. 2000, 2002).

In der von Hinrichs et al. (2005) in Magdeburg durchgeführten Studie wurden 13 neurologisch und psychiatrisch unauffällige Personen im Alter zwischen 20 und 28 Jahren, darunter 12 Frauen, hinsichtlich möglicher Auswirkungen eines simulierten GSM-1800 Basisstationssignals (Fernfeld) untersucht. Die randomisiert und doppel-blind im cross-over Design applizierte Exposition wurde über eine vertikal polarisierte GSM-1800 Antenne vermittelt, die in 1,5 m Abstand vom Kopf der Probanden positioniert war. Es wurde ein Signalgenerator (SME23) der Firma Rohde und Schwarz verwendet. Die mit der Expositionsanlage erzeugte Leistungsflussdichte betrug 2.3 W/m^2 , der über 10g gemittelte SAR-Wert 72 mW/kg . Der Versuch umfasste die polysomnographische Registrierung des Schlafes in fünf konsekutiven Nächten, die erste diente der Adaptation. In den folgenden vier Nächten wurden gepaart in randomisierter Reihenfolge je zwei Nächte mit Sham oder Verum exponiert. Die aufgezeichneten Daten wurden unabhängig von je zwei Experten nach den Regeln von Rechtschaffen und Kales (1968) ausgewertet. Die folgenden Analysen basieren auf dem Konsensuscoring der zwei Experten. Für keinen der 14 aus der visuellen Auswertung abgeleiteten Schlafparameter ließ sich eine statistisch signifikante Veränderung unter GSM-1800 Exposition beobachten. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen ergab keinen signifikanten Effekt für den Einflussfaktor EMF Exposition. Die Ergebnisse dieser Studie, die sich gegenüber den übrigen u.a. dadurch auszeichnet, dass sie als einzige ein GSM 1800 MHz Signal untersucht und dass sie eine relativ schwache Exposition (Leistungsflussdichte, SAR-Wert) untersucht, fassen die Autoren wie folgt zusammen: „*the assumption of sleep disturbances caused by base stations of a GSM 1800 cellular phone network cannot be supported by our results*“ (Hinrichs et al. 2005, S. 190).

In die Studie von Fritzer et al. (2007) in Kiel durchgeführte Studie wurden 20 Männer im Alter zwischen 22 und 37 Jahren mit einer Körperhöhe von $1.80 \pm 0.1 \text{ m}$ eingeschlossen, deren körperliche Untersuchung und medizinische Vorgeschichte unauffällig waren. Diese einfach-blinde Studie unterscheidet sich von anderen in diesem Kontext durchgeführten Studien u.a. dadurch, dass sie nicht im cross-over sondern im Parallelgruppendesign durchgeführt wurde. Allerdings wurden in der Parallelgruppe lediglich Daten zum Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf die Gehirntätigkeit am Tag erhoben, polysomnographische Daten liegen für die Parallelgruppe nicht vor. Die Teilnehmer in den zwei Gruppen wiesen hinsichtlich Alter und Bildungsgrad keine Unterschiede auf. Die Probanden verbrachten acht konsekutive Nächte im Schlaflabor. Die erste Nacht diente der Adaptation. Die Daten der zweiten - ohne Exposition abgeleiteten - Nacht dienten als Baselineinformationen, die dritte Nacht diente der Erfassung von Kurzzeiteffekten und die letzte Nacht (Nacht 8) der Erfassung von Langzeiteffekten. Die Exposition erfolgte über die gesamte Dauer der Nacht. Die polysomnographisch erhobenen Daten wurden visuell nach den Regeln von Rechtschaffen und Kales (1968) ausgewertet. Auf dieser Basis wurden 17 Schlafparameter berechnet. Zusätzlich wurden EEG-Leistungsspektren auf der Basis von jeweils 150 Sekunden artefaktfreier Aufzeichnungen für die Schlafstadien NREM2, NREM3, NREM4 und REM-Schlaf ermittelt. Die Zeitabschnitte wurden aus den ersten zwei Schlafzyklen rekrutiert. Für die Exposition wurde eine reflexionsfreie Umgebung

geschaffen, die GSM 900 MHz Exposition erfolgte mit einer Antennengruppe aus drei kommerziell erhältlichen $\lambda/2$ -Dipolen, die in 30 cm Abstand zum Kopf positioniert wurden. Der Maximalwert der spezifischen Absorptionsrate im Kopf der Probanden betrug 1W/kg bzw. 875 mW/kg gemittelt über 1g (berechnete Werte). Die nach einem Test auf Normalverteilung mit entsprechenden parametrischen bzw. nicht-parametrischen Methoden ausgeführten Tests für abhängige Stichproben ließen bei den 10 mit Exposition untersuchten Probanden im Vergleich zur Baseline-Bedingung weder signifikante Kurzzeit-Veränderungen noch signifikante Langzeit-Veränderungen in den Schlafparametern unter Exposition erkennen. Gleiches gilt für die EEG-Leistungsspektren.

2007 veröffentlichten Hung et al. eine Studie zur Auswirkung elektromagnetischer Felder eines GSM 900 Handys, welches sich entweder im „Gesprächs“- (8 Hz, 217 Hz), im „Zuhör“- (2, 8, 217 Hz) oder im Standby-Modus befand, auf die Schlaflatenz und die EEG-Powerspektren in einer 90 Minuten-Schlafbedingung am Nachmittag. Es wurden 10 männliche Probanden (22 ± 2.7 Jahre; Range: 18-28 Jahre) einfach-blind im Abstand von einer Woche einer der drei genannten Bedingungen um 13:30 für 30 Minuten in liegender Position mit geöffneten Augen ausgesetzt. Der Nachtschlaf vor dem Untersuchungstag wurde durch späteres Zubettgehen auf 6 Stunden begrenzt, was mittels Aktigraphie kontrolliert wurde. Während der Expositionsbedingungen mussten die Probanden alle 3 Minuten ihre subjektive Schläfrigkeit auf der Karolinska Schläfrigkeitsskala angeben. Während aller Expositionsbedingungen stieg die Schläfrigkeit „in ähnlicher Art und Weise“ an, statistisch wurden keine Vergleiche angestellt. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen ergab signifikante ($p=0.03$) Unterschiede in der Schlaflatenz, definiert als mindestens 3 Minuten kontinuierliches Schlafstadium 2. Post-hoc durchgeführte Student-Newman-Keuls Tests zeigten, dass die Schlaflatenz nach dem „Gesprächs-Modus“ signifikant länger (48.8 ± 7.9 min) war als nach dem „Zuhör“-Modus (22.1 ± 6.1 min) oder nach Scheinexposition (23.8 ± 4.6 min), nicht jedoch im Vergleich zum Standby-Modus (32.9 ± 8.5 min). Für die quantitative EEG-Analyse (Frequenzen 1-4Hz) ergab eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen einen signifikanten Effekt ($p=0.033$) für die Interaktion zwischen Exposition und Zeit, wobei insgesamt neun 10-Minutenintervalle unterschieden wurden. Post hoc Helmert Tests für die spektrale Leistungsdichte an der Position F3 zeigten einen signifikanten ($p<0.006$) Anstieg in der Power in den zweiten 10 Minuten nach dem „Zuhör“-Modus und der Scheinexposition, sowie im dritten 10-Minutenzeitraum nach „Standby“-Modus, jedoch nicht nach „Gesprächs“-Modus. Dieser Effekt scheint allerdings nicht verwunderlich, da der Schlafbeginn in die entsprechenden Zeitabschnitte fällt. Auswirkungen auf andere Frequenzbereiche wurden nur in der Diskussion beschrieben, ohne dass sie durch konkrete Daten belegt wurden. Über das EEG während der Exposition wurde keine Aussage getroffen. Die Aktigraphie scheint nicht geeignet, um Schlafrestriktion in ausreichendem Maße zu kontrollieren. Es wurden keine Angaben zu weiteren Schlaf-Parametern gemacht. Anzumerken ist jedoch, dass die Schlafstadienklassifikation (und damit die Ermittlung der Einschlafzeit) nicht auf den schlafmedizinischen Standards von Rechtschaffen und Kales (1968) basierte. Es wurden bipolare EEG-Spuren abgeleitet, wobei offen bleibt auf Basis welcher Spur(en) die Schlafstadienzuordnung erfolgte. Die Schlafstadienklassifikation nach Rechtschaffen und Kales (1968) setzt eine Differenzableitung (C3-A2 oder C4-A1) voraus. Die geringe Anzahl der Probanden und die Einfach-Verblindung beschränken zusätzlich die Aussagekraft dieser Studie.

Insgesamt lassen die bisher vorliegenden Laborstudien zu Auswirkungen elektromagnetischer Felder des Mobilfunks, sofern sie überhaupt Veränderungen der untersuchten Parameter unter Exposition beobachten konnten, allenfalls leichte physiologische Effekte erkennen, die jedoch mit Ausnahme der Erhöhung der Powerspektralwerte im Spindelfrequenzbereich des NREM-Schlafes laborspezifisch sind. Die Ergebnisse der bisher vorliegenden Untersuchungen werden im Kontext der vorliegenden Studie weiter diskutiert (siehe Abschnitt C).

B Beschreibung der Studie

B 1 Ziele der Studie und Begründung

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen, in denen einzelne, z.T. schwach ausgeprägte Effekte von Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkfrequenzbereich im Hinblick auf den Schlaf, das spontane Wach-EEG, evozierte und ereigniskorrelierte Potentiale sowie kognitive Funktionen beobachtet werden konnten (Danker-Hopfe und Dorn 2004a). Deshalb bestand im Sinne des Auftraggebers ein großer Bedarf an Studien zur Verifizierung bzw. Falsifizierung früherer Beobachtungen. Der Ausschreibungstext sah die Untersuchung einer ganzen Reihe von elektrophysiologischen Parametern vor. Es wurden drei Hypothesen ausgewählt, die in erster Linie zu testen waren. Diese Hypothesen ergaben sich aus der als Teil der zu erbringenden Leistung durchgeführten Literaturstudie (Abschnitt A), für alle übrigen zu erhebenden Zielparameter wurde eine Datenanalyse auf deskriptivem Niveau durchgeführt.

Hypothese 1: *Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (GSM 900 und UMTS) ist mit einer Reduktion des REM-Schlaf-Anteils assoziiert.*

Begründung: In entsprechenden Untersuchungen aus dem Schlaflabor der Psychiatrischen Universitätsklinik in Mainz konnte ein (statistisch signifikant) reduzierter REM-Schlaf-Anteil beobachtet werden (Mann und Röschke 1996, Wagner et al. 1998). Diese Beobachtungen konnten in Untersuchungen aus dem Züricher Schlaflabor von A. Borbély nicht bestätigt werden. Vielmehr fanden sich in den Untersuchungen dieser Arbeitsgruppe Auffälligkeiten im NREM-Schlaf.

Hypothese 2: *Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (GSM 900 und UMTS) ist mit einer erhöhten Amplitude im Spindelfrequenzbereich im NREM-Schlaf assoziiert.*

Begründung: Eine entsprechende Beobachtung konnte in verschiedenen Experimenten der Züricher Arbeitsgruppe beobachtet werden (Borbély et al. 1999, Huber et al. 2000, 2002). Während also bei der Mainzer Arbeitsgruppe in erster Linie Effekte auf den REM-Schlaf zu beobachten sind, werden von der Züricher Arbeitsgruppe primär Effekte auf den NREM-Schlaf beschrieben. In dieser Studie ist deshalb von einem dritten unabhängigen Labor zu überprüfen, welche der Ergebnisse der beiden Arbeitsgruppen zu replizieren sind, sofern überhaupt Effekte beobachtet werden können.

In der vorliegenden Studie wurde der Schlaf als Modell für die Untersuchung eines möglichen Einflusses von elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks auf die Gehirnaktivität herangezogen. Obwohl auch der Schlaf ein Zustand ist, in dem das Gehirn unterschiedliche Aktivitätsniveaus aufweist, ist dieser Zustand im Vergleich zum Wachzustand relativ homogen. So sind insbesondere exogene Einflussfaktoren wie Motivation, Grad der Müdigkeit, Stress, Persönlichkeitsfaktoren, Umgebungsreize, Ablenkungsreize, Stimmung und/oder Befindlichkeit weitestgehend ausgeschaltet.

Der Schlaf ist daher in besonderem Maße geeignet, um einen möglichen Einfluss auf die neuronale Aktivität zu untersuchen.

Hypothese 3: *Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (GSM 900 und UMTS) während einer visuellen Folgereaktion ist mit einer Reduktion der Amplitude des langsamen Potentials (LP) in den zentralen und parieto-temporo-occipitalen Hirnregionen assoziiert.*

Begründung: In einigen Untersuchungen, die von Mitarbeitern der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin durchgeführt wurden (Freude et al. 1998, 2000, 2002), konnte wiederholt gezeigt werden, dass unter Exposition mit einem GSM 900 MHz-Signal, wie es beim Mobilfunk verwendet wird, in einer visuellen Folgereaktionsaufgabe eine statistisch signifikant reduzierte LP-Amplitude in den zentralen und parieto-temporo-occipitalen Hirnregionen zu beobachten ist.

B 2 Design der Studie

Probanden, die ihr Interesse an einer Studienteilnahme bekundeten, wurden zunächst telefonisch zu Vorerkrankungen, Medikamenten- und Substanzgebrauch, Schlafgewohnheiten etc. befragt. Ergaben sich aus dem Telefoninterview keine Gründe, die gegen eine Teilnahme sprachen, wurde ein Untersuchungstermin vereinbart (Information und Aufklärung, Unterzeichnung der Einwilligungserklärung, Anamnese und neurologisch-psychiatrisch-internistische Untersuchung, Blutentnahme und Urinuntersuchung, EEG und EKG). Detaillierte Informationen zur Probandenrekrutierung finden sich in Kap. B 3.2 (Probandenrekrutierung).

Waren die Einschlusskriterien erfüllt und lagen keine Ausschlusskriterien vor, verbrachten die Probanden zur Eingewöhnung sowie zum Ausschluss von Schlafstörungen eine Adaptationsnacht in unserem Schlaflabor. Im Abstand von jeweils zwei Wochen (minimaler Abstand zwischen den Testnächten 72 Stunden, maximaler Abstand 3 Wochen) folgten insgesamt neun Testnächte, in denen der Schlaf je dreimal unter drei verschiedenen Expositionsbedingungen abgeleitet wurde (Scheinexposition, GSM 900 MHz und UMTS 2000 MHz).

Eine Woche nach der Adaptationsnacht erfolgte ein Testdurchgang für die Tagestestungen. Die Durchführung der Tests unter Studienbedingungen, d.h. mit randomisiert doppelblind zugeordneter Exposition, folgte jeweils eine Woche nach der Studiennacht, d.h. der Abstand zwischen den Tagestestungen entsprach ebenfalls jeweils zwei Wochen (siehe schematische Darstellung des Studienablaufs Tab. 5 und 6). Daraus ergab sich eine Gesamtstudiedauer pro Proband von 20 Wochen. Da die Probanden mit wenigen Ausnahmen jeweils an den gleichen Wochentagen bzw. –nächten zur Testung ins Labor kamen, wurde eine aus unterschiedlichen Wochentagen resultierende Variabilität in den Daten minimiert.

Tab. 5: Anordnung der Studiennächte										
Woche	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Nacht	Adaptation	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Tab. 6: Anordnung der Studientage										
Woche	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Tag	Übungstag	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Die zu einer Adaptations- bzw. Testnacht gehörenden Laborabläufe sind in Tab. 7 schematisch dargestellt. Die zu einem Übungs- bzw. Testtag gehörenden Abläufe sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 7: Ablauf einer Adaptations- bzw. Testnacht.	
Zeit	
ca. 20:00	Eintreffen des Probanden im Schlaflabor, Überprüfung von Alkoholgehalt in der Atemluft, Abgabe einer Urinprobe zum Drogenscreening, Ausfüllen des Abendprotokolls, Erledigung der Abendhygiene und Vorbereitung auf das Zubettgehen, Positionierung der Elektroden nach dem 10-20-System und Anbringen der übrigen Meßfühler
ca. 22:30	Proband ist komplett verkabelt, Anschluss an die Registriereinheit und biologische Eichung
ca. 23:00	“Licht aus“- Zeitpunkt, Nachtschlaf: 8 h
ca. 7:00	Entfernen der Elektroden und Messfühler, Ausfüllen des Morgenprotokolls, Morgenhygiene, Frühstück
ca. 8:30	Entlassung aus dem Labor

Tab. 8: Ablauf eines Übungs- bzw. Testtages.	
Zeit	
ca. 8:00	Eintreffen der Probanden im Schlaflabor, Überprüfung von Alkoholgehalt in der Atemluft, Abgabe einer Urinprobe zum Drogenscreening, Positionierung der Elektroden nach dem 10-20-System und Anbringen der übrigen Meßfühler
ca. 10:00	Proband ist komplett verkabelt, Ausfüllen von Fragebögen, Einnahme einer kleineren Mahlzeit (Snack)
ca. 10:45	Anschluss an die Registriereinheit und biologische Eichung
ca. 11:00	<p>Starten des 1. Testdurchgangs:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pupillometrie • Alpha-Attenuation Test • Reaktionszeitmessung (Wahlreaktion auf Töne) • Visual Monitoring Task (VMT) • Contingent Negative Variation (CNV) • Aufgabe zur Erzeugung eines Bereitschaftspotentials (BPO) • Akustisch evozierte Potentiale (Oddball Paradigma) • Working Memory Task (WMT) • Test zur geteilten Aufmerksamkeit (aus TAP Testbatterie) • (optischer) Vigilanztest (aus TAP Testbatterie) • Daueraufmerksamkeitstest (aus dem Wiener Testsystem)
ca. 13:00	Ende des 1. Testdurchgangs, Einnahme einer standardisierten Mahlzeit, kontrollierte Aktivität (Lesen, Lösen von Kreuzworträtsel, Sortieren von Unterlagen)
ca. 16:00	Beginn des 2. Testdurchgangs (Reihenfolge der Tests wie im 1. Testdurchgang)
ca. 18:00	Ende des 2. Testdurchgangs, Entkabelung, auf Wunsch Abendessen
ca. 19:00	Entlassung aus dem Labor

Zusammengefasst handelt es sich um eine randomisierte (die Expositionsbedingungen wurden zufällig zugeordnet), doppelblinde (weder Proband noch Untersucher kannten die Untersuchungsbedin-

gung), placebo-kontrollierte (die Placebo- oder Kontrollbedingung ist die Sham-Expositionsbedingung) cross-over Studie (d.h. jeder Proband durchlief alle drei Versuchsbedingungen, jedoch in unterschiedlicher, zufällig zugeordneter Reihenfolge).

Die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 1800 EURO für das Durchlaufen von insgesamt 10 Nächten und 10 Tagen (inklusive Adaptationsnacht und Übungstag). Die Entschädigung erfolgte nicht linear, mit zunehmender Dauer der Studienteilnahme stieg die Entschädigung exponentiell an. Studiennächte und -tage, die aufgrund technischer bzw. aufgrund von Bedienungsfehlern wiederholt werden mussten, wurden gesondert mit 90 € vergütet. Insgesamt mussten 19 Nächte wiederholt werden.

Für die Studie liegt ein positives Ethikvotum (datiert vom 19. August 2004) der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin vor. Alle Untersuchungen wurden in Übereinstimmung mit den *Ethischen Grundsätzen für die medizinische Forschung am Menschen* (Deklaration von Helsinki, revidierte Version vom Oktober 2000 - Edinburgh) durchgeführt.

B 3 Probanden

B 3.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Die Zielstichprobe der Studie waren 30 gesunde, junge männliche Probanden im Alter von 18 bis 30 Jahren. Die Kriterien, die erfüllt sein mussten, damit interessierte Teilnehmer in die Studie eingeschlossen werden konnten, sind in Tab. 9 zusammengestellt, Ausschlusskriterien, die sich z.T. aus der Umkehr der Einschlusskriterien ergeben, in Tab.10.

Tab. 9: Einschlusskriterien

- Geschlecht: männlich
- Alter: 18 - 30 Jahre
- Rechtshändigkeit
- Alpha-Rhythmus als Grundrhythmus im Ruhe-EEG mit geschlossenen Augen
- Vorhandene Einwilligungsfähigkeit
- körperliche und psychische Gesundheit
- Keine Einnahme von den Schlaf beeinflussenden Medikamenten (*keine Einnahme von α - oder β -Blockern, H1-Antihistaminika, Glukokortikoiden, Schlaf- und Beruhigungsmitteln, L-Thyroxin, kein regelmäßiger Schmerzmittelkonsum (NSAR)*)
- keine Schlafstörungen in der Vorgeschichte
- keine aktuelle subjektive Schlafstörung, d.h. einen Monat vor Beginn der Studie Gesamtschlafzeit mindestens 6 Stunden/Nacht, Einschlafzeit unter 30 Minuten und weniger als 45 min Wach nach Schlafbeginn, PLMS-Arousal-Index < 20/h, respiratorischer Arousal-Index (RAI) < 5/h, keine relevante subjektive müdigkeitsbedingte Einschränkung der Leistungsfähigkeit am Tage (ESS \leq 10)
- normale Tag-/Nachtorganisation
- keine Einnahme von Drogen, kein Substanzmissbrauch in der Vorgeschichte
- Nichtraucher

B 3.2 Probandenrekrutierung

Die Probanden wurden für diese Studie mit folgenden Verfahren rekrutiert:

- Mund-zu-Mund Propaganda
- Aushänge in der Charité, der Freien Universität Berlin, der Humboldt Universität und der Technischen Universität
- Anzeige auf der Homepage der Klinik

- Anzeigen in zwei Berliner Magazinen mit Kleinanzeigen, Veranstaltungshinweisen etc. (zitty und Tip), die von jungen Leuten viel gelesen werden und die als Print- sowie als Online-Version verfügbar sind

Tab. 10: Ausschlusskriterien

- *akute* körperliche Erkrankung jedweder Art
- Vorliegen schwerwiegender neurologischer und internistischer Vorerkrankungen
- psychiatrische Erkrankungen in der Vorgeschichte oder aktuell
- Einschränkung der Konzentration oder Aufmerksamkeit, Beeinträchtigung der Merkfähigkeit oder des Gedächtnisses, der Sprache oder der Motorik
- Operationen und Eingriffe am ZNS in den letzten sechs Monaten
- Vorliegen von Zeichen einer erhöhten cerebralen Anfallsbereitschaft oder von Herdbefunden im Wach-EEG
- Schlafstörungen in der Vorgeschichte oder aktuell
- subjektive müdigkeitsbedingte Einschränkung der Leistungsfähigkeit am Tage
- ungewöhnliche Tag-/Nachtorganisation
- extremer Morgen- oder Abendtyp (MAB-Score < 31 oder MAB-Score > 69)
- übermäßiger Konsum koffeinhaltiger Getränke (> 5 Tassen/d)
- übermäßiger Alkoholkonsum (> 2 Gläser Wein/d und/oder > 3 Gläser Bier/d)
- Raucher
- stärkere Beeinträchtigung des Seh- und Hörvermögens
- elektronische Implantate jedweder Art
- elektrisch leitfähige Implantate
- Drogengebrauch
- Linkshändigkeit
- Allergien, soweit sie für das Kleben von Elektroden von Bedeutung sind
- Pittsburgh Sleep Quality Index: PSQI > 5
- Zung Anxiety Score: SAS > 36
- Zung Depression Score: SDS > 40

Probanden, die ihr Interesse an einer Studienteilnahme bekundeten, wurden zunächst telefonisch zu Vorerkrankungen, Medikamenten- und Substanzgebrauch, Schlafgewohnheiten etc. befragt (Telefonscreening). Ergaben sich aus dem Telefoninterview keine Gründe, die gegen eine Teilnahme sprachen, wurden Fragebögen versendet. Nach Rücksendung der Fragebögen wurde ein Untersuchungstermin vereinbart (Information und Aufklärung, Anamnese und neurologisch-psychiatrisch-internistische Untersuchung, Blutentnahme und Urinuntersuchung, EEG und EKG). Sofern sich aus diesen Untersuchungen kein Hinweis auf Ausschlusskriterien ergaben, wurde ein Termin für die Adaptationsnacht im Labor vereinbart, die zugleich auch als Screening für das Vorliegen von Schlafstörungen auf der Basis objektiver Schlafparameter diente.

Der folgenden Graphik (Abb. 4) ist zu entnehmen, auf welcher Stufe der Rekrutierung wie viele Probanden gesehen wurden.

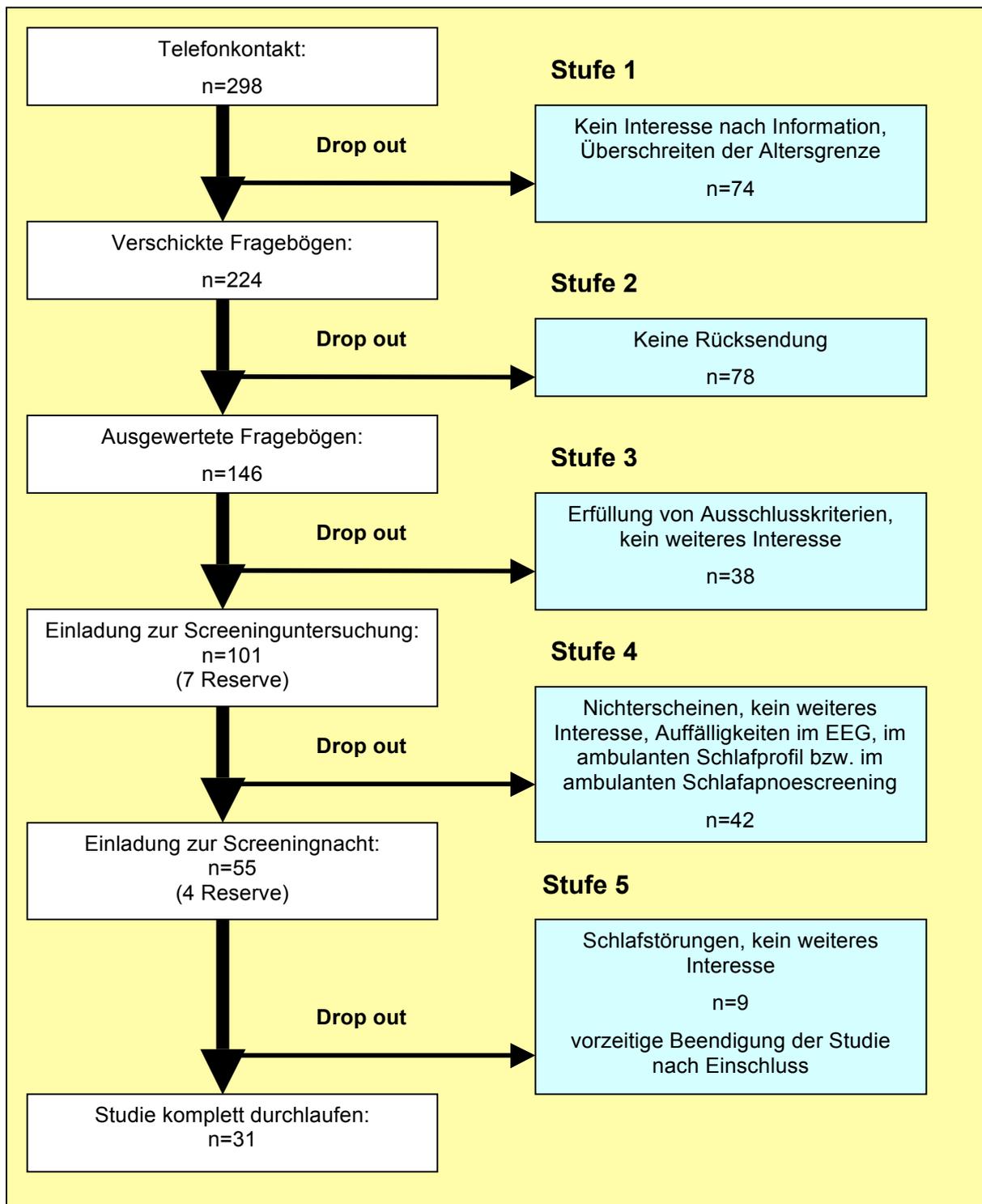


Abb. 4: Logistik der Probandenrekrutierung.

Anmerkung: Die Daten des 31. Probanden dienten dazu, für einen der zuvor abgeleiteten Probanden die Schlafdaten zu ersetzen, sowie für einen anderen Probanden die am Tag erhobenen Daten. Die Auswertung basiert also jeweils auf Datensätzen von 30 Probanden, wobei für 29 Probanden sämtliche Nacht- und Tagesdaten vorliegen.

Insgesamt mussten 19 Nächte und 8 Tage wiederholt werden. Im Wesentlichen waren dafür technische Probleme (zu hohe Reflexionswerte) verantwortlich, z.T. aber auch Bedienungsfehler (z.B. kein erneutes Starten der Expositionsanlage nach einem Toilettengang).

Deskriptive Statistiken zur finalen Stichprobe finden sich in Tabelle 11.

Tab. 11: Stichprobencharakteristika (PSQI: Pittsburgh Schlafqualitäts- Index, ESS: Epworth Schläfrigkeitsscore, SAS: Zung Ängstlichkeits-Score; SDS: Zung Depressions-Score, MAB: Score des Morgen-Abendtyp Fragebogen, AHI: Apnoe-Hypopnoe-Index; PLMAI: Index für periodische Beinbewegungen mit Arousal).		
Merkmal	Mittelwert ± Standardabweichung	Range
Alter [Jahre]	25.3 ± 2.6	18 – 30
PSQI	2.4 ± 1.3	1 – 5
ESS	5.3 ± 2.7	0 – 10
SAS	23.2 ± 2.9	20 – 30
SDS	25.7 ± 3.5	21 – 35
MAB	50.1 ± 7.3	38 – 68
AHI [pro h Schlaf]	< 1 für alle Probanden	
PLMAI [pro h Schlaf]	0: für 26 Probanden; für die restl. vier Probanden: 0.6 – 2.7	

B 4 Exposition

In diesem Kapitel ist zunächst die Vorgehensweise zur Auswahl eines geeigneten Raumes für die Studiendurchführung beschrieben. Die Ausführungen hierzu (B 4.1) sind dem Messprotokoll der Firma IMST GmbH (Dr. Achim Bahr, Dipl.-Ing. Thomas Bolz) für die Messung am 13. April 2004 entnommen. Es folgt eine Beschreibung der Vorbereitungen des Laborraumes (B 4.2) sowie eine kurze Darstellung des Studienablaufs (B 4.3), sowie eine ausführliche Beschreibung der Expositionsanlage (B 4.4).

B 4.1 Auswahl eines geeigneten Laborraums

B 4.1.1 Gegenstand der Untersuchung (Messprotokoll 13.04.04 IMST GmbH)

Im Rahmen des Projekts ist für die Exposition der Probanden ein geeigneter Raum zu ermitteln. Im Universitätsklinikum Benjamin Franklin, Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Eschenallee 3, 14050 Berlin stehen zwei Räume (Raum 1136 und Raum 1139) für die Exposition zur Verfügung. Für diese Räume sind die NF- und HF-Hintergrundfelder zu messen.

B 4.1.2 Messung

B 4.1.2.1 Messgeräte

Für die Messung der NF- und HF-Hintergrundfelder werden verschiedene Messgeräte und Sonden verwendet.

B 4.1.2.2 NF-Messung (5 Hz - 30 kHz)

Basismessgerät	Sonden (Serien.-Nr.)
EFA-3 Wandel & Goltermann (5 Hz – 30 kHz)	B-Feld-Sonde (E-0042) E-Feld-Sonde (G-0040)

Tab. 12: Basismessgerät und Zubehör für die NF-Messung.

Messgerät	Messunsicherheit
EFA-3 mit magnetischer Feldsonde	$\pm 3 \% \pm 1 \text{ nT}$
EFA-3 mit elektrischer Feldsonde	$\pm 5 \% \pm 1 \text{ V/m}$

Tab. 13: Messunsicherheit des Messgeräts zur NF-Messung.

B 4.1.2.3 HF-Messung (100 kHz – 3 GHz)

Basismessgerät	Sonde
EMR-300 Wandel & Goltermann (100 kHz – 3 GHz)	E-Feld-Sonde, Type 18

Tab. 14: Basismessgerät und Zubehör für die HF-Messung.

Messgerät	Messunsicherheit
EMR-300 mit elektrischer Feldsonde	± 1 dB ± 0.2 V/m

Tab. 15: Messunsicherheit des Messgeräts zur HF-Messung.

B 4.1.3 Messergebnisse

B 4.1.3.1 Raum 1136

Frequenzbereich	E [V/m]	B[nT]
nur 50 Hz	1.0	50 - 70
ohne 50 Hz	0.6	22

Tab. 16: NF-Messergebnisse für den Raum 1136.

Frequenzbereich	E [V/m]
breitband	< 0,2

Tab. 17: HF-Messergebnis für den Raum 1136.

B 4.1.3.2 Raum 1139

Frequenzbereich	E [V/m]	B[nT]
breitband	-	120
nur 50 Hz	9,2	110
ohne 50 Hz	< 1	10

Tab. 18: NF-Messergebnisse für den Raum 1139.

Frequenzbereich	E [V/m]
breitband	< 0,2

Tab. 19: HF-Messergebnis für den Raum 1139.

B 4.2 Vorbereitung des Laborraums

Die Studie wurde in einem gegenüber elektromagnetischen Feldern abgeschirmten Untersuchungsraum durchgeführt. Dies war schon allein deshalb erforderlich, damit nicht durch Abstrahlung der erzeugten Testsignale Funkdienste gestört wurden. Auf der Basis des Messprotokolls der IMST GmbH wurde entschieden, die Studie im Raum 1136 durchzuführen. Zur Ausstattung des Untersuchungsraumes wurden ausschließlich Holzmöbel verwendet.

Die nieder- und hochfrequenten Felder waren laut Vertrag zu protokollieren, wobei die magnetische Flussdichte bei 50 Hz nicht höher als 50 nT sein sollte. Die entsprechende Messung wurde von der IMST GmbH (Kamp-Lintfort) durchgeführt. Der Grenzwert für die magnetische Flussdichte konnte erst eingehalten werden, nachdem ein mit einem Netztransformator ausgestattetes Gerät (elektrisch verstellbarer Tisch für die Pupillometrie) eliminiert wurde.

Handelsübliche Mobiltelefone erzeugen bekanntermaßen bei verschiedensten elektronischen Geräten offensichtlich wahrnehmbare Störungen. Solche Wirkung erzeugen auch Testsignale, die von der am Kopf der Probanden getragenen Antenne abgestrahlt werden. Ein derartiger Effekt hätte die Blindheit der Studie verletzt. Deshalb waren zwei Strategien zu verfolgen:

1. Verzicht auf alle nicht notwendigen elektronischen Geräte, d.h. Mobiltelefone, Tonwiedergabegeräte, (Radios, MP3-Player etc.), Computer, Organizer, Taschenrechner, elektronische Uhren etc.. Diese durften nicht mit in den Untersuchungsraum hineingenommen werden.
2. Auswahl bzw. Modifikation der im Raum erforderlichen elektronischen Geräte: Peripheriegeräte zum Computer für psychometrische Tagestests (Bildschirm, Tastatur, Lautsprecher), Wechselsprechanlage, Pupillometriegerät, Polygraphie-Aufzeichnungsgerät (siehe **B 5.1.4**).

Durch Versuchsreihen wurde ein Flachbildschirm ausgewählt, der von den Störungen nicht betroffen war (LG L1910B). Die für einige Tests erforderliche akustische Ausgabe über Soundkarte und Lautsprecher wurde durch extern zwischengeschaltete, für den Zweck extra angefertigte Tiefpassfilter störungsfrei gemacht.

Eine Wechselsprechanlage wurde speziell für die Anwendung im Projekt entwickelt. Die Signalübertragung vom Untersuchungsraum zum Kontrollraum erfolgte über einen Kunststofflichtleiter. Die Sendeseite mit Mikrofonverstärker im Untersuchungsraum wurde durch Abschirmung und Filter für das Testsignal unempfindlich gemacht. Darüber hinaus wurde das Gerät außerhalb der Reichweite der Probanden an der Decke installiert, um die möglichen Störfeldstärken hinreichend zu reduzieren. Die Stromzuführung vom Netzteil wurde durch Leitungen entsprechend den EEG-Elektrodenkabeln (siehe **B 4.5**) mit Induktivitätsbelag ausgeführt, dadurch konnten hörbare Störungen bei der Annäherung des Probanden an die Leitung verhindert werden.

Das Pupillometriegerät erhielt eine Abschirmung aus Aluminiumfolie, so ließ sich eine auf dem Bildschirm ansonsten für den Untersucher unter Umständen erkennbare Störung unterdrücken.

Auch Störungen, die das Polysomnographiegerät zeigt, hätten die Blindheit verletzt. Da sie außerdem die Studienergebnisse direkt hätten beeinflussen können, werden die in diesem Zusammenhang ergriffenen Maßnahmen unter **B 4.5** näher ausgeführt.

Der Untersuchungsraum war komplett vom Außenlicht abgeschirmt, um jahres- und tageszeitlich bedingte, auf Lichteinflüsse zurückführbare Streuungen der Vigilanz zu minimieren. Zur Beleuchtung des Raumes wurden Kompaktleuchtstofflampen mit einer Farbtemperatur von 6500 K eingesetzt, das entspricht der Farbe des normalen Tageslichts bei Sonnenschein. Bei eingeschaltetem Licht betrug die Beleuchtungsstärke an Aufenthaltsorten der Probanden 600-800 Lx.

B 4.3 Ablauf der Studie

Waren die Einschlusskriterien erfüllt und lagen keine Ausschlusskriterien vor, verbrachten alle Probanden zur Eingewöhnung sowie zum Ausschluss von Schlafstörungen eine Adaptationsnacht im Schlaflabor. Im Abstand von jeweils zwei Wochen (minimaler Abstand zwischen den Testnächten 72 Stunden) folgten insgesamt neun Testnächte, in denen der Schlaf für die Dauer von 8 Stunden je dreimal unter drei verschiedenen Expositionsbedingungen abgeleitet wurde (Scheinexposition, GSM 900 MHz und UMTS 2000 MHz). Modelliert wurden Signale, wie sie beim Gebrauch von Mobiltelefonen mit maximaler Sendeleistung auftreten. Die Sendeleistung wurde so eingestellt, dass die gesetzlich zulässigen Expositions-Grenzwerte für die Normalbevölkerung (Teilkörper SAR-Werte von 2 W/kg über 10 g gemittelt) erreicht, aber nicht überschritten wurden.

Die Zuordnung der Expositionsbedingungen erfolgte randomisiert und doppelblind zu einer Sequenz in einem Berenblut-Design als Spezialfall eines cross-over Designs.

B 4.4 Technische Details der Expositionseinrichtung (Bericht der Fa. IMST)

Die Expositionseinrichtung wurde von der IMST GmbH in Abstimmung mit der Studienleitung entwickelt. Die Überwachung der Anlage erfolgte unabhängig vom Studienteam durch die IMST GmbH. Die folgenden Ausführungen basieren auf dem Zwischenbericht der IMST GmbH vom 9. Juni 2004, der auf der Internetseite des Bundesamtes für Strahlenschutz als pdf-Datei als Download abrufbar ist (http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie_verg_bio_080.html) sowie auf Publikationen in peer-reviewed Fachzeitschriften (Bahr et al. 2006, 2007).

Einen Eindruck des Messplatzes vermittelt Abb. 5.



Abb. 5: Messplatz: *links:* Expositionseinrichtung mit Steuerrechner, *rechts:* Steuerrechner für das polygraphische Aufzeichnungsgerät, *Mitte:* Steuerrechner für Tagesexperimente

Die nachfolgenden Ausführungen sind direkt aus dem „Zwischenbericht zum Projekt „Aufbau einer Expositionseinrichtung“ IMST GmbH, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2 D-47475 Kamp-Lintfort, Dr.-Ing. Achim Bahr, Dipl.-Ing. Thomas Bolz) übernommen.

B 4.4.1 Einleitung und Problemstellung

Zur Durchführung von Probandenuntersuchungen in Form einer randomisierten, placebo-kontrollierten, doppelblinden cross-over Studie wird im Rahmen dieses Projekts eine Expositionseinrichtung aufgebaut.

Die Charakterisierung dieser Expositionseinrichtung erfolgt mit dem dosimetrischen Messsystem DASYS [DASY 1995].

B 4.4.2 Aufbau der Expositionseinrichtung

In Abb. 6 ist der prinzipielle Aufbau der Expositionseinrichtung dargestellt.

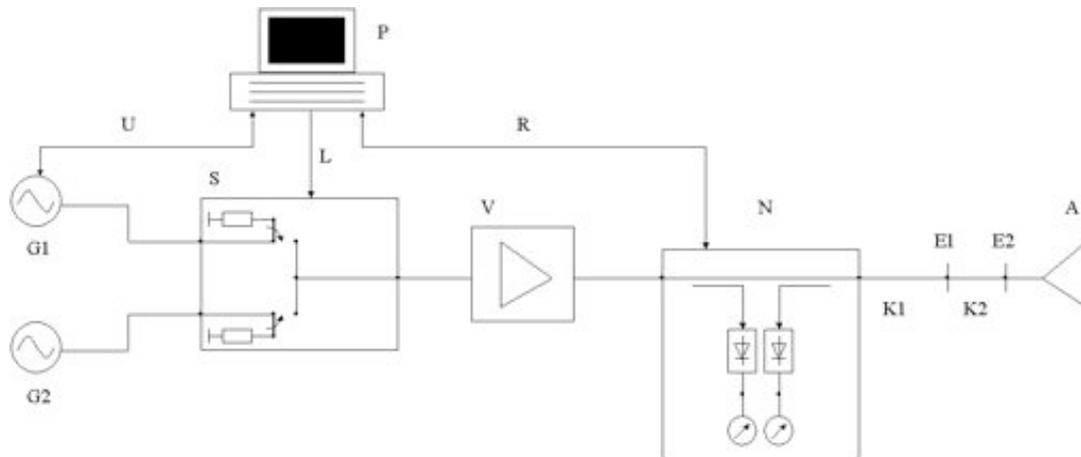


Abb. 6: Prinzipieller Aufbau der Expositionseinrichtung.

Die Expositionseinrichtung nach Abb. 6 besteht aus den folgenden Systemkomponenten:

- G1 : Generator 1, SM300 (GSM)
- G2 : Generator 2, GUS6960S (UMTS)
- S : Switch
- V : Verstärker
- N : Leistungsmessgerät NRT-Z43
- A : Dualband-Antenne
- P : PC
- U : USB-Schnittstelle
- L : LPT1-Schnittstelle
- R : RS232-Schnittstelle
- K1 : Kabel, 5 m
- K2 : Kabel, 1.5 m

Zur Generierung des GSM-Signals wird ein Signalgenerator (G1) der Firma Rhode & Schwarz verwendet, der sich über die USB-Schnittstelle (U) ansteuern lässt.

Der UMTS-Testsignalgenerator (G2) wird von der Forschungsgemeinschaft Funk für dieses Projekt zur Verfügung gestellt [Mbonjo 2002]. Mit einem elektronischen Umschalter (S), der über die parallele

Schnittstelle (L) angesteuert wird, lassen sich die Signale der Signalgeneratoren auf den Ausgang des Schalters umschalten. Soll kein Signal am Ausgang des Schalters anliegen, werden die beiden Signalgeneratoren auf zwei interne Widerstände umgeschaltet. Um die Dämpfung der Systemkomponenten zu kompensieren, werden die Signale mit einem Verstärker (V) der Firma RFPA verstärkt. Die auf die Antenne zulaufende und reflektierte Leistung wird mit einem Durchgangsleistungsmessgerät (N) der Firma Rohde & Schwarz gemessen. Die Steuerung des Leistungsmessgeräts und die Datenerfassung erfolgt über die serielle Schnittstelle (R). Über zwei Kabel (K1, K2) ist das Leistungsmessgerät mit der Antenne (A) verbunden. Die Messung der Kabeldämpfung und der Leistungen erfolgt in den Bezugsebenen E1 und E2.

B 4.4.3 Beschreibung der Testsignale

Die Kommunikation zwischen Basisstation und Endgerät erfolgt bei GSM in einem Zeitschlitz (Burst) innerhalb eines TDMA-Rahmens (TDMA, Time Division Multiple Access). Ein TDMA-Rahmen gemäß Abb. 7 mit einer Dauer von 4,615 ms setzt sich aus 8 Zeitschlitzten der Dauer 577 μ s zusammen. Unter Berücksichtigung der im GSM-Standard vorgesehenen Schutzzeitintervalle wird im Rahmen dieser Untersuchung die Sendedauer eines Zeitschlitzes auf 553 μ s festgelegt.

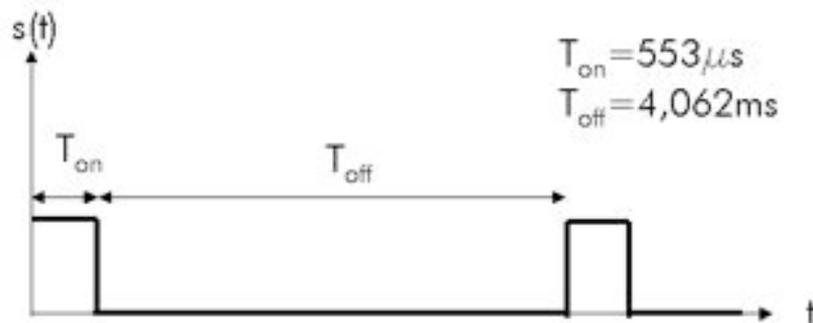


Abb. 7: Signalstruktur des GSM-Signals.

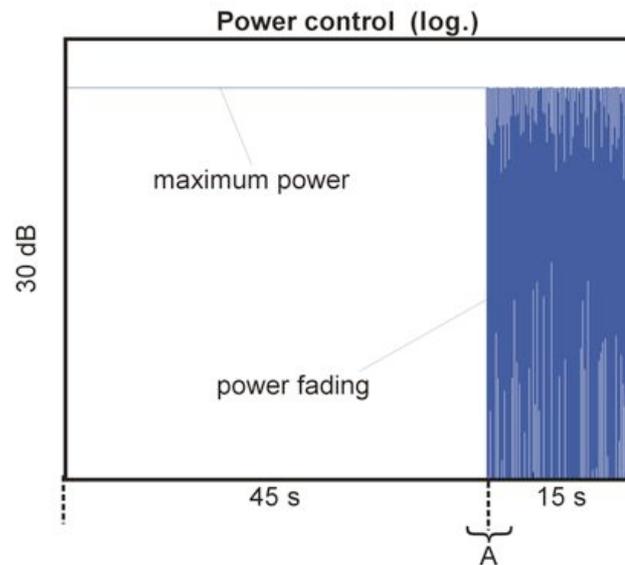


Abb. 8: Signalstruktur des periodischen UMTS-Signals ($0 \leq t \leq 60\text{s}$) [Mbonjo 2002].

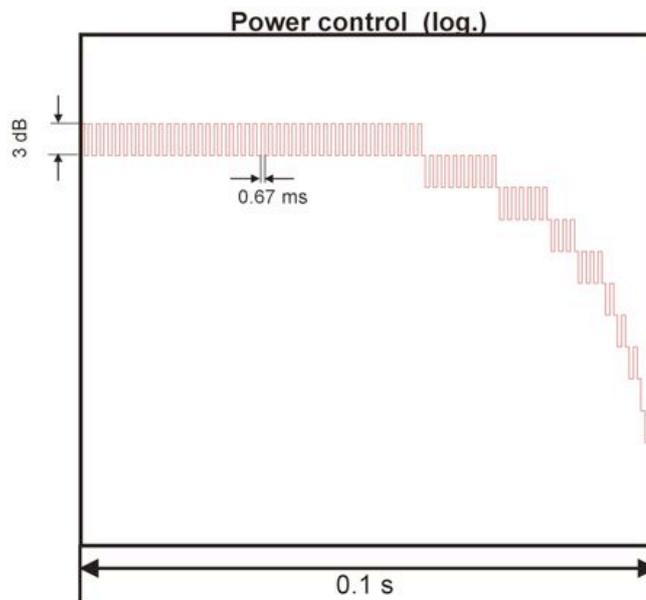


Abb. 9: Ausschnitt (A) des UMTS-Signals zu Beginn des „power fading“ [Mbonjo 2002].

Zur Durchführung bio-elektromagnetischer Experimente mit UMTS-Signalen wurde im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Funk ein UMTS-Signalgenerator entwickelt. In Abb. 9 ist eine Periode des generischen UMTS-Signals dargestellt. Der Zeitverlauf der Ausgangsleistung dieses Testsignals wurde so festgelegt, dass die typischen Merkmale der schnellen Leistungsregelung enthalten sind. Ein derartiges Expositionssignal könnte in der Praxis beispielsweise dann auftreten, wenn ein Mobilfunkteilnehmer zunächst 45 s lang an einem Ort mit schlechten Empfangsbedingungen verweilt

(die Sendeleistung bleibt maximal mit der immer überlagerten Regelschwankung, hier 3 dB) und sich dann für 15 s in einem Bereich mit variierenden Empfangsbedingungen bewegt, wobei die Sendeleistung alle 0,67 ms (entspricht 1/1500 Hz) in 3 dB-Stufen dem Fadingverlauf antikorreliert angepasst wird.

B 4.4.4 Charakterisierung der Expositionseinrichtung

B 4.4.4.1 Objekt der Untersuchung

Zur Befeldung der Probanden bei den Frequenzen 900 MHz und 1966 MHz wird eine Dualband-Antenne verwendet. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Vorder- bzw. Rückseite der Dualband-Antenne, die sich aus hygienischen Gründen in einer Stoffhülle befindet.



Abb. 10: Vorderseite der Dualband-Antenne mit Stoffhülle.



Abb. 11: Rückseite der Dualband-Antenne mit Stoffhülle.

Gegenstand der Charakterisierung ist die dosimetrische Bewertung der Dualband-Antenne für die Frequenzen 900 MHz und 1966 MHz.

B 4.4.4.2 Normung zum Personenschutz in der Hochfrequenztechnik

In fast jedem Land ist der Schutz der Menschen vor schädlichen Einflüssen als Aufgabe des Staates gesetzlich verankert. Um dieses politische Ziel in die Praxis umzusetzen, bemühen sich sowohl auf internationaler als auch zum Teil auf nationaler Ebene verschiedene Organisationen um die Ausarbeitung von Richtlinien und Normen zur Festlegung der technischen Bedingungen.

B 4.4.4.2.1 Unterscheidung der Art der Exposition, Expositionszeiten und Frequenzen

In nahezu allen Normen wird eine Unterscheidung nach Art der Exposition und Expositionszeiten vorgenommen: Für "Berufliche Exposition" sind die Grenzwerte unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit und nicht vorrangig unter Vorsorgegesichtspunkten konzipiert worden. Die Grenzwerte bei "Exposition der Bevölkerung" sind unter Berücksichtigung von zusätzlichen Vorsorgegesichtspunkten festgelegt worden. Die Grenzwerte für "Exposition der Bevölkerung" sind etwa um den Faktor 5 schärfer gefasst, als diejenigen für "Berufliche Exposition".

Neben der Berücksichtigung der Art der Exposition wird in der Mehrzahl der Normen noch zusätzlich eine Unterscheidung hinsichtlich der Dauer der Einwirkung der elektromagnetischen Energie getroffen. Eine Grenze wird international bei 6 Minuten gezogen. Für kurzzeitige Einwirkungen unterhalb von 6 Minuten Dauer sind höhere Feldstärken zulässig, weil davon ausgegangen werden kann, dass es eine gewisse Zeit dauert, bis es zu einer Erwärmung des menschlichen Körpers kommt. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit von wichtigen Parametern wie der Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder in den menschlichen Körper und der Absorptionsfähigkeit verschiedener Gewebearten, hängen die Grenzwerte in der Regel von der Frequenz ab.

B 4.4.4.2.2 Basisgrenzwerte und abgeleitete Grenzwerte

In allen normativen Bestimmungen werden Basisgrenzwerte und so genannte abgeleitete Grenzwerte unterschieden. Basisgrenzwerte wie

- die spezifische Absorption (SA, Dimension: Energie/Masse [Ws/kg]),
- die spezifische Absorptionsrate (SAR, Dimension: Leistung/Masse [W/kg]),
- die elektrische Stromdichte im Körper und
- der Körperstrom

können direkt zu thermisch basierten, biologischen Wirkungen bzw. Reizwirkungen in Bezug gesetzt werden. Im Hochfrequenzbereich hat sich herausgestellt, dass zur Beschreibung der Wirkung eines elektromagnetischen Feldes die spezifische Absorptionsrate (SAR) eine sinnvolle und eine biologisch relevante Größe darstellt. Sie ist ein Maß der je Zeiteinheit aufgenommenen Energie bezogen auf die Masse des betroffenen Gebietes, d.h. sie hat die Einheit [W/kg] und berechnet sich aus dem Quadrat der elektrischen Feldstärke E_{eff} , der Leitfähigkeit σ und der Dichte ρ des Materials (z.B. biologisches Gewebe):

$$SAR = \sigma \frac{E_{\text{eff}}^2}{\rho} = c \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t \rightarrow 0+} \quad (1)$$

Die spezifische Absorptionsrate beschreibt die zeitliche Temperaturänderung $\partial T / \partial t$ zum Beginn der Exposition in Abhängigkeit von der spezifischen Wärmekapazität c des Gewebes. Eine Begrenzung der spezifischen Absorptionsrate verhindert somit eine übermäßige Erwärmung des menschlichen Körpers durch elektromagnetische Energie. Deshalb wird diese Größe für eine dosimetrische Bewertung herangezogen.

Aus solchen Basisgrenzwerten sind zulässige Werte für so genannte abgeleitete Größen wie die elektrische und magnetische Ersatzfeldstärke und die Leistungsflussdichte festgelegt worden, weil Basisgrenzwerte einer messtechnischen Analyse meist nur sehr schwer zugänglich sind. Diese abgeleiteten Grenzwerte werden angegeben, um ein für die Praxis anwendbares Verfahren zur Beurteilung der Feldeinwirkung anzubieten. Ein abgeleiteter Grenzwert ist die elektrische Feldstärke E_{eff} , die als Ersatzfeldstärke bezeichnet wird, und sich aus den Effektivwerten der räumlichen Komponenten des Feldstärkevektors \mathbf{E} ohne Berücksichtigung der Phasenbeziehungen gemäß:

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\Delta t}{t_r} (E_{x,\text{eff}}^2 + E_{y,\text{eff}}^2 + E_{z,\text{eff}}^2)} \quad (2)$$

bestimmen lässt. Bei Auftreten von gepulsten Feldern wie z.B. beim Mobilfunk unter Verwendung des GSM-Standards sind die Pulsdauer Δt und der Impulsabstand t_r in der oben angegebenen Form zu berücksichtigen. Die Ersatzfeldstärke H_{eff} für das magnetische Feld wird analog berechnet. Zu beachten ist, dass für andere Impulsverfahren, z.B. für sehr kurze oder sehr seltene Impulse, spezielle Grenzwerte gelten.

Die Grenzwerte für E_{eff} , H_{eff} und für die Leistungsflussdichte $S = E_{\text{eff}} \times H_{\text{eff}}$ werden dabei so festgelegt, dass selbst unter Zugrundelegung der ungünstigsten Einwirkungsbedingungen der Felder die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden. Bereits in den Basisgrenzwerten sind Vorsorgefaktoren eingebaut worden, die letztlich wegen unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe zu den zum Teil deutlich voneinander abweichenden Normen führen, obwohl alle normengebenden Gremien die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse berücksichtigen.

Als allgemeine Forderung in jeder Norm gilt: **Die Basisgrenzwerte sind einzuhalten.**

Werden die abgeleiteten Grenzwerte eingehalten, so sind auch die Basisgrenzwerte erfüllt. **Die abgeleiteten Grenzwerte dürfen im Einzelfall überschritten werden, wenn sichergestellt ist, dass unter allen auftretenden Bedingungen die Basisgrenzwerte eingehalten sind.**

B 4.4.4.2.3 Übersicht über die für Mobiltelefone gültigen Basisgrenzwerte

In der hier durchgeführten dosimetrischen Untersuchung, erfolgt der Vergleich der gemessenen SAR-Werte mit den Grenzwerten der ICNIRP-Richtlinien. Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung sind die SAR-Grenzwerte für die allgemeine Bevölkerung und für Zeiten länger als 6 Minuten gültig.

In der Tabelle 20 sind die Grenzwerte der ICNIRP und der ANSI C95.1 [IEEE 1999] aufgelistet. Gemäß der ICNIRP sind die SAR-Werte über eine Masse von 10 g innerhalb eines Kubus zu mitteln (SAR_{10g}). Die Dauer der Mittelung ist mit 6 Minuten angegeben.

Dieser ICNIRP-Grenzwert wird in diesem Bericht zugrundegelegt.

Im Vergleich zur ICNIRP hat das in den USA zuständige Normungsgremium in der ANSI C95.1 die Mittelung des SAR-Wertes über eine Gewebemasse von 1 g vorgeschrieben. Die Dauer der Mittelung beträgt dabei 30 Minuten.

Standard	Status	Grenzwert
ICNIRP 1998	Richtlinie	$SAR_{10g} = 2,0 \text{ W/kg}$
ANSI C95.1	Norm	$SAR_{1g} = 1,6 \text{ W/kg}$

Tab. 20: Europäische und US-amerikanische SAR-Grenzwerte für den Kopf.

B 4.4.4.3 Das dosimetrische Messsystem DASY4

Zur dosimetrischen Bewertung von Mobiltelefonen existiert auf europäischer Ebene die Messvorschrift EN50361 [EN50361]. Das in Abb. 12 gezeigte dosimetrische Messsystem DASY4 (Dosimetric Assessment System) [DASY4] ist exakt auf diese Messvorschrift abgestimmt und erfüllt alle Anforderungen an das einzusetzende Messsystem. Zu dem Gesamtsystem gehört ein Roboter zur genauen Positionierung der Sonden, ein Phantom zur Nachbildung des menschlichen Kopfes und eine Software, die eine Auswertung der Messwerte im Sinne verschiedener Normen erlaubt. Das Messsystem befindet sich derzeit vornehmlich in der Geräteindustrie im Einsatz.

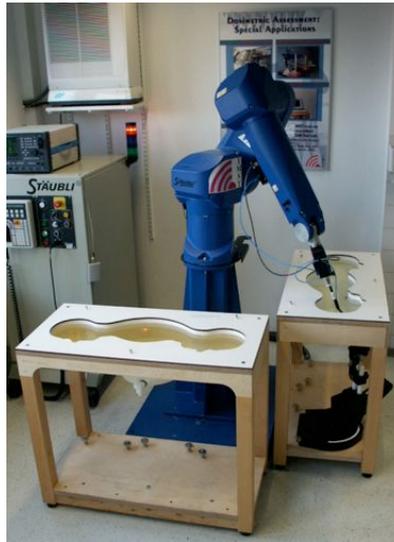


Abb. 12: Das DASY4 System mit zwei Pantomen zur Messung der SAR von Mobiltelefonen.

B 4.4.4.4 Messverfahren

Das Verfahren zur Bestimmung der SAR-Werte beruht auf einer Messung der Verteilung elektrischer Feldstärken in einer Nachbildung des menschlichen Kopfes. Um einer realen Situation nahe zu kommen, wird ein anatomisch korrekt geformtes Fiberglasphantom eingesetzt. Dieses Schalenmodell ist mit einer gewebesimulierenden Flüssigkeit gefüllt. Die SAR-Werte werden unter Verwendung der Gl. (0) aus der gemessenen Verteilung der elektrischen Feldstärke E_{eff} , der vorgegebenen Leitfähigkeit σ und der Dichte ρ berechnet. Dazu findet eine Flüssigkeit Verwendung, welche dem menschlichen Gehirngewebe sehr ähnliche elektrische Eigenschaften aufweist. Außen am Kopf wird an festgelegten Positionen das zu charakterisierende Funktelefon mit maximaler Sendeleistung betrieben. Die Vermessung der sich dadurch ausbildenden elektrischen Feldstärkeverteilung erfolgt mit Hilfe spezieller, hochempfindlicher und sehr kleiner Sonden, die für den Einsatz in entsprechenden Flüssigkeiten kalibriert sind und eine hohe örtliche Auflösung ermöglichen. Außerdem sind die Sonden so konstruiert, dass die Störung der Feldstärkeverteilung durch die Anwesenheit der Sonde extrem klein ist. Aus der so ermittelten räumlichen Verteilung der SAR-Werte im Kopf wird entsprechend der Normenentwürfe jenes würfelförmige Gebiet gesucht, für das der mittlere SAR-Wert ein Maximum erreicht.

Da die elektrischen Parameter von menschlichem Gewebe (und auch der synthetischen Nachbildung) frequenzabhängig sind, müssen diese Parameter und die Frequenz mit angegeben werden, um die resultierenden SAR-Werte aus unterschiedlichen Messungen vergleichen zu können.

B 4.4.4.5 Unsicherheitsbewertung

Fehlerquellen	Unsicherheitswert	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Divisor	c_i	Standardunsicherheit	v_i
Messeinrichtung						
Kalibrierung	± 4.8 %	Normal	1	1	± 4.8 %	∞
Isotropie	± 7.6 %	Rechteck	√3	1	± 4.4 %	∞
Linearität	± 4.7 %	Rechteck	√3	1	± 2.7 %	∞
Messgrenzen	± 1.0 %	Rechteck	√3	1	± 0.6 %	∞
Grenzeffekt	± 1.0 %	Rechteck	√3	1	± 0.6 %	∞
Messgerät	± 1.0 %	Normal	1	1	± 1.0 %	∞
Reaktionszeit	± 0.8 %	Normal	1	1	± 0.8 %	∞
Rauschen	± 0 %	Normal	1	1	± 0 %	∞
Integrationszeit	± 2.6 %	Normal	1	1	± 2.6 %	∞
Mechanische Einschränkungen						
Abtastsystem	± 0.4 %	Rechteck	√3	1	± 0.2 %	∞
Schale des Messphantoms	± 4.0 %	Rechteck	√3	1	± 2.3 %	∞
Anpassung der Messsonde und des Messphantoms	± 2.9 %	Rechteck	√3	1	± 1.7 %	∞
Positionierung des DUT	± 2.9 %	Rechteck	√3	1	± 2.9 %	145
Physikalische Parameter						
Leitfähigkeit der Flüssigkeit (Abweichung vom Sollwert)	± 5.0 %	Rechteck	√3	0.5	± 1.4 %	∞
Leitfähigkeit der Flüssigkeit (Messfehler)	± 4.3 %	Rechteck	√3	0.5	± 1.2 %	∞
Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit (Abweichung vom Sollwert)	± 5.0 %	Rechteck	√3	0.5	± 1.4 %	∞
Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit (Messfehler)	± 4.3 %	Rechteck	√3	0.5	± 1.2 %	∞
Drift der Ausgangsleistung der Antenne, Temperatur und Luftfeuchte	± 20.0 %	Rechteck	√3	1	± 11.6 %	∞
Umgebungsstörung	± 3.0 %	Rechteck	√3	1	± 1.7 %	∞
Nachbearbeitung						
Ermittlung des max. SAR	± 1.0 %	Rechteck	√3	1	± 0.6 %	∞
Kombinierte Standardunsicherheit					± 14,7 %	

Tab. 21: Auflistung der Unsicherheitsbeiträge gemäß EN50361.

In der Tabelle 21 sind die Unsicherheitsbeiträge gemäß der EN50361 [EN50361] aufgelistet. Die erweiterte Unsicherheit ($K=2$) beträgt $\pm 29.3 \%$.

B 4.4.4.6 Messaufbau

Die SAR-Messung erfolgt für das GSM-Signal bei 900 MHz und für das UMTS-Signal bei 1966,5 MHz im Flachbereich des SAM-Phantoms (SAM: Specific Anthropomorphic Mannequin).

Am Ausgang des Verstärkers wird mit dem Leistungsmessgerät für das GSM-Signal eine auf die Antenne gemittelte, hinlaufende Leistung von 276 mW gemessen. Dabei ist die Bezugsebene der Leistungsmessung in den Speisepunkt der Dualband-Antenne verschoben (siehe Abb. 6 Bezugsebene E2).

Der UMTS-Generator (GUS6960) liefert in der Kalibrierstellung ein CW-Signal (CW: Continuous Wave), dessen Leistung exakt der mittleren Leistung des generischen UMTS-Signals entspricht. Mit dieser Einstellung wird am Verstärkerausgang eine gemittelte, hinlaufende Leistung von 208 mW gemessen. Auch bei dieser Messung ist die Bezugsebene der Leistungsmessung in den Speisepunkt der Dualband-Antenne verschoben.

B 4.4.4.7 Positionierung der Dualband-Antenne am SAM-Phantom

In Abb. 13 ist die Positionierung der Dualband-Antenne mit Stoffhülle im Flachbereich des SAM-Phantoms dargestellt.



Abb. 13: Positionierung der Dualband-Antenne mit Stoffhülle im Flachbereich des SAM-Phantoms.

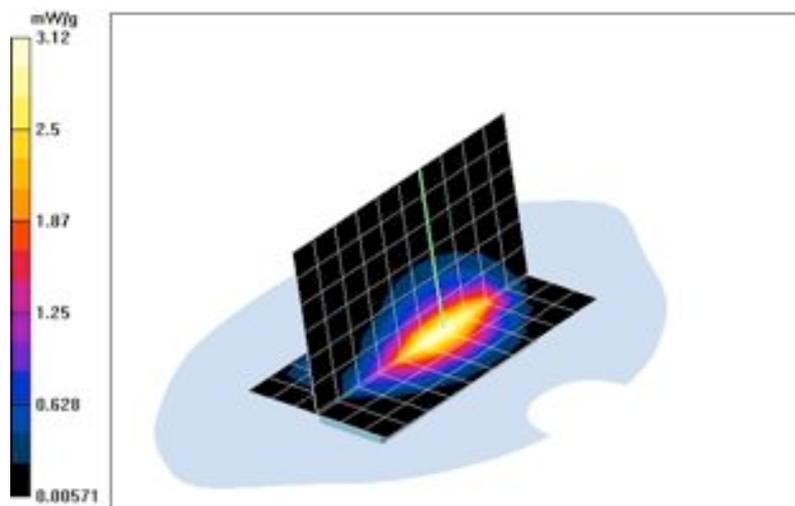
B 4.4.4.8 SAR-Messergebnisse

Die Zielwerte und die gemessenen Werte für die über 10 g gemittelte SAR sowie die zugehörigen Materialparameter sind in Tabelle 22 dargestellt.

Frequenz		SAR _{10g} [W/kg]	ϵ_r	σ [S/m]
900 MHz	Zielwert	2,0	42,0 ± 2,10	0,99 ± 0,050
	gemessener Wert*	1,949	40,8 ± 1,76	0,98 ± 0,043
1966,5 MHz	Zielwert	2,0	40,0 ± 2,00	1,40 ± 0,070
	gemessener Wert*	1,950	38,5 ± 1,66	1,42 ± 0,062

Tab. 22: Zielwerte und gemessene Werte der SAR mit den zugehörigen Materialparametern.

In den Abbildungen 14 und 15 ist die Verteilung der lokalen SAR-Werte für die Frequenzen 900 MHz (GSM) und 1966,5 MHz (UMTS) dargestellt. Die Messergebnisse sind im Anhang detailliert aufgeführt.



*Die gemessenen Werte ergeben sich unter Berücksichtigung eines zusätzlichen 15 cm langen Leitungsstücks in der Antennenspeisung zur Leistungsdämpfung.

Abb. 14: Lokale SAR-Verteilung der Dualband-Antenne mit Stoffhülle im Flachbereich des SAM-Phantoms bei 900 MHz.

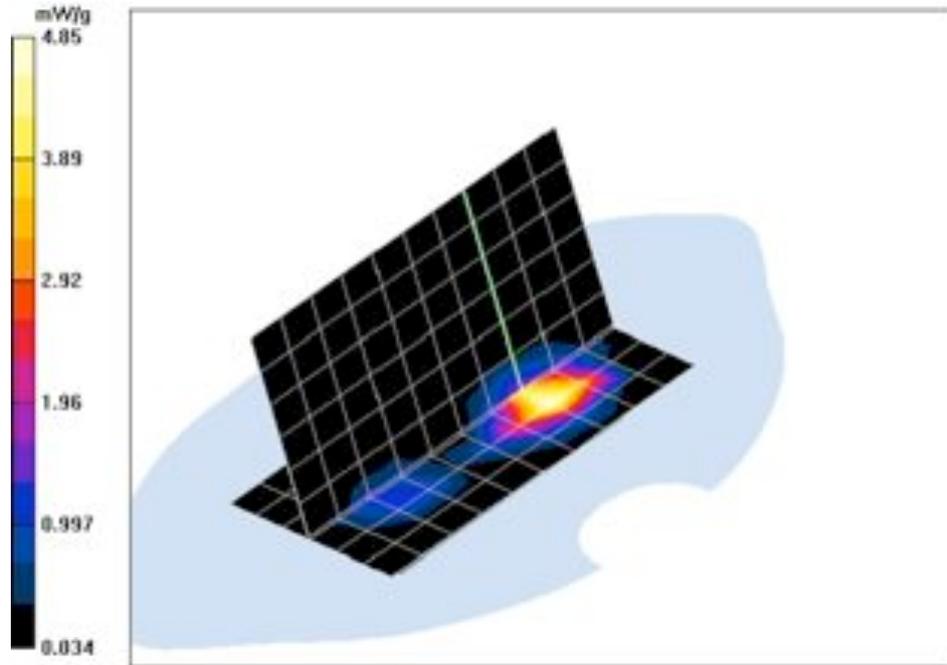


Abb. 15: Lokale SAR-Verteilung der Dualband-Antenne mit Stoffhülle im Flachbereich des SAM-Phantoms bei 1966,5 MHz.

B 4.4.5 Programm zur Steuerung der Expositionseinrichtung

Die Expositionseinrichtung wurde für eine randomisierte placebo-kontrollierte (Sham-kontrollierte) doppelblinde cross-over Studie entwickelt. Jeder Proband durchläuft 10 Tag- und 10 Schlafuntersuchungen. Davon dient jeweils die erste zur Adaptation, diese Untersuchungen werden ohne Exposition durchgeführt. Die restlichen Experimente werden unter den Expositionsbedingungen: Sham, GSM-Signal und UMTS-Signal durchgeführt, wobei jede Bedingung gleichhäufig vorkommt. Die Abfolge der Expositionsbedingungen wird sowohl pro Proband randomisiert zugeordnet, wie auch über die Probanden, d.h. die Expositionsabfolge unterscheidet sich zwischen den Probanden.

Das Programm zur Steuerung der Expositionsanlage gewährleistet dieses Design. Es benutzt eine Tabelle, die in zwei Schritten erzeugt wurde. Zunächst wurde unter Berücksichtigung statistischer Aspekte von der Charité-Universitätsmedizin Berlin eine entsprechende Randomisierungstabelle erzeugt. In einem zweiten Schritt wurde diese Tabelle hinsichtlich der Zuordnung der Abfolge der Expositionsbedingungen zu den Probanden durch die IMST GmbH permutiert. Auf diese Weise wird für die Studie die Doppelblindheit gewährleistet. Nach Vorliegen aller erhobenen Studiendaten sowie

der Auswertungsergebnisse dieser Daten werden für die statistische Versuchsauswertung durch die Charité-Universitätsmedizin Berlin die Daten entblindet.

B 4.4.5.1 Struktur des Programmfensters

Die Messdatenerfassung und die Steuerung der Expositionseinrichtung nach Abb. 6 wird mit dem Programm "exposure" durchgeführt. Wie in Abb. 16 zu erkennen ist, ist das Programmfenster in zwei Bereiche gegliedert. Im oberen Bereich werden über Bedienelemente (Drehknopf und Kippschalter) die Expositionsdaten editiert. Im unteren Bereich des Programmfensters wird die Exposition gestartet und überwacht.

Nachdem im oberen Bereich die Eingabe der Expositionsdaten und ihre Bestätigung durch Kippen des Schalters *Einstellungen* in die Position *Aus* erfolgte, werden die Bedienelemente, mit Ausnahme des Schalters *Korrektur* zur *Korrektur* der eingegebenen Daten, deaktiviert und die Bedienelemente des unteren Bereichs aktiviert. Nach dem *Start* der Exposition durch Kippen des Expositionsschalters auf die Position *Start*, sind alle Bedienelemente zum Einstellen der Expositionsdaten deaktiviert, um eine Manipulation der eingestellten Expositionsdaten während der Exposition zu vermeiden.

B 4.4.5.2 Eingabe der Expositionsdaten

Zur Eingabe der Probandendaten muss der Kippschalter *Einstellungen* auf *An* stehen. Mit dem Drehknopf *Proband Nr.* lässt sich die Probandennummer und mit dem Kippschalter *Tageszeit* die Tageszeit der Exposition einstellen. Anhand der vorgenommenen Einstellungen wird die Versuchsnummer ermittelt und im Textfenster *Versuch Nr.* ausgegeben. Handelt es sich bei der Exposition um den ersten Versuch (Eingewöhnungsphase), wird dies in einem Textfenster (Hintergrundfarbe grün) im oberen rechten Bereich angegeben. Die eingestellten Daten zur Exposition werden durch Kippen des Schalters *Einstellungen* in die Position *Aus* bestätigt (Abb. 17). Anschließend werden die Bedienelemente mit Ausnahme des Kippschalters zur *Korrektur* der eingegebenen Daten deaktiviert, um eine Manipulation der eingestellten Expositionsdaten während der Exposition zu vermeiden.

Falls versehentlich falsche Daten editiert und durch Kippen des Schalters *Einstellungen* bestätigt wurden, lässt sich eine *Korrektur* der Daten durch Kippen des Schalters *Korrektur* in die Position *An* durchführen (Abb. 18). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, bestimmte Versuche durch Eingabe der zugehörigen Versuchsnummer im Textfenster *Versuch Nr.* zu wiederholen. In diesem Fall werden die alten Versuchsergebnisse überschrieben.

Wurde eine *Korrektur* vorgenommen, so sind die beiden Schalter *Korrektur* und *Einstellungen* in die Position *Aus* zu kippen, um die geänderten Daten zu bestätigen.

Durch Kippen des Expositionsschalters in die Position *Start* (unterer Bereich des Programmfensters) werden alle Bedienelemente des oberen Bereiches deaktiviert, um eine Manipulation der eingestellten Expositionsdaten während der Exposition zu vermeiden (Abb. 19).

B 4.4.5.3 Start und Überwachung der Exposition

Zu Beginn der Exposition werden einige Geräte der Expositionseinrichtung initialisiert. Während dieser Initialisierungsphase sind die Bedienelemente zur Steuerung der Exposition gesperrt (Abb. 19). Nach der Initialisierung der Geräte werden die Bedienelemente zur Steuerung der Exposition freigegeben, das Datum für den Start der Exposition im Textfenster *Datum* ausgegeben und der Status der Exposition im Textfenster *Meldungen* angezeigt. Kommt es zu einer Störung der Expositionseinrichtung, wird die Kontroll-LED von grün nach rot umgeschaltet, eine Warnung im Textfenster *Meldungen* angezeigt und die Exposition abgebrochen (Abb. 20). Werden bei der Exposition die SAR-Zielwerte gemäß Tabelle 22 zuzüglich des Unsicherheitsintervalls von 15% überschritten, wird die Exposition abgebrochen und zusätzlich ein akustisches Warnsignal abgegeben. Das akustische Warnsignal kann durch Drücken der Alarm-Taste *Aus* abgeschaltet werden kann. Des weiteren wird die Exposition abgebrochen, wenn die SAR-Zielwerte gemäß Tabelle 22 abzüglich des Unsicherheitsintervalls von 15% unterschritten werden. In diesem Fall wird kein akustischer Alarm ausgelöst. Nach einer Störung befindet sich das Programm in einem Zustand, der den Start einer neuen Exposition erlaubt.

Im Fall einer störungsfreien Exposition (Abb. 21) wird die Exposition durch Kippen des Expositionsschalters auf *Ende* beendet. Ferner werden die Bedienelemente zur Steuerung der Exposition deaktiviert und die Bedienelemente zum Einstellen neuer Expositionsdaten aktiviert (Abb. 22).

Während einer Exposition besteht die Möglichkeit, die Exposition durch Drücken der Einstellungstaste *Pause* anzuhalten (Abb. 23). In diesem Zustand findet keine Exposition statt, das Programm verweilt in einer Warteschleife. Die Exposition kann durch wiederholtes Drücken der Einstellungstaste *Weiter* fortgesetzt werden.

Ist eine Versuchsreihe abgeschlossen (10 Versuche für eine Tageszeit), so weist eine Meldung in einem Textfenster im oberen rechten Bereich auf diesen Zustand hin (Abb. 24). In diesem Zustand hat der Versuchszähler den Wert 11, da nach jeder Exposition der Versuchszähler inkrementiert wird. Nach Bestätigung der Expositionsdaten der abgeschlossenen Versuchsreihe durch den Kippschalter *Einstellungen* bleiben die Bedienelemente zur Steuerung der Exposition deaktiviert.

B 4.4.5.4 Verzeichnisstruktur

In Abb. 25 ist die Verzeichnisstruktur der Probandendaten dargestellt. Über die eingestellten Expositionsdaten werden die entsprechenden Pfade zu den Dateien innerhalb der Verzeichnisstruktur gesetzt, um die Messergebnisse der Exposition abzuspeichern bzw. den Versuchszähler auszulesen.

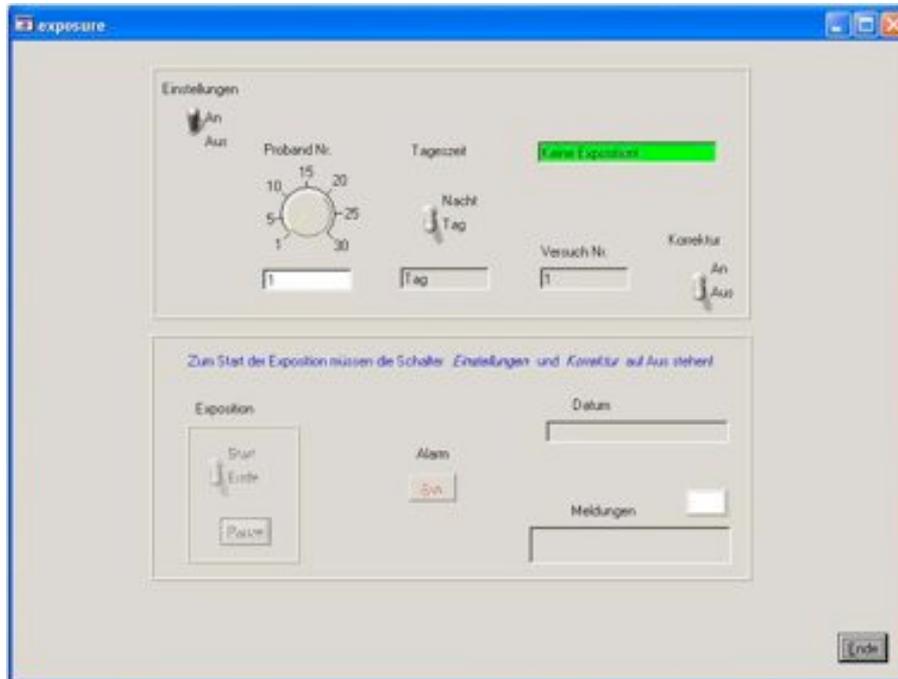


Abb. 16: Fenster des Programms „exposure“ nach dem ersten Aufruf.

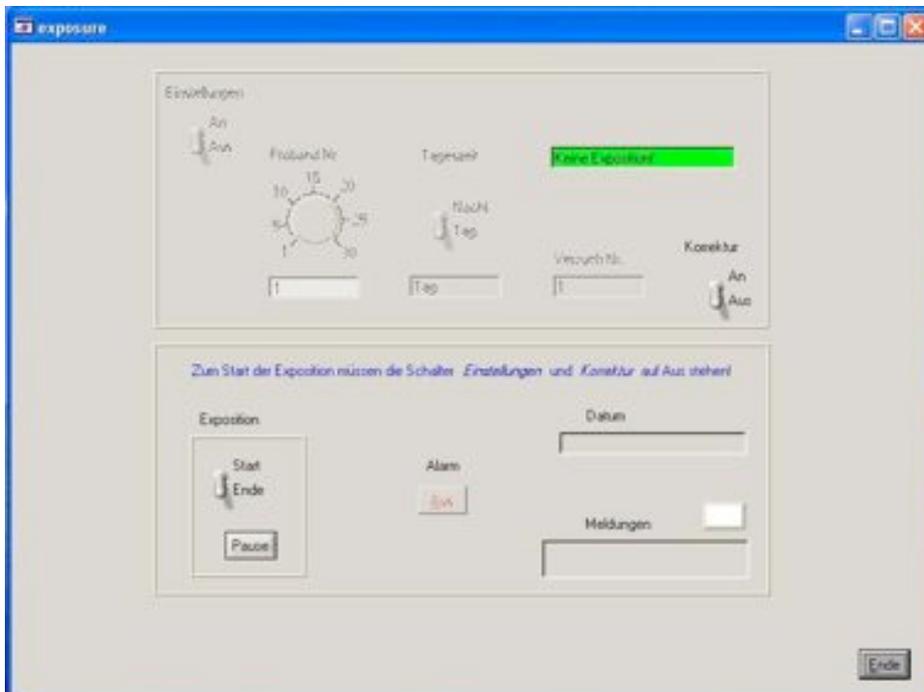


Abb. 17: Programmfenster nach Bestätigung der eingestellten Expositionsdaten durch Kippen des Schalters *Einstellungen* in die Position *Aus*.

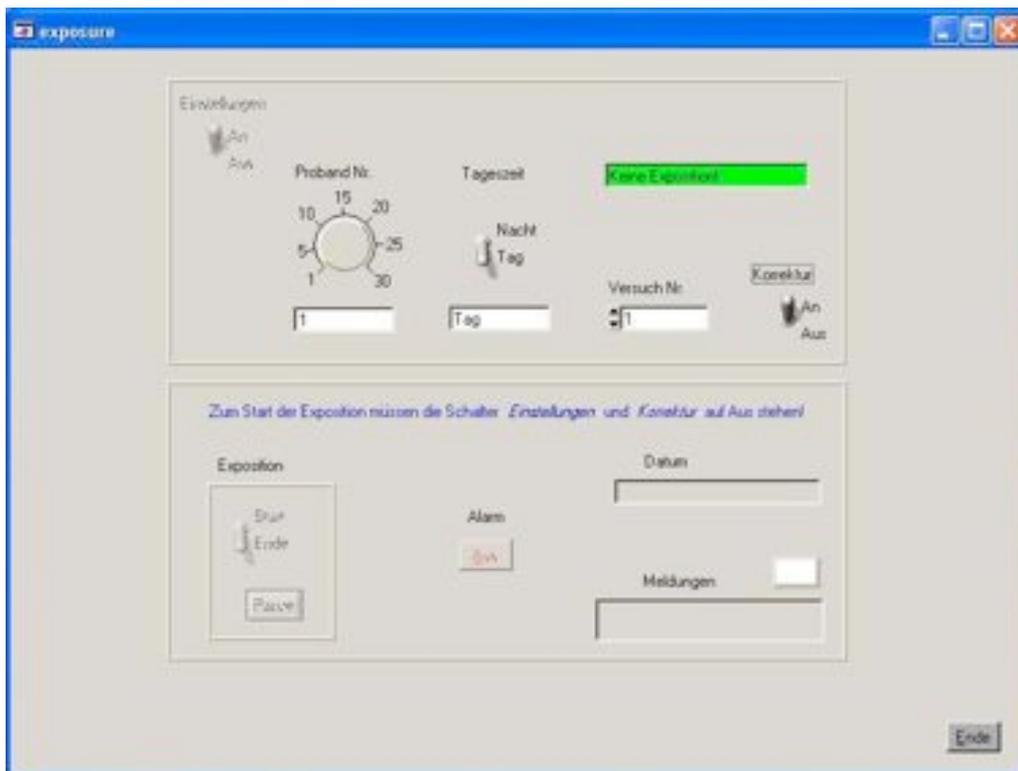


Abb. 18: Programmfenster nach Kippen des Schalters *Korrektur* in die Position *An*.

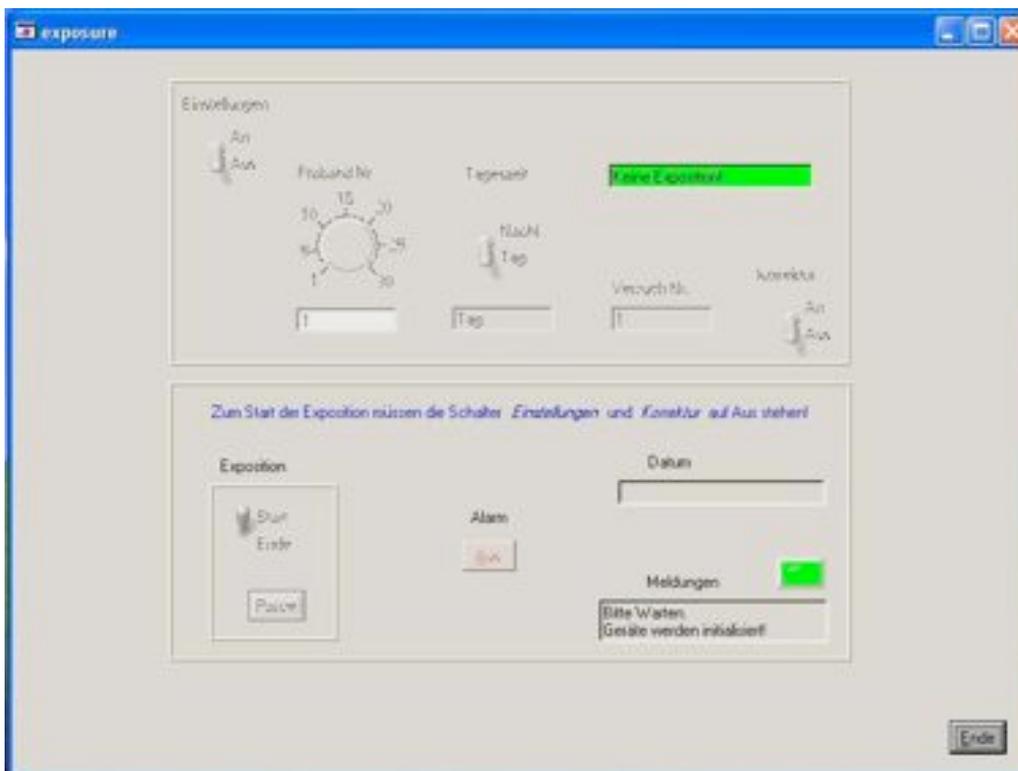


Abb. 19: Programmfenster nach dem Start der Exposition durch Kippen des Expositionsschalters in die Position *Start*.

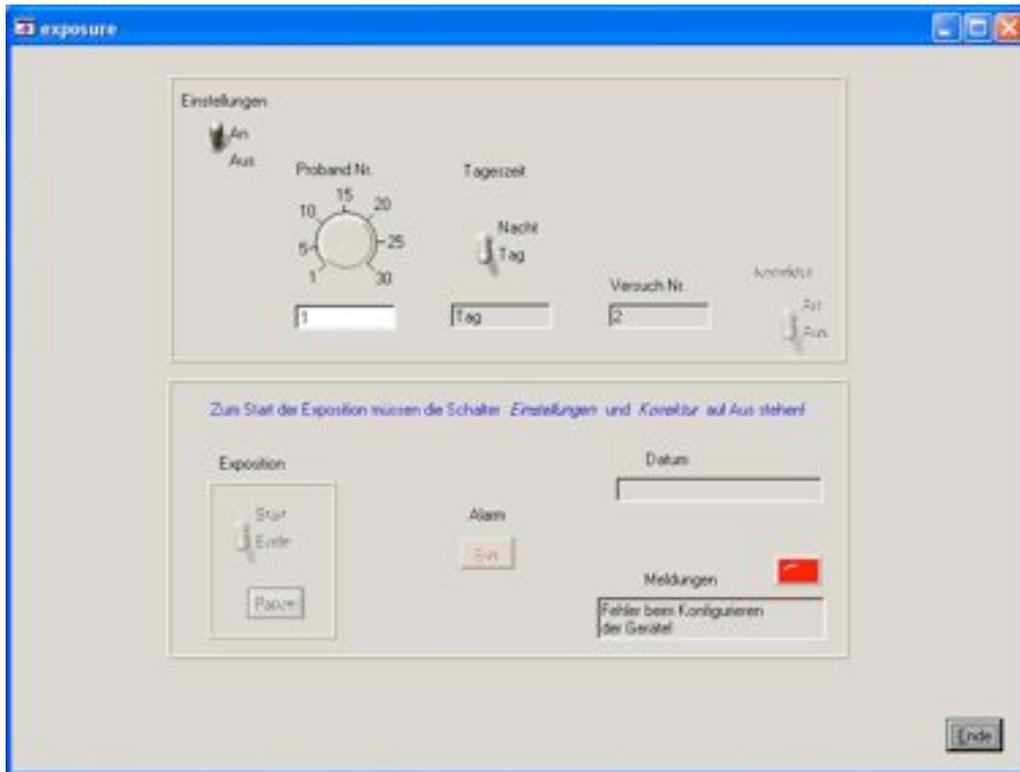


Abb. 20: Programmfenster nach einem aufgetretenen Fehler.

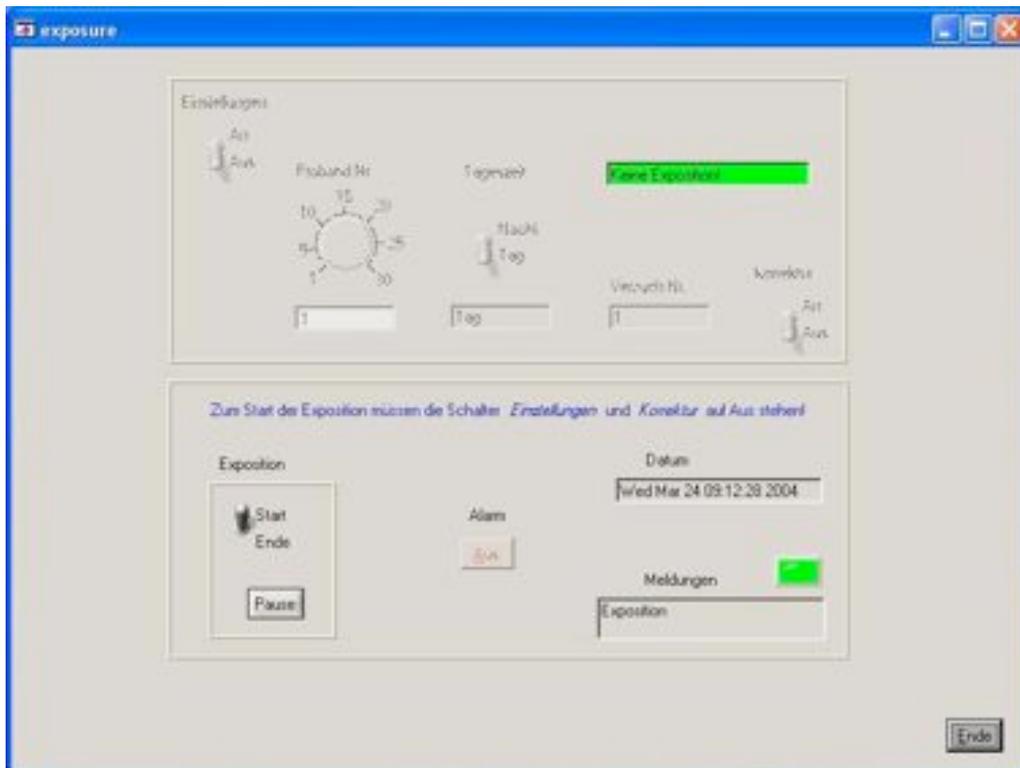


Abb. 21: Programmfenster wahrend einer Exposition.

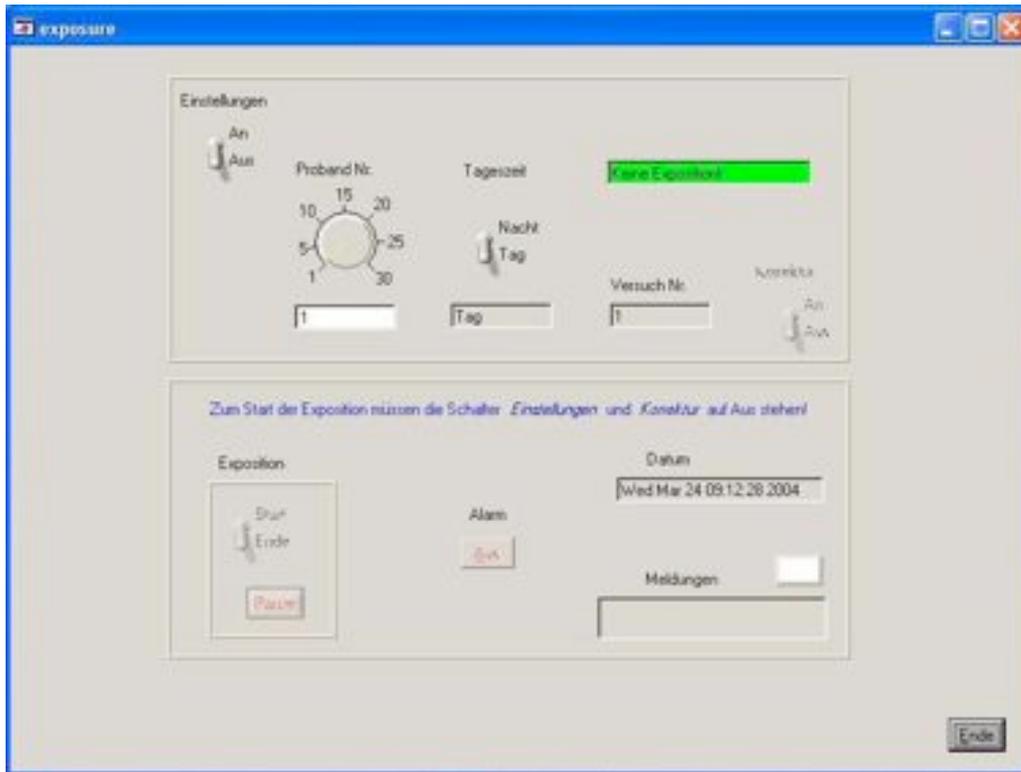


Abb. 22: Programmfenster nach Beenden einer Exposition.

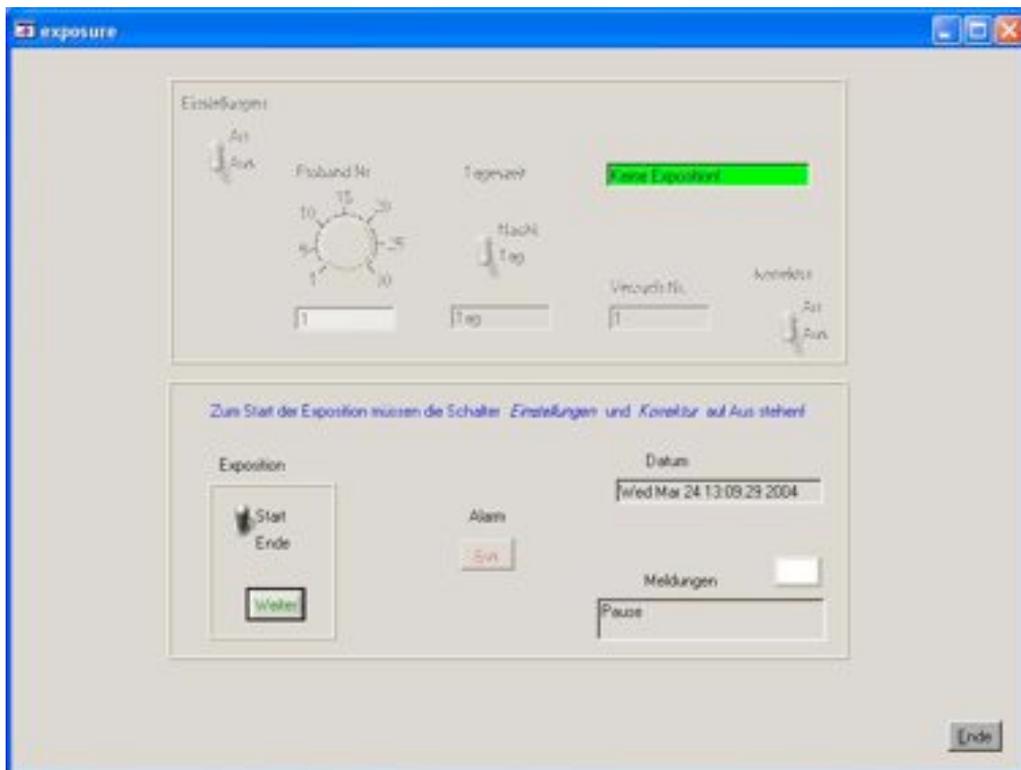


Abb. 23: Programmfenster für eine angehaltene Exposition.

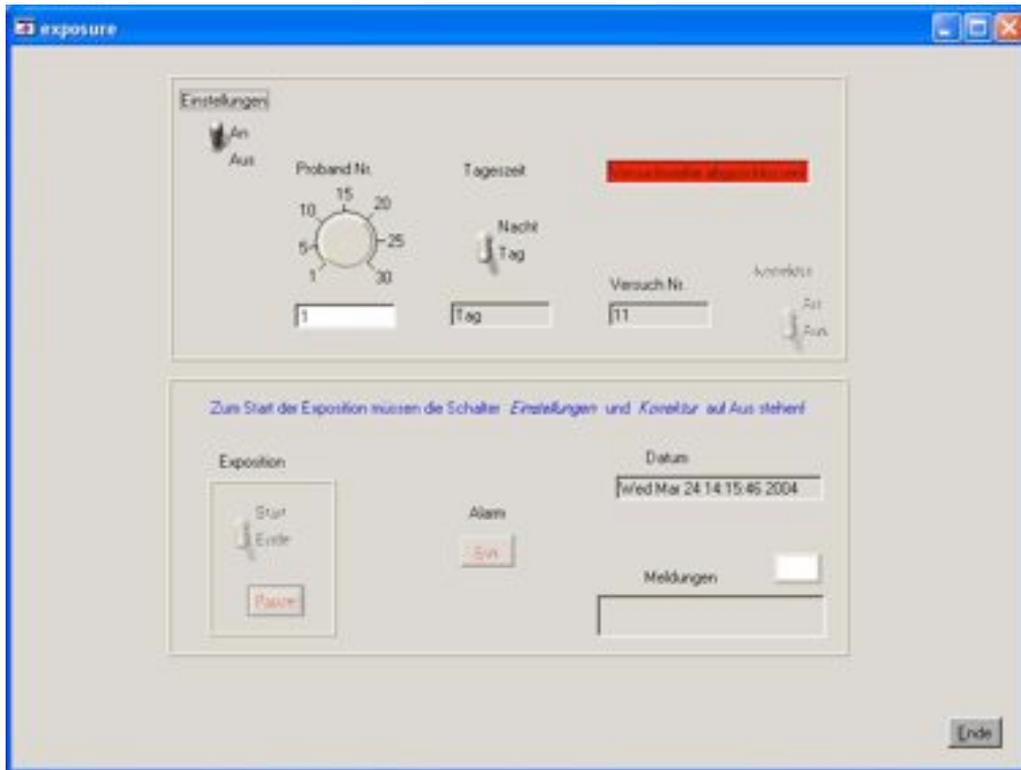


Abb. 24: Programmfenster für eine abgeschlossene Versuchsreihe.

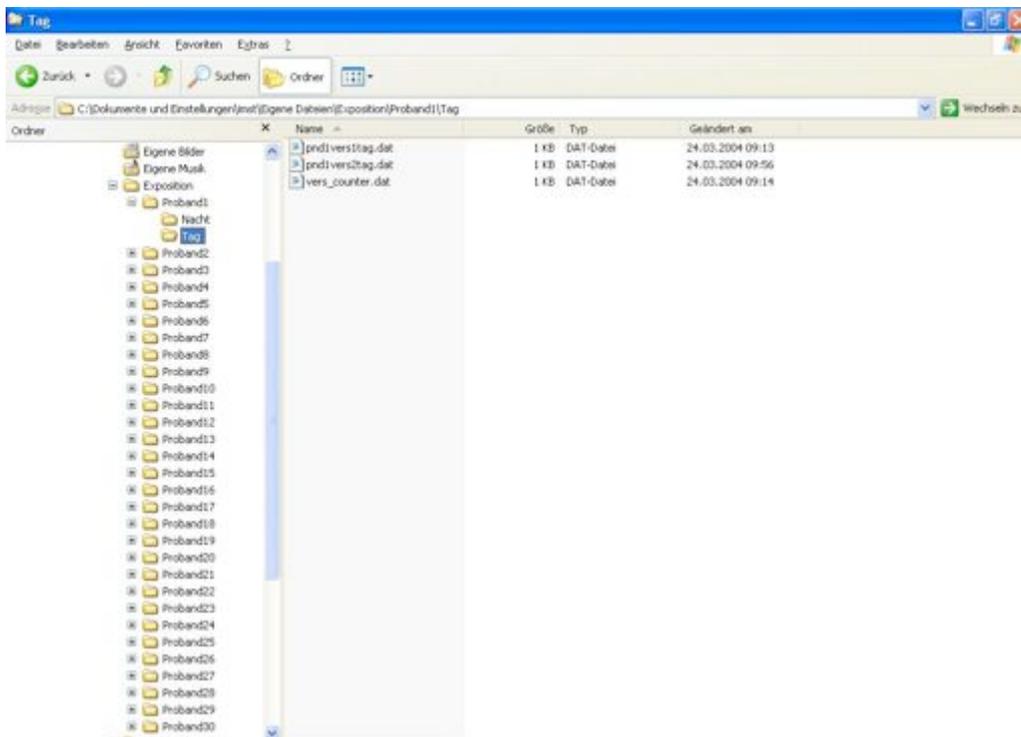


Abb. 25: Verzeichnisstruktur der Probandendaten.

B 4.4.6 Literatur (Bericht der Fa. IMST)

- [DASY 1995] Referenzliste der installierten DASY-Systeme mit RX90 Robotern: Deutsche Telekom, Forschungs- und Technologiezentrum; Motorola Cellular - MRO; Motorola; Ericsson Mobile Communications AB; Nokia Mobile Phones LTD; IMST GmbH, 1995.
- [DASY4] Schmid & Partner Engineering AG: DASY4 Manual. March 2003
- [ICNIRP 1998] ICNIRP Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), In: Health Physics, Bd. 74, No. 4, S. 494-522, 1998.
- [EN50361] European Standard EN 50361: Basic Standard for the Measurement of Specific Absorption Rate Related to Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones (300 MHz – 3 GHz), CENELEC, Brussels, July 2001.
- [IEEE 1999] IEEE Std C95.1-1999: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999.
- [Mbonjo 2002] H. Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, J. Streckert, A. Bitz, V. Hansen: Features of a generic UMTS test signal for investigations of biological effects. COST281/EBEA Workshop "Emerging Technologies", Rom, Italy, May 2002.

B 4.4.7 Anhang (Bericht der Fa. IMST)

B 4.4.7.1 GSM (900 MHz)

Test Laboratory: IMST GmbH

DUT: Expositionseinrichtung

Program Name: Body Worn

Communication System: EGSM 900 IMST; Frequency: 900 MHz; Duty Cycle: 1:8.3

Medium parameters used: $\sigma = 0.98$; mho/m, $\epsilon_r = 40.8$; $\rho = 1000$ kg/m³

Phantom section: Flat Section

DASY4 Configuration:

- Probe: ET3DV6 - SN1579; ConvF(6.7, 6.7, 6.7); Calibrated: 15.05.2003

- Sensor-Surface: 4mm (Mechanical And Optical Surface Detection)

Sensor-Surface: 0mm (Fix Surface)

- Electronics: DAE3 Sn335; Calibrated: 05.05.2003

- Phantom: SAM Sugar; ; Serial: 1059

- Measurement SW: DASY4, V4.2 Build 44; Postprocessing SW: SEMCAD, V1.8 Build 112

Body Worn/Area Scan (7x11x1): Measurement grid: dx=15mm, dy=15mm

Reference Value = 58 V/m; Power Drift = -0.0 dB

Maximum value of SAR (measured) = 3.12 mW/g

Body Worn/Generic Scan (1x11x7): Measurement grid: dx=15mm, dy=15mm, dz=15mm

Reference Value = 58 V/m

Maximum value of SAR (measured) = 3.08 mW/g

Body Worn/Zoom Scan (7x7x7)/Cube 0: Measurement grid: dx=5mm, dy=5mm, dz=5mm

Reference Value = 58 V/m; Power Drift = -0.0 dB

Maximum value of SAR (measured) = 3.49 mW/g

Peak SAR (extrapolated) = 5.28 W/kg

SAR(1 g) = 3.2 mW/g; SAR(10 g) = 2.05 mW/g*

* Bei der Messung der SAR-Werte wurde ein 15 cm langes Leitungsstück, das in der Antennenspeisung zur Reduktion der abgestrahlten Leistung eingesetzt wird, nicht berücksichtigt.

B 4.4.7.2 UMTS (1966,5 MHz)

Test Laboratory: IMST GmbH

DUT: Expositionseinrichtung

Program Name: Body Worn

Communication System: WCDMA FDD; Frequency: 1966.5 MHz; Duty Cycle: 1:1

Medium parameters used: $f = 1966.5$ MHz; $\sigma = 1.42$ mho/m; $\epsilon_r = 38.5$; $\rho = 1000$ kg/m³

Phantom section: Flat Section

DASY4 Configuration:

- Probe: ET3DV6 - SN1669; ConvF(4.88, 4.88, 4.88); Calibrated: 18.03.2004

- Sensor-Surface: 4mm (Mechanical And Optical Surface Detection)

Sensor-Surface: 0mm (Fix Surface)

- Electronics: DAE4 Sn901; Calibrated: 12.01.2004

- Phantom: SAM Glycol; Type: Speag; Serial: 1176

- Measurement SW: DASY4, V4.2 Build 44; Postprocessing SW: SEMCAD, V1.8 Build 112

Body Worn/Area Scan (7x11x1): Measurement grid: dx=15mm, dy=15mm

Reference Value = 9.51 V/m; Power Drift = -0.0 dB

Maximum value of SAR (measured) = 4.91 mW/g

Body Worn/Generic Scan (1x11x7): Measurement grid: dx=15mm, dy=15mm, dz=15mm

Reference Value = 9.51 V/m

Maximum value of SAR (measured) = 1.71 mW/g

Body Worn/Zoom Scan (7x7x7)/Cube 0: Measurement grid: dx=5mm, dy=5mm, dz=5mm

Reference Value = 9.51 V/m; Power Drift = -0.0 dB

Maximum value of SAR (measured) = 4.85 mW/g

Peak SAR (extrapolated) = 8.54 W/kg

SAR(1 g) = 4.29 mW/g; SAR(10 g) = 2.09 mW/g*

* Bei der Messung der SAR-Werte wurde ein 15 cm langes Leitungsstück, das in der Antennenspeisung zur Reduktion der abgestrahlten Leistung eingesetzt wird, nicht berücksichtigt.

B 4.5 Maßnahmen zur Sicherung der Datenqualität bei EEG-Ableitung unter Exposition

Um gegenseitigen Beeinflussungen der Registrierung der biologischen Signale und der Exposition mit dem Hochfrequenz-Signal am Kopf vorzubeugen, war die Entwicklung spezieller Erweiterungen der Registriergeräte (Filter und Abschirmungen) und von neuartigen EEG-Elektrodenkabeln erforderlich. Modulierte Hochfrequenzsignale erzeugen in den empfindlichen EEG-Vorverstärkern niederfrequente Störungen, da die Halbleiterbauelemente der EEG-Vorverstärker durch ihre Nichtlinearitäten die Signale demodulieren. Die Störsignale können direkt oder auch durch Alias-Effekte in Frequenzbereichen der gemessenen Biosignale erscheinen und somit die Ergebnisse in Studien – wie der vorliegenden – beeinflussen. Diese Störmöglichkeit kann sinnvoll nur an der Quelle minimiert werden. Im vorliegenden Projekt wurde für das Polygraphiergerät ein Aluminiumabschirmgehäuse mit dicht verschraubbarem Deckel angefertigt. Die Stromversorgung des Gerätes erfolgte über innenliegende aufladbare Batterien. Die Signalleitungen zur Steuerung des Gerätes und zur Kontrolle der aufgezeichneten Biosignale sowie für die Übermittlung von Markern wurden als Kunststofflichtleiter ausgeführt. Die Sender/Empfänger für die Lichtleiter wurden in einer eigenen Abschirmkammer platziert.

Sämtliche Polygraphiesignale wurden durch zwei Abschirmkammern über LC-Tiefpaßfilter 5. Ordnung (siehe Abb 26) geführt.

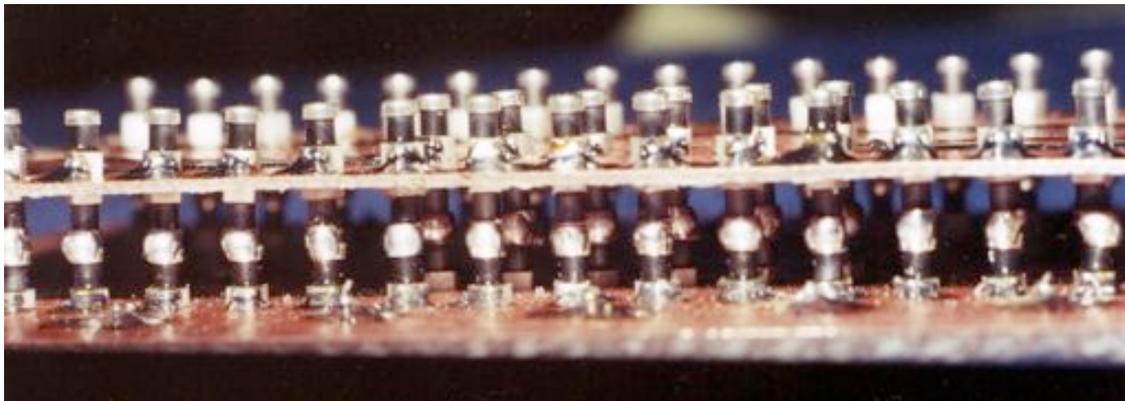


Abb. 26: Tiefpaßfilter für EEG-Polygraphieeingänge des Registriergerätes.

EEG-Kabel und Elektroden, die am Kopf leitend befestigt sind, führen zu zwei Beeinträchtigungen bei der Messung von EEG während gleichzeitiger Exposition mit elektromagnetischen Feldern:

1. die Kabel reduzieren Hochfrequenzfeldstärken parallel zur Kopfoberfläche infolge ihrer Eigenschaft als Leiter,
2. unter den Elektroden ändern sich lokal die Feldstärken durch Hochfrequenzstromflüsse in den Elektrodenkabeln.

Beide Effekte lassen sich minimieren, indem die Leitfähigkeit der Kabel für die Hochfrequenzströme reduziert wird. Dafür kommen grundsätzlich resistive und induktive Impedanzen infrage. Da Ohmsche Widerstände zusätzliche EEG-Artefakte durch andere Quellen begünstigen, wurden Kabel verwendet, die auf ihrer gesamten Länge Induktivitätsbelag aufweisen (gewendelte Leiter). Die Herstellung erfolgte, indem Wendelfedern aus nichtrostendem Stahl mit Polyolefin-Schrumpfschlauch überzogen wurden (siehe Abb. 27). Diese Umhüllung hat gegenüber Werkstoffen wie Silikon den Vorteil wesentlich geringerer Reibungskoeffizienten und verbessert damit die Anwendung bzw. den Tragekomfort.

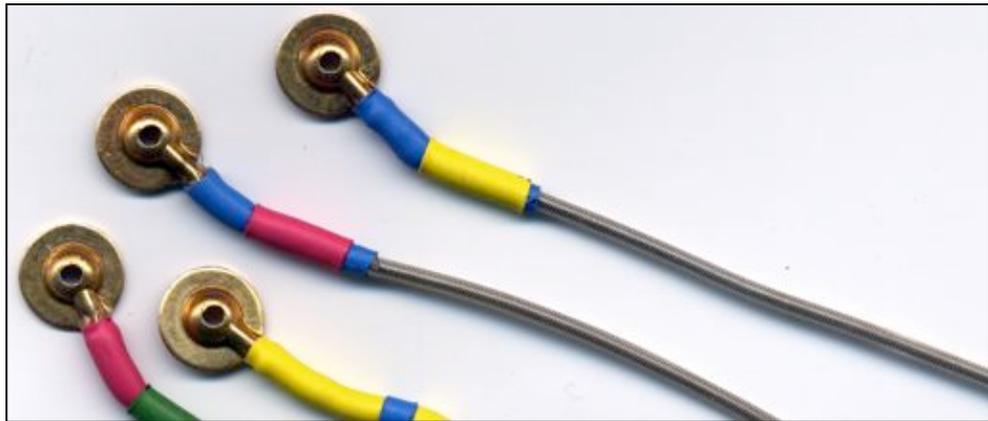


Abb. 27: Elektrodenkabel mit Induktivitätsbelag.

B 4.6 Überprüfung der Polygraphie-Aufzeichnungen auf Störungen durch die Exposition

Modulierte Hochfrequenzsignale können durch ihre Einwirkung auf elektronische Schaltungen bei polygrafischen Aufzeichnungen Störungen erzeugen, die ihrerseits Signalparameter beeinflussen und auf diese Weise zu Unterschieden zwischen Ergebnissen für Exposition und Nichtexposition führen und damit biologische Effekte der Hochfrequenzsignale vortäuschen. Durch die in Kap. B 4.5 beschriebenen Maßnahmen wurde versucht, solche Einwirkungen so weit als möglich zu unterdrücken. Zur Überprüfung, inwieweit noch immer von der Exposition abhängige technische Artefakte in der Aufzeichnung entstanden sind, wurden Messungen mit identischem Ablauf wie bei den Probandenuntersuchungen durchgeführt, jedoch mit einer Melone als Träger von Antenne und Kopfelektroden. Die Frucht ist ein einfaches elektrisches Modell für den menschlichen Kopf und leicht handhabbar. Präparation und Applikation von Elektroden geschah auf analoge Weise wie am menschlichen Kopf.

Jeweils komplette „Schlaf“-Nächte unter GSM-, UMTS- und Sham-Bedingung wurden abgeleitet. Außerdem wurden Tagesuntersuchungen für die unterschiedlichen Expositionsbedingungen durchgeführt, wobei zur Erzeugung von realistischen Markersignalen für eine evtl. Auswertung jeweils ein Mitarbeiter die psychometrischen Tests ausführte, während eine Melone elektrisch gemessen wurde.

Wenn bei der Analyse der aufgezeichneten Signale Störungen durch die Mobilfunksignale nachgewiesen würden, ließen sich durch Mischen von echten Probandenaufzeichnungen mit Melonenmessungen bei unterschiedlicher Exposition für sämtliche Auswerteverfahren die technischen „Effekte“ der Hochfrequenzsignale getrennt von den evtl. biologischen Effekten untersuchen. Dies war aber nicht notwendig, wie im Folgenden dargestellt wird.

Von den Melonen-“Polysomnogrammen“ wurden für die zur Schlafanalyse relevanten Spuren C3-A2 und C4-A1 Leistungsspektren über 100s-Segmente berechnet. Es ergibt sich eine Frequenzauflösung von 1/100 Hz. Mit der Nyquistfrequenz von 100Hz ergeben sich daraus 10000 Spektrallinien. Eine von-Hann-Zeitfensterfunktion wurde benutzt. Die Schrittweite von Segment zu Segment betrug 50s. Einige Minuten zu Beginn und zum Ende der Aufzeichnung, die stark durch Bewegungsartefakte gestört waren, wurden per Hand ausgeschlossen. Für jede Nacht wurde ein gemittelttes Spektrum berechnet. Dargestellt wurden die effektiven Signalspannungen (RMS) für alle 10000 Spektrallinien. Abb. 28 zeigt eine Nacht mit GSM-Exposition, Abb. 29 mit UMTS-Exposition, Abb. 30 zeigt zum Vergleich die Sham-Bedingung.

Die im Experiment benutzte GSM-Exposition weist eine starke Amplitudenmodulation auf, wobei das Modulationssignal ein Linienspektrum mit der Grundfrequenz von 217Hz ist. Eine Störung durch dieses Signal würde wegen der Abtastfrequenz von 200Hz bei 17Hz ($217\text{Hz} - 200\text{Hz}$) erscheinen. Im gemittelten Spektrum ist sie offensichtlich selbst bei der vorliegenden Frequenzauflösung von 1/100 Hz schwächer als das Rauschen des Aufzeichnungsgerätes. Die Störspannung vom Lichtnetz bei 50Hz ist dagegen in einigen Spektrallinien z.B. 10mal so stark wie das Rauschen (100fache Leistungsdichte), in den Bildern ein Mehrfaches der Höhe des Diagramms. Dennoch ist auch die Störspannung vom Lichtnetz mit ca. 0,1uV (insgesamt) gering, sie zeigt lediglich die Empfindlichkeit der Spektralmessung gegenüber schmalbandigen Komponenten wie der zu erwartenden Störung durch das GSM-Signal. Andere, sehr schwache Störungen bei 33,3Hz, 66,7Hz und 84,9Hz sind erkennbar, als Ursachen kommen vor allem sonstige elektronische Geräte in Betracht, die tatsächlich niederfrequente Störungen aussenden.

Bei der vorliegenden Auflösung sind Unterschiede von wenigen Prozent in einzelnen Spektrallinien erkennbar. Sie sind ohne Bedeutung für die Auswertung der Biosignale.

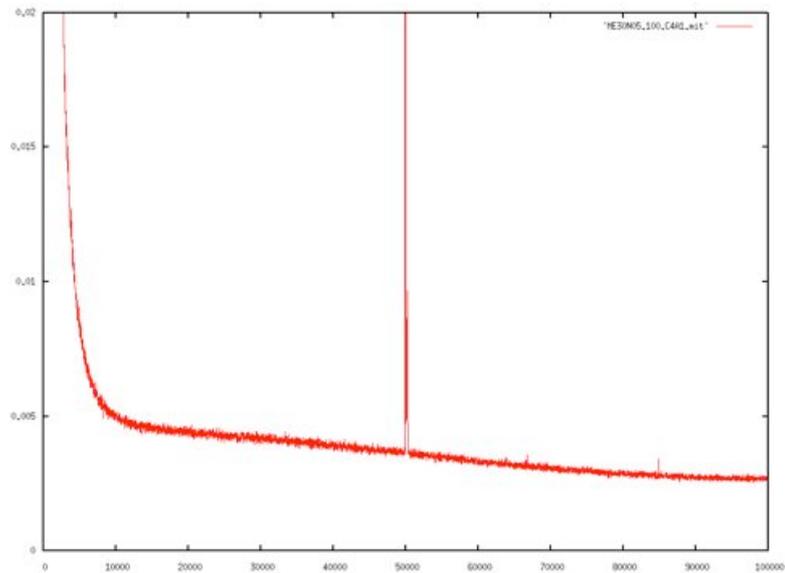


Abb. 28 GSM Melonenspektrum – Abszisse: Frequenz in mHz (Millihertz), Ordinate: Signalspannung (RMS) in μV – erkennbar: Einstreuung vom 50Hz Lichtnetz, jedoch kein 17-Hz-Signal (217Hz-200Hz)

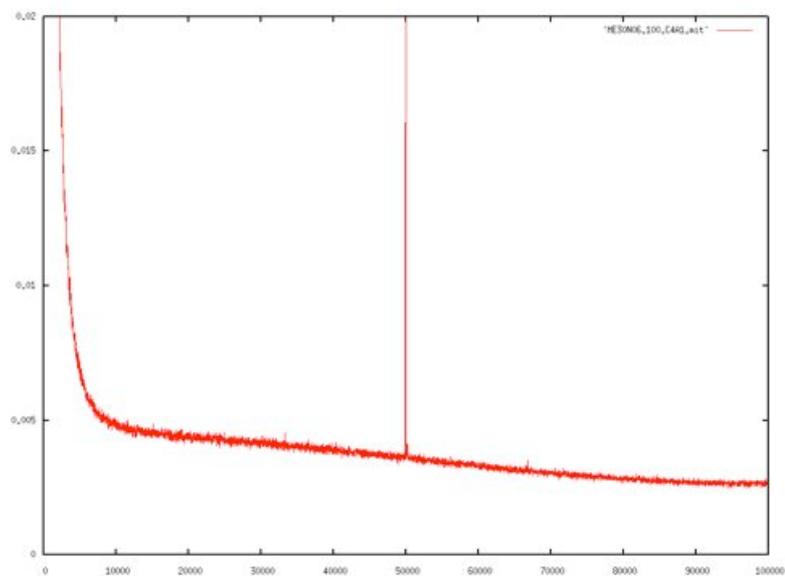


Abb. 29 UMTS Melonenspektrum - Abszisse: Frequenz in mHz (Millihertz), Ordinate: Signalspannung (RMS) in μV

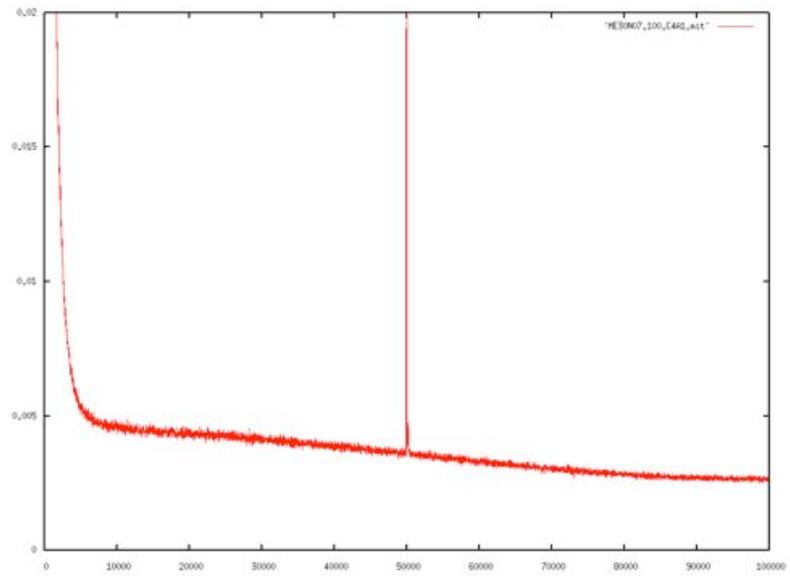


Abb. 30 Sham Melonenspektrum – Abszisse: Frequenz in MHz (Millihertz), Ordinate: Signalspannung (RMS) in μV

B 5 Methodik der Datenerhebung

Die Beschreibung der Methodik umfasst einen Überblick über die verwendeten Verfahren, die nach ihrem Einsatz auf verschiedenen Ebenen des Screenings bzw. in der Studie gegliedert, dargestellt werden.

B 5.1 Untersuchungen während des Screenings

B 5.1.1 Stufe 1: Telefoninterview

Der erste Kontakt zu den Probanden erfolgte telefonisch. Probanden haben sich entweder direkt telefonisch bei den Studienmitarbeiterinnen gemeldet oder sind von ihnen kontaktiert worden, nachdem sie per E-Mail Interesse an näheren Informationen zur Studie bekundet hatten. In dem Gespräch wurden die Interessenten über die Studie (Dauer, Screeninguntersuchungen, Abläufe etc.) informiert. Es erfolgte bereits ein erstes Screening auf Ausschlusskriterien hinsichtlich Alter, Geschlecht, Händigkeit, Beruf/Ausbildung (von Bedeutung für die Machbarkeit der Studie hinsichtlich des zeitlichen Aufwands), Krankheiten, Allergien, Medikamenteneinnahme, Tag- / Nachtrhythmus, Schlafstörungen, elektrisch leitfähige Implantate, übermäßiger Koffein- /Alkoholkonsum, Drogenkonsum und Raucherstatus.

B 5.1.2 Stufen 2 und 3: Fragebögen

Die auf der nächsten Stufe des Screenings verwendeten Fragebögen sind in Tab. 23 zusammengestellt und im Folgenden kurz beschrieben.

Tab. 23: Fragebögen, die zum Screening eingesetzt wurden

- Allgemeiner Schlafragebogen (ASF)
- Morgen-Abendtyp-Bestimmung (MAB)
- Schlaftagebuch (Abend-Morgenprotokolle)
- Pittsburgh Schlafqualitäts-Index (PSQI)
- Epworth Sleepiness Scale (ESS)
- Zung Skala zur Depression (SDS)
- Zung Skala zur Ängstlichkeit (SAS)

Allgemeiner Schlafragebogen (ASF, Zulley, 2002)

Der Allgemeine Schlafragebogen (ASF) ist ein 100-Item-Screeningfragebogen und gehört in der Ambulanz unseres Schlaflabors zu den täglich eingesetzten Verfahren. Er liefert Angaben zum allgemeinen Schlaf-/ Wachverhalten sowie zur Leistungsfähigkeit und gibt Hinweise auf das mögliche Vorliegen von Schlafstörungen und von differentialdiagnostisch zu erwägenden Störungen. Des Weiteren enthält der ASF Fragen zu Vorerkrankungen und zur Familienanamnese sowie zu aktueller Medikamenteneinnahme, zu Alkohol- und Nikotinkonsum.

Morgen-Abendtyp-Bestimmung (MAB; Horne und Östberg, 1976)

Der Morgen-Abend-Fragebogen nach Horne und Östberg (1976) erhebt interindividuelle Differenzen der bevorzugten Zubettgehzeit sowie der bevorzugten Aktivitätsverteilung über den Tag und erlaubt eine Einteilung in 5 verschiedene Typen. Auf diese Weise lässt sich die individuelle Phasenlage der Circadianrhythmik einschätzen. Die Auswertung der 19 Fragen führt zu einer Kategorisierung in „stark ausgeprägte Morgentypen“ (Score>69), „schwach ausgeprägte Morgentypen“ (Score=59-69), „Indifferenztypen“ (Score=42-58), „schwach ausgeprägte Abendtypen“ (Score=31-41) und „stark ausgeprägte Abendtypen“ (Score<31). Probanden mit deutlicher Phasenverschiebung waren in der vorliegenden Studie auszuschließen. In der vorliegenden Studie wurde die deutsche Version von Östberg, 1976, verwendet.

Schlafstagebuch (STB) (Hoffmann et al., 1997)

Über einen Zeitraum von zwei Wochen vor Beginn der Studie dokumentierten die Probanden die Zeit ihres Zubettgehens und Aufstehens, ihre Schlafdauer, Schlaflatenz sowie die Anzahl und Dauer nächtlicher Aufwachepisodes und bewerteten die Schlafqualität. Auf diese Weise sollten Unregelmäßigkeiten der Tag-/Nachtorganisation sowie ein chronischer Schlafmangel aufgedeckt werden und nach Möglichkeit vor Beginn der Studie reguliert werden. Das Abendprotokoll (Arbeitskreis Diagnostik der Deutschen Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin (DGSM) <http://www.charite.de/dgsm/dgsm/>) wurde am Abend vor der Schlaflabornacht eingesetzt. Es erhebt die aktuelle Befindlichkeit, die Leistungsfähigkeit und die Müdigkeit im Verlauf des vorangegangenen Tages. Zusätzlich erfasst das Abendprotokoll, ob die Probanden im Verlauf des Tages besonderen Belastungen ausgesetzt waren oder während des Tages geschlafen haben, was die Ergebnisse der Untersuchungen beeinflussen könnte. Das Morgenprotokoll wurde unmittelbar nach dem Aufstehen im Schlaflabor ausgefüllt. Es erfragt das subjektive Befinden sowie die subjektive Bewertung der Schlafqualität und Schlafdauer. Zusätzlich können Beeinträchtigungen durch die Messsituation angegeben werden.

Pittsburgh Schlafqualitäts-Index (PSQI; Buysse et al., 1989)

Dieses Selbstbeurteilungsverfahren erfasst quantitative Aspekte der Schlafqualität wie Schlafdauer, Einschlaf latenz, Anzahl der nächtlichen Aufwachereignisse, aber auch subjektive Aspekte der Schlaf tiefe und der Erholbarkeit des Schlafes. Der PSQI umfasst 19 Selbstbeurteilungsfragen sowie fünf Fragen, die von einem Partner oder Mitbewohner beurteilt werden sollen, wobei in die Auswertung nur die selbstbeurteilten Fragen eingehen. Die Beurteilungsbasis umfasst die zurückliegenden vier Wochen und insgesamt gehen sieben Komponenten in die Beurteilung ein: subjektive Schlafqualität, Schlaflatenz, Schlafdauer, Schlafeffizienz, Schlafstörungen, Schlafmittelkonsum und Tagesmüdigkeit. Ein Gesamtwert ≤ 5 ist unauffällig, Werte > 5 weist auf eine reduzierte Schlafqualität hin. Die hier verwendete deutsche Version stammt von der DGSM (<http://www.charite.de/dgsm/dgsm/>).

Epworth Sleepiness Scale (ESS; Johns, 1991)

Bei der von Johns (1991) entwickelten Epworth Sleepiness Scale handelt es sich um einen Kurzfragebogen zur Erfassung der Einschlafneigung bzw. allgemeinen Tagesschläfrigkeit unabhängig von der Tages- und Wochenzeit. Retrospektiv wird die subjektiv eingeschätzte Einschlafneigung in acht typischen Alltagssituationen erhoben. Die Bewertung der acht Alltagssituationen durch den Probanden erfolgt auf einer vierstufigen Skala (0 = würde niemals einnicken; 3 = hohe Wahrscheinlichkeit einzunicken). Der Gesamtwert liegt zwischen 0 und 24, bei einem Wert > 10 wird von einer erhöhten Einschlafneigung ausgegangen. In der vorliegenden Studie wurde die deutsche Version der DGSM eingesetzt (<http://www.charite.de/dgsm/dgsm/>).

Self-Rating Depression Scale (SDS; Zung, 1965)

Die Self-Rating Depression Scale (SDS) ist eine von Zung (1965) entwickelte Selbstbeurteilungsskala zur Aufdeckung und quantifizierbaren Abschätzung depressiver Zustände. Der Proband gibt auf einer vierstufigen Skala (von 1 = „nie oder selten“ bis 4 = „meistens oder immer“) an, wie oft Symptome, Erlebnisse oder Beschwerden bei ihm auftreten. Die Summe der Punktwerte der 20 Items ergibt den Gesamt-Rohwert, zum Ausschluss aus der Studie führten Punktwerte über 40.

Self-Rating Anxiety Scale (SAS; Zung, 1971)

Bei der von Zung (1971) entwickelten Self-Rating Anxiety Scale handelt es sich um eine Selbstbeurteilungsskala zur Erfassung von Angst als klinischer Erkrankungsform. Die Einschätzung der Auftretenshäufigkeit von Symptomen, Erlebnissen oder Beschwerden durch den Probanden erfolgt auf einer vierstufigen Skala (von 1 = „nie oder selten“ bis 4 = „meistens oder immer“). Die Summe der gewichteten Items ergibt den Gesamt-Rohwert, Rohwerte > 36 gelten als Morbiditätshinweis und führten zum Ausschluss aus der Studie.

B 5.1.3 Stufe 4: Screeninguntersuchung

Sofern die Durchsicht der Fragebögen keine Hinweise auf das Vorliegen von Ausschlusskriterien ergab, wurden die Probanden zu einer Screeninguntersuchung eingeladen, die von einer Studienärztin durchgeführt wurde. Das Screening umfasste die in Tabelle 24 zusammengestellten Untersuchungen.

Tab. 24: Untersuchungen im Vorfeld der Studie (Screeninguntersuchungen)

- neurologisch-psychiatrisch-internistische Untersuchung
- Blutentnahme und Bestimmung von Na, K, Glucose i. S., TSH (bei abweichenden Werten vom Normbereich zusätzliche Bestimmung von fT3 und fT4), GOT, GPT, γ -GT, Triglyceride, Cholesterin, Kreatinin, CK, BSG, CRP, Blutbild
- Urinuntersuchung (Drogenscreening, Protein ges. und Glucose i. U.)
- EKG
- Wach-EEG
- Ambulante Aufzeichnung des frontalen Schlaf-EEG mittels QUISI[®] (portables Aufzeichnungsgerät) bei auffälligem Befund im Schlafragebogen
- Ambulante Registrierung von Atmungsparametern (SOMNOcheck)

Bereits in der Screeningphase wurden vier apparative Verfahren eingesetzt, zum einen eine ambulante Aufzeichnung des frontalen Schlaf-EEG mittels Quisi[®], zum anderen ein ambulantes Schlafapnoe-Screening mittels SOMNOcheck bzw. SOMNOcheck effort, die Aufzeichnung eines Routine-EKG nach Einthoven, Goldberger (Brustwandableitung und Extremitäten) mit einem Schwarzer CU12 (Schreibgeschwindigkeit 50 mm/s und einer Auflösung von 10mm/mV) sowie ein Routine-EEG. Die Aufzeichnung des Routine-EEGs erfolgte mit einem Gerät der Firma Medtronic (Programm Galileo NT). Zur Ableitung des EEG an 19 Standard-Positionen (Positionierung siehe 10-20-System) plus zwei Mastoidelektroden, Referenz (Fpz) und Erde (Position zwischen Fp2 und F8) wurden Hauben mit Silber/Silberchloridelektroden der Firma Schröter verwendet. Aufgezeichnet wurde ein 15minütiges Ruhe-EEG, 3 min Hyperventilation, 2min nach der Hyperventilation (post-HV), Fotostimulation (in folgender Reihenfolge: 3, 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 25, 30 25, 20, 15, 10, 5 Hz). Gemeinsam mit dem EEG wurde zu Kontrollzwecken ein EKG-Kanal (linker und rechter Unterarm) mit Neuroline-Elektroden abgeleitet, für alle EEG-Kanäle wurde Fpz als gemeinsame Referenz benutzt. Es wurde darauf geachtet, dass die Übergangswiderstände kleiner als 10 k Ω waren.

QUISI[®] ist ein einkanaliges Gerät zur Aufzeichnung und automatischen Auswertung von Schlaf-EEG, das mit dem Ziel entwickelt wurde, ein preiswertes, selbst applizierbares Gerät zu erhalten, mit dem Arzt und Patient im Vorfeld der klinischen Diagnostik und ggf. zur therapeutischen Nachkontrolle ein Schlaf-EEG-Profil erstellen können.

Mit QUISI[®] ist es erstmals gelungen, unter ausschließlicher Nutzung nur eines EEG-Kanals, mit Hilfe leicht (an der Stirn, unter dem Haaransatz) anzubringender Elektroden, Schlafstadien automatisch mit Hilfe Neuronaler Netze zu klassifizieren. Das Schlafprofil und die ausgegebenen quantitativen Schlafparameter (Schlafeffizienz, Gesamtschlafzeit, Schlafperiode, Tiefschlafanteil, REM-Schlaf-Anteil, Wachanteil, Anzahl der Schlafstadienwechsel etc.) gestatten Rückschlüsse auf die Qualität des Schlafes. So sind Ein- und Durchschlafstörungen, Störungen der Schlafzyklik und der Schlaforganisation, d.h. der Verteilung von Tief- und REM-Schlaf sowie häufige Stadienwechsel bereits auf der Basis des Schlafprofils zu erkennen.

SOMNOcheck und SOMNOcheck effort sind ambulant einsetzbare Geräte, mit denen ein Schlafapnoe-Screening durchgeführt werden kann (sowie bei Bedarf eine Therapiekontrolle). Beide Geräte messen u.a. den Atemfluss, die Herzfrequenz, die Sauerstoffsättigung und die Körperlage. Darüber hinaus zeichnen sie die Körperlage auf. Die aufgezeichneten Signale ermöglichen die Erkennung von Apnoen, Hypopnoen, Sauerstoffentsättigungen und Herzfrequenzvariationen, wobei aufgrund der zusätzlichen Messung von Thorax- und Abdomenexkursionen zwischen zentralen, obstruktiven und gemischten Apnoen unterschieden werden kann. In der vorliegenden Studie wurden diese beiden Geräte zum Screening auf schlafbezogene Atmungsstörungen im Allgemeinen eingesetzt.

B 5.1.4 Stufe 5: EEG- und polygraphische Aufzeichnungen in der Nacht und am Tag

Die polygraphischen Daten wurden mit einem portablen Gerät (Vitaport System, Becker Ingenieurbüro, Karlsruhe Germany) erhoben. Es wurden 19 EEG-Elektroden nach dem nach dem 10-20 System, zwei Mastoidelektroden und eine Erdelektrode (Fpz) platziert (siehe Abb. 31 und Abb. 32) und gegen die gemeinsame Referenz Cz abgeleitet. Zur Auswertung der EEG-Signale nach Rechtschaffen und Kales (1968) wurden daraus folgende bipolare Ableitungen gebildet C3 – A2, C4 – A1, C3 – C4, O1 – A2, O2 – A1.

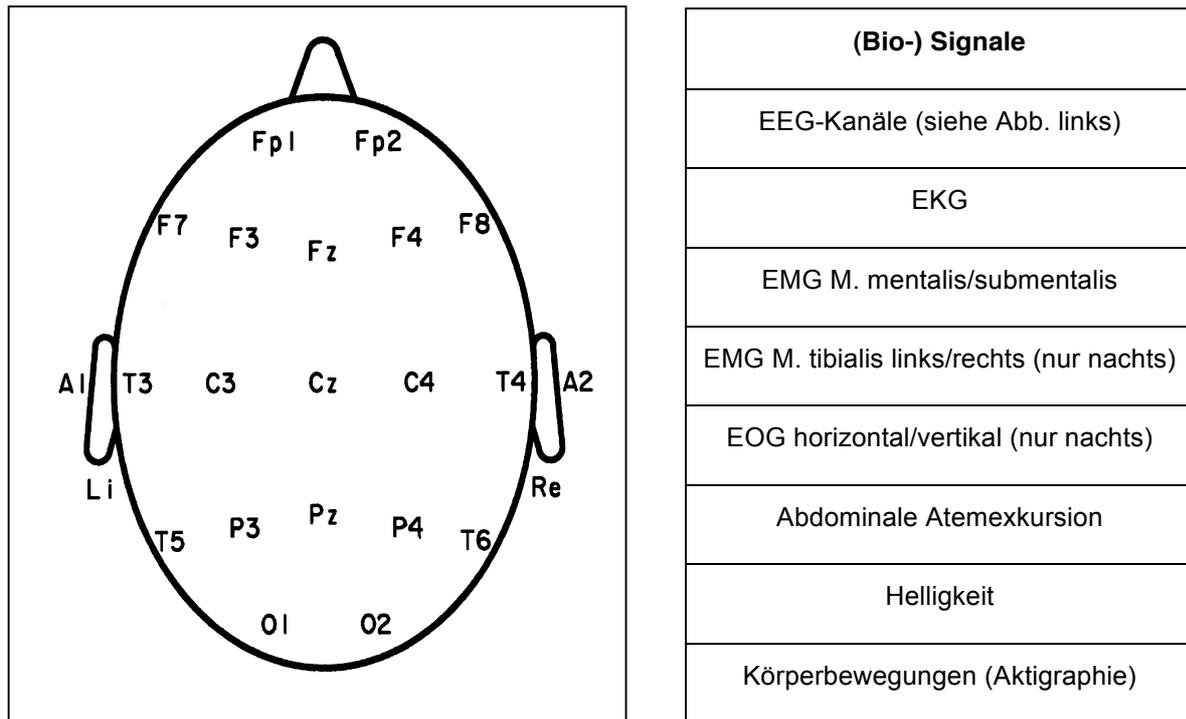


Abb. 31 & 32: links: Positionierung der Ableitelektroden (nach dem 10-20 System) in der Adaptationsnacht und in allen Studiennächten (sowie am Übungstag und an den Testtagen), rechts: Auflistung der aufgezeichneten (Bio-) Signale.

Zur Aufzeichnung der Electroencephalogramm (EEG), Electrooculogramm (EOG) und Electromyogramm (EMG) -Signale wurden Gold-Elektroden verwendet, die mit speziell für diese Anwendung konstruierten Kabeln versehen wurden (vergl. Kap. B 4.5). Die Impedanz wurde $< 5 \text{ k}\Omega$ gehalten. Die EMG-Elektroden wurden bilateral über dem musculus mentalis platziert. Zusätzlich zu den am Kopf abgeleiteten Biosignalen wurde in der Nacht ein subclaviculäres Elektrokardiogramm EKG aufgezeichnet sowie ein EMG bilateral an beiden Beinen jeweils über dem anterioren musculus tibialis ebenfalls mit Goldnapfelektroden. Zur Aufzeichnung der thorakalen Atemexkursionen wurde ein Atemgurt der Firma Sleepmate® mit Piezo-Sensor verwendet. In Abb. 33 sind die Positionen der Elektroden am Kopf und im Gesicht zu sehen. Abb. 34 zeigt die Antenne mit Stoffhülle, wie sie am Probandenohr fixiert wurde.



Abb. 33: Proband mit 19 nach dem 10-20-System positionierten Elektroden.



Abb. 34: Proband mit Dualband-Antenne mit Stoffhülle

Zu Kontrollzwecken wurden außerdem ein Aktigraphiesignal (Beschleunigungssensor, platziert auf der Schulter bzw. am Oberarm) sowie ein Maß für die Beleuchtungsstärke (Sensor auf der Stirn) aufgezeichnet.

Zur Aufzeichnung der Signale wurde ein speziell für die Studie entwickeltes Polygrafie-System benutzt. Dessen Kern war ein Sondermodell des Varioport-Systems der Firma Becker Meditec, Karlsruhe, in einem Metallgehäuse, ausgestattet mit 32 bipolaren Eingangskanälen, die an vielpoligen Steckverbindern herausgeführt sind. Die Stromversorgung erfolgte über auswechselbare Akkus. Aufgezeichnet wurde auf CF-Speicherkarten, die jeweils nach Ende der Nacht- bzw. Tagesuntersuchung an einem PC ausgelesen wurden.

Um zu verhindern, dass durch die im Experiment benutzten modulierten Hochfrequenzsignale in der Elektronik des Aufzeichnungsgerätes Artefakte entstehen, wurden folgende Maßnahmen, die in Kap. B 4.5 beschrieben sind, ergriffen.

Die Abtastfrequenz für alle Signale und für die Marker betrug 200 Hz. Für alle Signale waren 70 Hz – Tiefpassfilter wirksam. Das Atem- und das Beleuchtungsstärkesignal wurden ohne Hochpassfilter aufgezeichnet ("DC"-Kanäle), für alle anderen Signale waren Hochpassfilter erster Ordnung mit ca. 0.25s Zeitkonstante wirksam.

B 5.2 Fragebögen und Selbstbeurteilungsverfahren während der Studie

Da die Gesamtdauer des Experiments für einen Probanden sich über einen Zeitraum von 20 Wochen erstreckte, wurden einige Skalen in der Mitte des Untersuchungszeitraums und zum Ende des Untersuchungszeitraums noch einmal erhoben (vergl. Tab. 25), um die Homogenität der Schlafqualität im Allgemeinen und der Tagesbefindlichkeit überprüfen bzw. kontrollieren zu können:

Tab. 25: Skalen, die in der Mitte und zum Schluss des Untersuchungszeitraums erneut ausgefüllt wurden.
<ul style="list-style-type: none">• Pittsburgh Schlafqualitäts-Index (PSQI)• Epworth Sleepiness Scale (ESS)• Zung Skala zur Depression (SDS)• Zung Skala zur Ängstlichkeit (SAS)

Zu jeder Studiennacht wurden zusätzlich ausgefüllt:

- Abend- und Morgenprotokolle (siehe auch B 5.1.2)
- Visuelle Analogskalen zur Schläfrigkeit:

Auf einer 10 cm langen Linie mit den Bezeichnungen „wundervoll frisch und energiegeladen“ sowie „schrecklich müde und lustlos“ wurde durch einen senkrechten Strich eine dem subjektiv empfundenen Grad der Wachheit entsprechender Punkt markiert.

Die visuellen Analogskalen zur Schläfrigkeit wurden auch bei den Tagestestungen eingesetzt und zwar vor und nach jedem kompletten Testdurchgang.

B 5.3 Psychophysiologische Experimente im Laufe der Studie

Zusätzlich zu den Geräten, die zur Registrierung der Biosignale eingesetzt wurden, kamen Computer bei der Durchführung der psychophysiologischen Tests zum Einsatz sowie ein Pupillograph (CIP, Fa. AMTech GmbH, Weinheim) zur Registrierung des Pupillenverhaltens in Dunkelheit. Im Folgenden sind die psychophysiologischen Tests, die zur Erfassung eines möglichen Einflusses elektromagnetischer Felder auf die Gehirnfunktion am Tag (in Ruhe und bei kognitiver Beanspruchung) eingesetzt wurden, kurz beschrieben. Wie in Kap. B 5.1.4 bereits erwähnt, wurde das EEG während dieser nachfolgend aufgelisteten Tests kontinuierlich mittels des ambulanten Gerätes Varioport der Firma Becker Meditec (Karlsruhe) registriert. Die am Tag aufgezeichneten EEG-Daten wurden herangezogen, um den Einfluss der elektromagnetischen Felder (GSM 900 und UMTS) auf das spontane Wach-EEG sowie evozierte und ereigniskorrelierte Potentiale zu analysieren. Die Zielparameter für die im Folgenden aufgeführten Tests wurden aus dem wie hier beschrieben kontinuierlich abgeleiteten EEG bestimmt.

B 5.3.1 Ruhe- EEG

Das Ruhe-EEG misst spontane Schwankungen der Hirnstromaktivität im Ruhezustand (ohne Intervention) bei geschlossenen Augen. Unter diesen Bedingungen zeigt jede Hirnregion eine bestimmte Form der lokalen Grundaktivität, wobei die occipital bis parietal auftretende Grundaktivität auch als Grundrhythmus bezeichnet wird, der den EEG-Typ bestimmt. Bei ca. 85% aller Menschen liegt die occipitale Grundaktivität im Alpha-Bereich, und nur Personen mit einem solchen Alpha-EEG wurden in die Studie aufgenommen.

B 5.3.2 Alpha-Attenuation Test (AAT)

Der Alpha Attenuation Test (Stampi et al. 1993, 1995) wurde als physiologisch basierte Methode zur Erfassung von Variationen im Grad der Schläfrigkeit entwickelt. Hintergrund ist, dass die bei geschlossenen Augen ableitbare alpha Aktivität eine Tendenz zur Abnahme bei zunehmender Schläfrigkeit aufweist. Gleichzeitig nimmt bei geöffneten Augen die alpha Aktivität bei zunehmender Schläfrigkeit zu. Der Koeffizient der alpha Aktivität bei geschlossenen und geöffneten Augen (Alpha Attenuation Coefficient, AAC), kann somit als Indikator physiologischer Schläfrigkeit betrachtet werden.

B 5.3.3 Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) und langsame Hirnpotentiale

Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP; event-related potentials, ERP) sind hirnelektrische Korrelate konzentrierter neuronaler Aktivität (Gerloff 2005). Die Begriffsbestimmung ist unscharf, nach Gerloff (2005) sind sie pragmatisch abzugrenzen von evozierten Potentialen mit kurzer Latenz (siehe Kap. A 4.2). Im Gegensatz zu evozierten Potentialen, die überwiegend von physikalischen Reizparametern abhängen, spiegeln EKP komplexere Verarbeitungsprozesse des Cortex wider, was sie von physikalischen Reizparametern unabhängiger macht. Von den EKP abzugrenzen sind andererseits

auch die so genannten *langsamen Hirnpotentiale (slow potentials)*, die häufig erst 500 ms nach Reizbeginn nachweisbar sind. Zu dieser Gruppe gehören prinzipiell auch die Contingent Negative Variation (CNV, siehe A 4.2 und B 5.3.3.1) sowie das Bereitschaftspotential (BP, *readiness potential*, RP, siehe B 5.3.3.2), die mit ihren Latenzen zwischen EKP und langsamen Hirnpotentialen liegen und beide zu den motorisch evozierten kortikalen Potentialen zählen. In der vorliegenden Studie wurden die drei im Folgenden beschriebenen Verfahren zur Erzeugung langsamer Hirnpotentiale herangezogen.

B 5.3.3.1 Contingent Negative Variation (CNV)

Die Contingent Negative Variation (CNV) gehört - wie das Bereitschaftspotential (B 5.3.3.2) - zu den motorisch evozierten oder auch bewegungskorrelierten kortikalen Potentialen (movement related cortical potentials, MRCP). Beide nehmen eine Zwischenstellung zwischen EKP und langsamen Hirnpotentialen ein. Die CNV wird im Rahmen einer getriggerten Bewegung abgeleitet, wodurch sie sich vom Bereitschaftspotential unterscheidet. Die von Walter et al. (1964) erstmals beschriebene CNV wird als Ausdruck eines Vorbereitungs- und Orientierungsprozesses im Hinblick auf die Ausführung einer geforderten motorischen Antwort verstanden (Gerloff 2005). Es werden zwei Stimuli präsentiert, zunächst ein Warnsignal (S1), gefolgt von einem imperativen Stimulus (S2), der eine Reaktion erfordert, die nicht notwendigerweise motorisch sein muss. Das Warnsignal wird mit einer N100 beantwortet, der zweite Stimulus mit einer langsamen Negativierung. Als Antwortkomponenten finden sich eine frühe und eine späte CNV, wobei die frühe CNV die Orientierungsreaktion auf das Warnsignal repräsentiert und die späte als Antwort als Korrelat der Antwortvorbereitung (typischerweise Bewegungsvorbereitung) interpretiert wird (Gerloff 2005). Während die frühe CNV direkt nach dem Warnsignal beginnt, ist der Beginn der späten CNV ca. 0.5 – 1.0 s vor dem zweiten Stimulus zu beobachten.

Die Generatoren der späten CNV unterscheiden sich von den Generatoren des BP (Gerloff 2005). Das Maximum der CNV lässt sich symmetrisch frontal beobachten. Bei verbalen Stimuli und verbalen Reaktionen kann es zu einer Linkslateralisation kommen.

Die Aufgabe zur Erzeugung einer Erwartungswelle (Contingent Negative Variation, CNV) ist charakterisiert durch Präsentation eines Warnreizes (S1), gefolgt von einem Befehlsreiz (S2), auf den vom Probanden möglichst schnell durch Tastendruck reagiert werden sollte. Der S1-Stimulus bestand im Erscheinen des Zeigers einer symbolisierten Uhr in der 12:00 Uhr Position. Der Beginn der Zeigerbewegung stellte den S2-Stimulus dar. Die Zeitspanne zwischen S1 und S2 betrug 2160 ms. Dies entsprach der Zeitdauer für drei Umdrehungen des Zeigers. Bei Betätigung der Taste blieb der Zeiger stehen, verschwand vom Bildschirm und tauchte nach einer zufälligen Zeit zwischen zwei und vier Sekunden wieder auf (neuer Stimulus S1). Ein Testblock bestand aus 50 Trials, insgesamt war die Dauer des Tests < 5 Minuten. Dieser Test wurde identisch wie u.a. bei Freude et al. (2000)

beschrieben durchgeführt. Neben den EEG-Variablen lieferte dieser Test auch eine Reaktionszeit als kognitiven Zielparame-ter.

B 5.3.3.2 Bereitschaftspotential (BP)

Wie die CNV gehört das Bereitschaftspotential (BP) zu den motorisch evozierten oder auch bewegungskorrelierten kortikalen Potentialen (movement related cortical potentials, MRCP). Es unterscheidet sich von der durch eine Bewegung getriggerte CNV dadurch, dass das BP die kortikale Aktivität im Zusammenhang mit einer selbstinitiierten Willkürbewegung darstellt (Gerloff 2005). Zur Analyse werden die jeweils letzten 2-3 s vor Ausführung der Willkürbewegung herangezogen (Back-averaging). Das typische Bereitschaftspotential, das in Abb. 35 lässt sich in verschiedene Komponenten zerlegen:

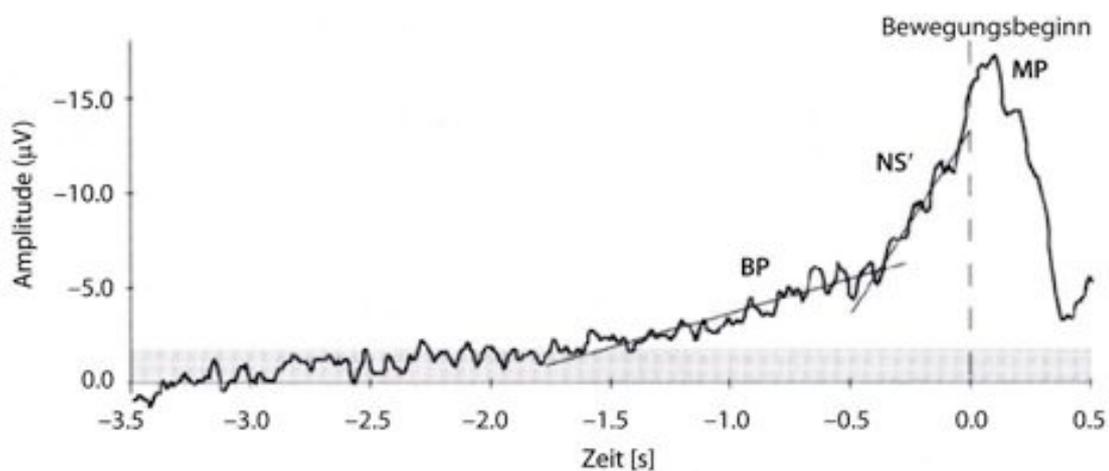


Abb. 35: Bereitschaftspotential vor einer einfachen Fingerbewegung. Der schraffierte Bereich entspricht 3 Standardabweichungen der Amplitudenschwankungen in der Baseline-Periode (-3,5 bis -3,0 s vor Bewegungsbeginn; aus Stöhr et al., 2005).

Die als Bereitschaftspotential bezeichnete Komponente beginnt ca. 1.5 s vor Beginn der Bewegung. Etwa 500 ms vor Bewegungsbeginn wird der Anstieg steiler, diese Komponente wird als NS' (terminal negative slope) bezeichnet. Es folgt eine kurze Positivierung, die in eine negative Welle, dem Motorpotential (MP), übergeht und die in der Regel auch das absolute Maximum der Kurve darstellt. Hinsichtlich des Auftretens dieser Komponenten lassen sich topographische Unterschiede beobachten. Das BP ist typischerweise symmetrisch über dem frontozentralen mesialen Cortex zentriert, während die Komponenten NS' und MP fokal über der Zentralregion kontralateral zur bewegten Hand lokalisiert sind (Gerloff 2005). Wie bereits erwähnt, haben das BP und die späte Komponente der CNV unterschiedliche Generatoren.

In diesem Test wurden die Probanden gebeten, mit ihrem rechten Zeigefinger eine Taste zu beliebigen Zeitpunkten insgesamt 30-mal zu drücken. Augenbewegungen wurden vermieden, indem die Probanden angehalten waren, eine Ziffer in der Mitte des Bildschirms zu fixieren, die sich beim

Tastendruck um jeweils eins erhöhte. Wie für die unter B 5.3.3.1 beschriebenen Tests wurde auch hier der Test genauso wie u.a. bei Freude et al. (2000) beschrieben durchgeführt. Dieser Test dauerte ca. 3 Minuten.

B 5.3.3.3 DC-Potential und Visuelle Folgereaktion (VMT)

Langsame Hirnpotentiale im engeren Sinn, die auch als DC-Potentiale bezeichnet werden, sind bei komplexen neurokognitiven Prozessen zu beobachten, so z.B. bei thematischer Sprachverarbeitung, mentalen räumlichen Aufgaben, mentaler Würfelrotation, arithmetischen Aufgaben, oder Musikverarbeitung und Bewegungssehen. In der vorliegenden Studie wurden entsprechende langsame Hirnpotentiale durch eine visuelle Folgereaktionsaufgabe (visual monitoring task, VMT) erzeugt. Als visuelle Folgereaktionsaufgabe wurde die clock-monitoring task (CMT) durchgeführt, die bei Freude et al. (1999) näher beschrieben und in Abb. 36 dargestellt ist.

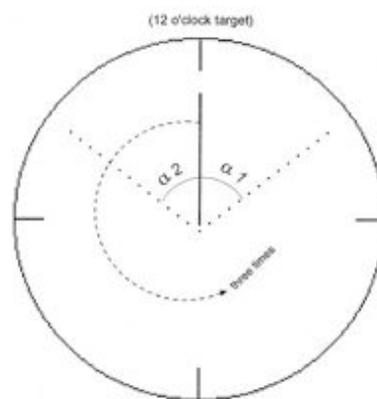


Abb. 36: Schematische Darstellung der Clock-Monitoring Task (CMT). Die Probanden mussten sich einen sich drehenden Zeiger exakt in der 12:00 Uhr Position stoppen (aus Freude et al., 1999)

Am Bildschirm wurde eine symbolisierte Uhr dargestellt (der Durchmesser entspricht einem Blickwinkel von 9°). Der Uhrzeiger drehte sich gegen den Uhrzeigersinn und musste nach drei kompletten Umläufen so genau wie möglich in der 12:00 Uhr Position gestoppt werden. Dies geschah durch Betätigen einer Maustaste mit dem rechten Zeigefinger. Eine Zeigerumdrehung dauerte 720 ms. Das Intertrialintervall variierte zufällig zwischen zwei und vier Sekunden. Am Beginn gab es 10 Übungstrials. Ein Testblock bestand aus 50 Trials und dauerte < 5 Minuten. Auch hier war neben den EEG-Variablen ein Leistungsparameter (Betrag der Winkelabweichung von der 12:00 Uhr Position beim Stoppen des Zeigers) auswertbar. Auch dieser Test wurde identisch wie u.a. bei Freude et al. (2000) beschrieben durchgeführt.

B 5.3.4 Evozierte Potentiale (EP)

Die evozierten Potentiale unterscheiden sich von den EKP durch eine kürzere Latenz sowie ihre deutlich höhere Abhängigkeit von den physikalischen Reizparametern. Es werden u.a. visuell evozierte Potentiale (VEP), somatosensorisch evozierte Potentiale (SEP) und akustisch evozierte

Potentiale (AEP) unterschieden. In der vorliegenden Studie kamen zwei Paradigmen zur Erzeugung akustisch evozierter Potentiale (AEP) zur Anwendung (siehe auch Abb. 3 in Kap. A 4.2).

Die Nomenklatur der Komponenten ist uneinheitlich, so werden die Potentiale P1, N1, P2 und P3 auch als P100, N100, P200 und P300 bezeichnet, wobei P positive und N negative Potentiale bedeutet. Es werden frühe (Hirnstammpotentiale), mittlere und späte Potentiale unterschieden, wobei die intraindividuelle Varianz der frühen Potentiale (mit Latenzen < 100 ms) größtenteils durch physikalische Reizparameter erklärbar ist, während spätere Komponenten eher durch endogene Einflussfaktoren (Aufmerksamkeit, Motivation etc.) geprägt sind. Während einige Komponenten, wie z.B. N100 und P200, nach jedem sensorischen Stimulus auftreten (obligatorische Komponenten), treten andere, wie z.B. die P300 nur unter bestimmten Bedingungen auf. Zur Analyse der Komponenten N100, P200 und P300 wurden die folgenden zwei Paradigmen herangezogen:

B 5.3.4.1 Akustisch evozierte Potentiale (AEP) - Wahlreaktion auf Töne

Bei der Wahlreaktion auf Töne wurden in zufälliger Folge und in zufälligem zeitlichem Abstand (2.5 bis 7.5 sec) Töne zweier unterschiedlicher Tonhöhen (1000 Hz und 2000 Hz) eingeschaltet. Der Proband sollte den jeweiligen Ton möglichst schnell durch Drücken einer Taste abschalten. Es gab für jeden der beiden Töne eine eigene Taste. Mit der linken Hand wurde der tiefe, mit der rechten Hand der hohe Ton abgeschaltet. Der Proband saß auf einem Stuhl in bequemer Haltung mit geschlossenen Augen. Dieser Test dauerte ca. 5 Minuten.

B 5.3.4.2 Akustisch evozierte Potentiale (AEP) – Oddball Paradigma

Die P300-Komponente des akustisch evozierten Potentials gehört wie die Contingent Negative Variation (CNV) und das Bereitschaftspotential zu den späten AEPs (Stöhr et al. 2005). Die P300-Komponente kann in eine P3a-, eine P3b- und eine „slow wave“-Komponente unterteilt werden, wobei die P3b-Komponente der klassischen P300 entspricht (Hegerl 1998, Stöhr et al. 2005). Nach Stöhr et al. (2005, S. 515) ist davon auszugehen, „dass die P300 vorwiegend im Bereich des temporoparietalen Überganges und den benachbarten parietalen und temporalen neokortikalen Regionen generiert wird.“

Die P300-Komponente, die mit einer Latenz von ca. 300 ms nach unerwarteten, aufgabenrelevanten Stimuli beobachtet werden kann, wird üblicherweise mit einem klassischen Oddball Paradigma untersucht, bei dem häufige und seltene Töne, die sich in ihrer Frequenz deutlich unterscheiden, mittels Kopfhörer in randomisierter Form in gut wahrnehmbarer Lautstärke dargeboten werden (Hegerl 1998). Die P300 kommt bei den seltenen Tönen zur (siehe **Abb. 37**) Darstellung.

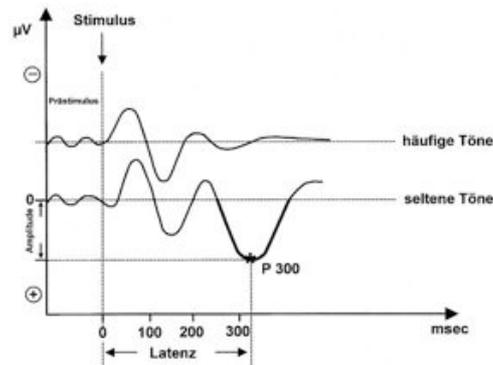


Abb. 37: P300 ist ein positives Potential, das mit einer Latenz von ca. 300 msec nach unerwarteten, aufgabenrelevanten, seltenen Stimuli auftritt. Gezeigt sind Reizantworten nach häufigen (oben) und seltenen Tönen (unten) (aus Hegerl, 1998).

In der vorliegenden Studie kam ein modifiziertes Oddball-Paradigma zur Anwendung, in dem neben häufigen und seltenen Tönen auch so genannte Novel-Reize dargeboten wurden (siehe B 6.2.4.2). Zur Bestimmung der P300-Komponente des akustisch evozierten Potentials kam ein modifiziertes Oddball-Paradigma zur Anwendung. Über Lautsprecher wurden akustische Reize dargeboten, die einer von drei Reizklassen angehörten: häufige Töne (1000 Hz) in 60% der Trials, seltene Töne (2000 Hz) in 20% der Trials sowie so genannte Novel-Reize (komplexe Geräusche) ebenfalls in 20% der Trials. Die Probanden hatten die Aufgabe, mit dem Zeigefinger der rechten Hand eine Maustaste zu drücken, wenn ein seltener Ton präsentiert wurde. Die akustischen Reize hatten eine Dauer von 150 ms und eine Lautstärke (Schalldruckpegel) von 60 dB. Dieser Versuch wurde wie u.a. bei Eulitz et al. (1998) beschrieben, durchgeführt. Dieser Test dauerte insgesamt ca. 15 min.

B 5.3.5 Pupillometrie (CIP 8.0, Fa. AMTech GmbH, Weinheim)

Die Pupillometrie wurde eingesetzt zur kontinuierlichen Messung des spontanen Pupillenverhaltens im Dunkeln. Dazu saß der Proband in einem ruhigen, komplett abgedunkelten Raum und fixierte mit dem nicht gemessenen Auge einen kleinen roten Leuchtpunkt in 2m Entfernung. Der Kopf des Probanden wurde durch eine kombinierte Kinn- und Stirnstütze abgestützt. Nach einer ein- bis zweiminütigen Adaptation an die Dunkelheit wurde über einen Zeitraum von 12 Minuten kontinuierlich der Pupillendurchmesser mittels einer Infrarot-Videokamera aufgezeichnet. Dabei zeigen sich mit zunehmender Schläfrigkeit charakteristische Veränderungen im Pupillenverhalten und -durchmesser (Wilhelm et al., 1996; Danker-Hopfe et al., 2001, Wilhelm, 2007).

B 5.4 Tests zur Objektivierung aufmerksamkeitsbezogener Prozesse

Zur Untersuchung der Auswirkung von EMF-Exposition auf aufmerksamkeitsbezogene Prozesse wurde das von der Arbeitsgruppe Vigilanz der Deutschen Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin (Weeß et al. 1998; 2000) zur Vereinheitlichung der Terminologie müdigkeits- und schläfrigkeitsbezogener Prozesse vorgeschlagene Aufmerksamkeitsmodell benutzt, das auf Posner und Rafal (1987) zurückgeführt werden kann.

Nach diesem Aufmerksamkeitsmodell können fünf aufmerksamkeits- bzw. müdigkeitsbezogene Aspekte unterschieden werden, die der Leistungsfähigkeit zu Grunde liegen: tonische und phasische zentralnervöse Aktivierung (Alertness), selektive Aufmerksamkeit, Vigilanz und geteilte Aufmerksamkeit. Die unbewusste zentralnervöse Aktivierung mit ihrer tonischen und phasischen Komponente geht dabei den bewusst kontrollierbaren Aufmerksamkeitsfunktionen der selektiven Aufmerksamkeit, Vigilanz und geteilten Aufmerksamkeit voraus (Weeß et al., 1998) und wurde mit den zuvor beschriebenen psychophysiologischen Tests (siehe Kap. B 5.3) erfasst. Unterschiedliche Wachheitsgrade werden dabei auf die tonische Komponente der zentralnervösen Aktivierung zurückgeführt, die circadianen Schwankungen unterliegt. Die phasische Komponente hingegen bezieht sich auf die Fähigkeit eines Individuums, das zentralnervöse Aktivierungsniveau in Erwartung eines relevanten Reizes, der eine Reaktion erfordert, vorübergehend zu erhöhen.

Selektive Aufmerksamkeit bezeichnet in diesem Modell die Fähigkeit zur Auswahl relevanter Reize aus der Summe der auf ein Individuum einwirkenden Reize. Unter geteilter Aufmerksamkeit wird die Fähigkeit zu schneller, automatisierter und kontrollierter sowie geteilter und paralleler Informationsverarbeitung verstanden. Vigilanz schließlich wird definiert als unspezifische, organismische Reaktionsbereitschaft oder Fähigkeit, die Aufmerksamkeit in einer monotonen Situation mit selten und zufällig auftretenden Reizen über einen längeren Zeitraum auf einem hohen Niveau zu halten (Weeß et al., 1998).

Die im Rahmen der Tagesuntersuchung durchgeführten Tests sind in Tabelle 26 hinsichtlich der mit ihnen gemessenen Komponenten dargestellt. Im Folgenden werden lediglich die Tests noch einmal aufgegriffen, die unter B 5.3 noch nicht beschrieben sind.

Tab. 26: Tests zur Erfassung von Aufmerksamkeitskomponenten	
Aufmerksamkeitskomponente Merkmale	Testverfahren
<p>Selektive Aufmerksamkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fähigkeit, unter hohem Tempo die Aufmerksamkeit über längere Zeiträume für eine bestimmte Aufgabe aufrecht zu erhalten • Fähigkeit, Störreize, Interferenzen und Ablenkungen „auszublenden“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Daueraufmerksamkeitstest (DAUF) aus dem Wiener Testsystem
<p>Geteilte Aufmerksamkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung • Fähigkeit zu geteilter und paralleler Informationsverarbeitung • Fähigkeit zu automatisierter und kontrollierter Verarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Test „Geteilte Aufmerksamkeit“ (TAP: Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung von Zimmermann und Fimm)
<p>Vigilanz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unspezifische organismische Reaktionsbereitschaft, Fähigkeit über lange Zeiträume auf seltene und zufällig auftretende Reize zu reagieren • unterliegt der bewussten Kontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Vigilanztest (TAP: Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung von Zimmermann und Fimm)

B 5.4.1 Daueraufmerksamkeitstest

Mittels des computerisierten Tests DAUF aus dem Wiener Testsystem wurde die Daueraufmerksamkeit im Sinne einer längerfristigen Aufmerksamkeit bei hoher Reizfrequenz erfasst. Gemessen wurden die Genauigkeit sowie die Schnelligkeit der Testbearbeitung. Somit beinhaltet das Testverfahren auch eine zeitliche Anforderung (Speed-Test-Verfahren), wodurch die Effekte eines gestörten Schlafes besser wiedergegeben werden als durch Tests ohne zeitlichen Druck (Power-Testverfahren) (Weeß et al., 1998). Die Testdauer betrug ca. 10 Minuten.

Der Testaufbau des Daueraufmerksamkeitstests aus dem Wiener Testsystem ist wie folgt (Schuhfried 1993): Auf dem Bildschirm werden sieben Dreiecke in einer Reihe gleichzeitig dargeboten, wobei die Spitzen der einzelnen Dreiecke jeweils nach oben oder unten zeigen können (Abb. 38). Für die durchgeführte Testung wurde die Reihenfolge der Dreiecke in unregelmäßigen Sprüngen in unterschiedlichen Zeilen des Bildschirms vorgegeben. Der Proband wurde instruiert, immer dann möglichst rasch die grüne Taste des Probandenpanels zu drücken, wenn ein kritischer Reiz erschien. Dieser lag immer dann vor, wenn drei der sieben Dreiecke mit der Spitze nach unten zeigten. Jeder Tastendruck wurde – unabhängig davon, ob die Reaktion richtig oder falsch war – mit einem kurzen Piepston bestätigt. Die Reizdauer betrug im gewählten Testverfahren 100 msec, die Pausendauer 50 msec. Präsentiert wurden insgesamt 400 Reize, davon waren 80 „kritische Reize“ in 10 Teilzeiten mit jeweils 8 kritischen Reizen. Die Gesamtdauer des Tests betrug ca. 10 Minuten.

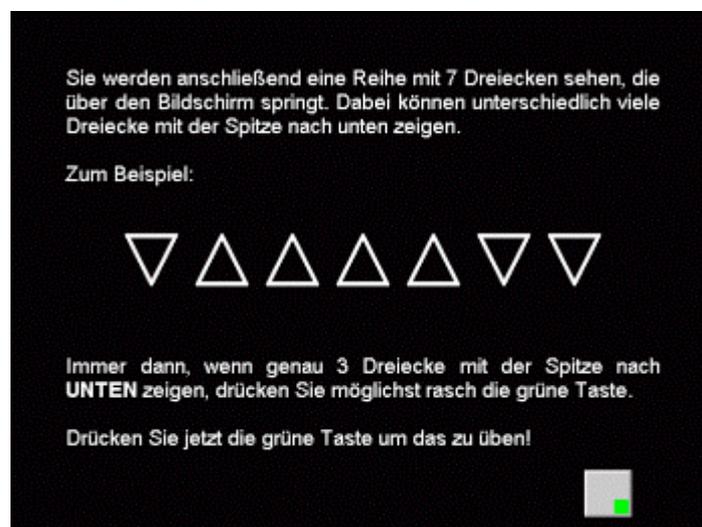


Abb. 38: Computerbildschirm mit Instruktionen für die Durchführung des DAUF-Test (Wiener Testsystem).

An den jeweils ersten Testtagen, die zur Eingewöhnung dienten, wurde der Test mit einer vorgeschalteten Instruktions- und Übungsphase durchgeführt und wenn nötig beliebig oft wiederholt. An den Testtagen war erneut vor jedem Testdurchgang eine kurze Übungsphase vorgeschaltet. Die erhobenen Zielparameter sind in Kap. B 6.3.1 dargestellt.

B 5.4.2 Test zur geteilten Aufmerksamkeit

Mit dem Test zur geteilten Aufmerksamkeit sollte die Leistung in Situationen erfasst werden, in denen gleichzeitig auf zwei Anforderungen reagiert werden muss. Die geteilte Aufmerksamkeit kann mittels so genannter „dual-task“ Aufgaben überprüft werden, d.h. mit Aufgaben in denen gleichzeitig zwei Reizdarbietungen beachtet werden müssen.

Die Aufmerksamkeitskomponente *Geteilte Aufmerksamkeit* wurde mit einem Test aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP) von Zimmermann und Fimm (2002) erfasst. In dem hier

verwendeten Test werden eine optische (das Erkennen eines Quadrates, das von mehreren auf dem Bildschirm erscheinenden Kreuzen gebildet wird) und eine akustische Aufgabe (das Erkennen einer Unregelmäßigkeit in der alternierenden Folge eines hohen und eines tiefen Tons: di da di da) herangezogen, wobei in einem Testdurchgang zunächst überprüft wird, ob die beiden Aufgaben getrennt bewältigt werden können (Zimmermann und Fimm 2002).

Es wurden insgesamt 100 optische Reize und 200 akustische Reize dargeboten. Die Testdauer betrug fünf Minuten. Die Anzahl der kritischen Reize in dieser Zeit betrug 33 (17 optische und 16 akustische). Die Probanden erhielten die Aufgabe, so schnell wie möglich die Reaktionstaste zu drücken wenn entweder vier auf dem Bildschirm erscheinende Kreuze ein Quadrat bilden oder der gleiche Ton zweimal hintereinander zu hören ist. Die erhobenen Parameter werden in Kap. B 6.3.2 beschrieben.

B 5.4.3 Vigilanztest

Vigilanztests sollten in der Regel über einen längeren Zeitraum (> 30 Minuten) durchgeführt werden. Da die insgesamt für alle Tests zur Verfügung stehende Zeit jedoch beschränkt war, wurde in diesem Projekt ein 10 Minuten dauernder Test aus der TAP-Testbatterie (Zimmermann und Fimm 2002) herangezogen. Verwendet wurde ein optischer Vigilanztest, in dem ein „vertikal bewegter Balken“ mit wechselnder Amplitude auf und ab pendelt. Entdeckt werden sollte ein deutlich größerer Ausschlag nach oben. Die Testdauer betrug 10 Minuten, es wurde eine geringe Reizdichte (insgesamt 12 für die Versuchsdauer) gewählt. Vor jedem Versuchsdurchgang wurde ein Vorversuch durchgeführt. Die ausgewerteten Variablen sind unter Kap. B 6.3.3 angeführt.

B 5.5 Test zum Arbeitsgedächtnis (WMT)

Das Arbeitsgedächtnis (=working memory task= WMT) ist eine Unterform des Kurzzeitgedächtnisses. Im Arbeitsgedächtnis können Informationen über Sekunden bis Minuten lebendig gehalten werden (Birbaumer und Schmidt 2003). Das Arbeitsgedächtnis ist im Wesentlichen eine Funktion des dorsolateralen präfrontalen Cortex (DLPFC). Da die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses limitiert ist, nimmt die Leistung in entsprechenden kognitiven Tests mit zunehmender Beanspruchung ab. Zur Überprüfung, ob sich die Leistung des Arbeitsgedächtnisses unter Exposition verändert, wurde ein n-back-Paradigma herangezogen, das in der Clinical Brain Disorders Branch des National Institute of Mental Health entwickelt wurde (zur Beschreibung des Paradigmas siehe auch Callicott et al. 1999).

Auf einem Bildschirm wurde an vier Positionen (oben - links - rechts - unten) je eine Karte dargestellt. Auf diesen Karten erschienen in einer zufälligen Folge Ziffern zwischen 1 und 4, wobei die Zuordnung zwischen der Position und der Ziffer konstant war (siehe Abb. 39). Die Probanden sollten sich an die jeweils n=2 Schritte (two-back 2B) zurückliegende Ziffer/Position erinnern und auf einer geometrisch ähnlich angeordneten Tastatur diese Position durch Tastendruck angeben. Als Kontrollsituation ohne Beteiligung des Arbeitsgedächtnisses diente eine no-back (0B) Situation, in der gleichartige Stimuli präsentiert wurden, in der aber die gerade präsentierten Stimuli nur korrekt erkannt werden mussten.

Es waren in einer Sitzung 12 no-back Testblöcke und 12 2-back Testblöcke mit je 14 Stimuli abzuarbeiten. Die Abfolge der Testblöcke war abwechselnd, beginnend mit no-back. Die Stimuli wurden im Testblock alle 1,8s präsentiert, die Dauer der Stimuli betrug 0,4s. Zwischen den Testblöcken gab es Pausen von 5s und darauf folgend für 2,3s die Anzeige der nächsten Versuchssituation (no-back bzw. 2-back).

Aus diesem Test lassen sich als Leistungsparameter Reaktionszeiten der richtigen Reaktionen, sowie die Anzahl korrekter und falscher Reaktionen ableiten. Dieser Test dauerte insgesamt ca. 5 Minuten.

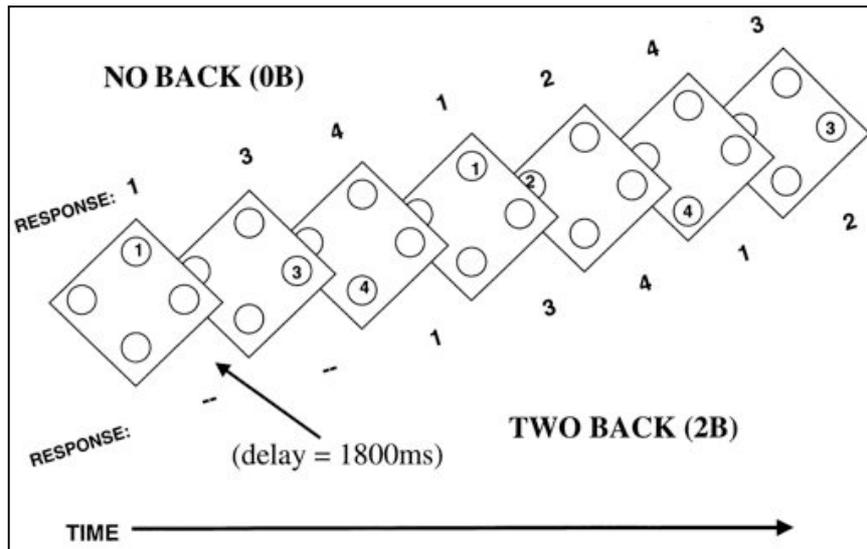


Abb. 39: N-back Aufgabe zur Überprüfung des Arbeitsgedächtnisses (aus Callicot et al., 1999).

B 6 Methodik der Datenauswertung

Im Folgenden sind die Methoden der Datenauswertung und – sofern nötig - der zugehörigen Datenvorverarbeitung für die während der Nacht (B 6.1) und die am Tag (B 6.2) erhobenen physiologischen bzw. psychophysiologischen Daten getrennt dargestellt.

B 6.1 Auswertung der Schlafdaten

Im Schlaf-EEG sind langsame Signalkomponenten enthalten, deren absolute Amplituden und Wellenformen für die Klassifikation von Bedeutung sind. Die automatische Klassifikation setzt bei EEG-Signalen eine Hochpassfilterung mit der von Rechtschaffen und Kales (1968) empfohlenen Zeitkonstante von 0,3s voraus, alternativ kann sie auch mit Signalen arbeiten, die nicht hochpassgefiltert sind (die Standardfilterung wird dann bei der Verarbeitung hinzugefügt).

Während der Aufnahme sind im benutzten Polygrafierecorder Hochpassfilter wirksam. Sie sind notwendig und nicht abschaltbar. Ihre Aufgabe ist es, Übersteuerungen und Blockierungen durch starke langsame Bewegungsartefakte zu reduzieren. Die Hochpassfilterung im Aufnahmegerät hat aber eine deutlich kürzere Zeitkonstante und die Klassifikation wäre dadurch verfälscht worden. Deshalb wurden die für die automatische Schlafstadienklassifikation vorbereiteten Nachtaufzeichnungen in einem Zwischenschritt einer zusätzlichen digitalen Filterung unterzogen. Dieses Filter bildet für alle EEG- und EOG-Signale je ein analoges Filter 2. Ordnung nach, das

- ein Hochpassfilter 1. Ordnung kompensiert (Zeitkonstante entsprechend der physischen Zeitkonstante des Aufzeichnungsgerätes) und
- eine neue Hochpassfilterung 1. Ordnung mit einer Zeitkonstante von 5s bewirkt. (Diese ist zur Stabilität erforderlich.) Die Hochpassfilterung mit 5s Zeitkonstante bewirkt in Anbetracht der späteren Standardfilterung mit 0,3s Zeitkonstante nur vernachlässigbare Signalveränderungen. Für EOG-Signale entspricht sie den Empfehlungen.

Weiterhin erfolgte für jedes Signal eine individuelle Offsetkorrektur, da sonst bereits kleinste Offsetabweichungen im Aufnahmegerät zu Übersteuerungen in der Filterung führen würden.

Im Ergebnis der Filterung beträgt der Dachabfall bei Sprungantworten nur noch 5% nach 1s. Damit werden langsame Potentialverläufe über Zeiträume von <1s nicht mehr nennenswert verformt.

Zur Auswertung der Schlafdaten wurden verschiedene Verfahren herangezogen:

- Visuelles Scoring nach Rechtschaffen und Kales (1968)
- Automatische Auswertung mit dem Somnolyzer 24x7 (Datenvorverarbeitung, Anderer et al. 2005)
- Powerspektralwerte mit Somnolyzer 24x7 (Anderer et al. 2005)
- Automatische Auswertung von Spindeln mit dem Somnolyzer 24x7 (Anderer et al. 2005)

B 6.1.1 Visuelles Scoring nach Rechtschaffen und Kales (1968)

In einem ersten Schritt wurden die nicht entblindeten Daten visuell von vier Expertinnen nach den im *Manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects* (Rechtschaffen und Kales 1968) ausgewertet. Zur Minimierung des Einflusses einer Interrater-Variabilität wurden die zu einem Probanden gehörigen Nächte möglichst von einem Experten ausgewertet. Berücksichtigt wurden insgesamt 66 Variablen zur Charakterisierung der Makrostruktur des Schlafes, die aus den visuell zugewiesenen (Schlaf-) Stadien abgeleitet wurden. Wie in Kap. A 4.4 bereits erwähnt, lässt sich die im EEG nachweisbare unterschiedliche neuronale Aktivität im Schlaf in 5 verschiedene Schlafstadien einteilen: der durch schnelle Augenbewegungen (*rapid eye movements*) gekennzeichnete REM-Schlaf, sowie vier weitere non-REM (NREM) Schlafstadien (NREM1 – NREM4). NREM3 und NREM4 werden auch als Slow Wave Sleep (SWS) bezeichnet, da im EEG dieser beiden Stadien besonders langsame, hochamplitudige Delta-Wellen auftreten. Zur Beschreibung der Schlafkontinuität wurden neben der Zeit von „Licht aus“ bis „Licht an“ (Time in Bed, TIB) die Variablen „Schlafperiodezeit“ (Zeit von Schlafbeginn bis zum Ende der letzten Epoche Schlaf, SPT), „Gesamtschlafzeit“ (Summe der Epochen, die eines der fünf Schlafstadien aufweisen / 2; TST) und die Anzahl der Stadienwechsel in der SPT (STAW) erfasst. Darüber hinaus wurden folgende Latenzen berücksichtigt: die Schlaflatenz (Zeit von "Licht aus" bis zur ersten Epoche NREM2; sleep onset latency, SOL), die SWS-Latenz (SWSlat, Zeit von Schlafbeginn bis zum ersten Auftreten einer Epoche NREM3 bis NREM4) und die REM-Latenz (Zeit vom Schlafbeginn bis zum ersten Auftreten einer Epoche REM-Schlaf). Als weiteres Maß wurde der Schlafeffizienzindex (SEI) herangezogen, welcher den Anteil der schlafend verbrachten Zeit an der TIB ((Gesamtschlafzeit [TST]/ Time in bed [TIB]) * 100) wiedergibt. Eine Liste dieser und weiterer Variablen mit den entsprechenden Definitionen findet sich in Tab. A9 des Anhangs.

B 6.1.2 Automatische Auswertung mit dem Somnolyzer 24x7

Zur kompletten Elimination von Auswertereffekten wurden die Daten zusätzlich mit dem Somnolyzer 24x7 ausgewertet, der im Rahmen eines von der EU geförderten Projekts entwickelt wurde, in dem unsere Arbeitsgruppe mitgearbeitet hat. Eine detaillierte Beschreibung des Auswerte-Algorithmus findet sich bei Anderer et al. (2005). Im Rahmen einer von der American Academy of Sleep Medicine (AASM) gestarteten Initiative zur Revision der Rechtschaffen und Kales Richtlinien zur Auswertung von Polysomnographien wurden kürzlich umfangreiche Reviews zur Übereinstimmung von visuell gescorten Schlafstadien zwischen Experten (Silber et al. 2007) sowie deren Übereinstimmung mit automatischen Auswertesystemen (Penzel et al. 2007) publiziert. Von den insgesamt 119 zur Auswertung herangezogenen Publikationen, wurde nur zweien der Evidenzlevel 1 zuerkannt, eine davon ist die Arbeit zum Somnolyzer 24x7 von Anderer et al. (2005). Penzel et al. (2007, p. 111) resümieren: *“...a recent large-scale, multicenter, well-designed validation study performed in Europe as part of the „Siesta-Project“. Five hundred ninety recordings, split between development and validation samples, were used. This group of researchers found 80% agreement between their*

computer system scoring and human scoring. Test-retest reliability with the computer system was very close to complete agreement.“ Für dieses Auswertesystem dürfte deshalb folgende Aussage zutreffen: *„Overall, the literature concerning sleep stage validation appears to provide evidence that human and computer agreement with some systems, circumstances of training, and human editing interventions has reached the level of results of human scoring agreement between different laboratories“* (Penzel et al. 2007, p. 112). Diese automatische Auswertesoftware wurde und wird in zahlreichen klinischen Studien zur Erprobung neuer Substanzen in der Behandlung von Schlafstörungen eingesetzt.

Die elektrophysiologischen Merkmale, die vom Somnolyzer 24x7 zur automatischen Schlafstadienerkennung herangezogen werden, sind Deltawellen (charakteristisch für den Tiefschlaf mit einer Amplitude von mindestens 75 μV und einer Frequenz von maximal 2Hz) Schlafspindeln (transiente Wellenform im EEG mit einer Frequenz von 12 – 14Hz und einer Dauer von mindestens 0,5 sec; überwiegend in Stadium 2 auftretend), K-Komplexe (plötzlicher Beginn mit einer scharfen negativen Welle, der direkt anschließend eine hochamplitudige langsame positive Welle folgt; v.a. in Stadium 2 vorherrschend), Vertexzacke (große negative Wellenform des späten Stadium 1 im 4-6 Hz Frequenzbereich mit einer Amplitude von bis zu 200 μV), Alphawellen (Frequenzbereich 8-12 Hz im entspannten Wachzustand bei geschlossenen Augen), Augenbewegungen, Blinzeln sowie tonisches und phasisches EMG. Vor Verarbeitung der aufgezeichneten Biosignale wird mittels digitaler Filter, glättender Filter auf der Basis autoregressiver Modelle (Larsen und Prinz 1991), adaptiver Verfahren zur Rauschunterdrückung (Sahul et al. 1995) sowie einer Independent Component Analysis (Roberts 1998) eine Artefaktminimierung durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Identifikation der verbliebenen Artefakte mittels Überprüfung des Überschreitens von Spannungsgrenzwerten (Schlögl et al. 1999), diskriminanzanalytischer Verfahren (Anderer et al. 1999), adaptiver Grenzwerte (gleitende Mediane, Brunner et al. 1996), nicht überwachter Netzwerke (NeoART, Schaltenbrand et al. 1993, 1996), einer Distance Rejection (Schaltenbrand et al. 1993, 1996), einer Uncertainty Rejection (Schaltenbrand et al. 1993, 1996), einer Automatic Relevance Determination (MacKay 1995), probabilistischer graphischer Methoden (Jensen 1996) sowie modelbasierter Artefakterkennung (Kemp et al. 2000). Eine kurze Übersicht zum SIESTA-Artefaktdetektor findet sich auch bei Anderer et al. (2006).

Die automatische Analyse der Schlafdaten lieferte insgesamt 177 Variablen zur Charakterisierung des Nachtschlafes, die in dieser Studie berücksichtigt wurden. Diese Variablen sind weitestgehend überschneidungsfrei mit denen aus der visuellen Analyse, da auch den gleich anmutenden Variablen unterschiedliche Definitionen zugrunde liegen (siehe Tab. A9 und A10 im Anhang). Von den aus der automatischen Analyse berücksichtigten Variablen beschreiben insgesamt 27 die Schlafinitiierung und die Schlafkontinuität, 25 Variablen beschreiben Stadienwechsel im Verlauf der gesamten Nacht und 6 Variablen beziehen sich auf die Schlafzyklik. Hinzu kommen je 17 Variable, welche den Schlaf getrennt nach Vierteln der Nacht sowie nach Zyklen charakterisieren. Tab. A10 im Anhang enthält eine komplette Liste der ausgewerteten Schlafparameter.

B 6.1.3 Powerspektralanalyse mit Somnolyzer 24x7

Da einige der zuvor durchgeführten Laborstudien (kontroverse) Hinweise darauf geliefert haben, dass bei Exposition mit elektromagnetischen Feldern ein Einfluss auf die Powerspektralwerte für verschiedene Frequenzbereiche des Schlaf-EEG zu beobachten ist (siehe Kap. A 4.4. und A-0 1.4), haben wir die die Mikrostruktur des Schlafes ebenfalls mittels Powerspektralanalyse untersucht.

Bei Powerspektren oder Leistungsspektren werden Leistungsgrößen als Maß für die Stärke der Einzelkomponenten benutzt. Leistungsgrößen sind Parameter, die zum Quadrat der Amplituden der ursprünglichen Signale proportional sind. Jedes Signal, d.h. jeder Zeitverlauf einer physikalischen Größe (z.B. der elektrischen Spannung zwischen Kopfelektroden im EEG), lässt sich als Summe von einzelnen Schwingungsvorgängen mit unterschiedlichen Frequenzen darstellen. Dabei werden die Stärken der Einzelkomponenten über die Frequenz als Spektrum bezeichnet. Spektren werden z.B. mittels der Fouriertransformation für einzelne Zeitabschnitte des ursprünglichen Signals berechnet.

Es wurde hierzu der vom Somnolyzer 24x7 (Anderer et al. 2005, 2006) verwendete Algorithmus herangezogen, der auch in klinischen Studien zur Anwendung kommt. Nach Artefakterkennung und –elimination werden artefaktfreie 4-Sekunden-Abschnitte der Aufzeichnung herangezogen, um mittlere Powerspektralwerte für 30s-Epochen zu berechnen. Die Berechnung der Powerspektren für artefaktfreie 4-s Epochen erfolgt mit einer Überlappung von 2 Sekunden (Welch–Ansatz). Die maximale Anzahl von 4-s Epochen, die zur Berechnung des mittleren Powerspektrum für 30-s herangezogen werden, beträgt 14. Insgesamt werden Powerspektren mit einer Auflösung von 0.5 Hz für den Frequenzbereich 0 bis 25 Hz berücksichtigt, daraus resultieren 50 Variablen, die zum einen für die gesamte Nacht (Gesamtschlafzeit) sowie zum anderen getrennt für die Stadien Wach, NREM1, NREM2 und REM-Schlaf und die kombinierten Stadien Leichtschlaf (NREM1 + NREM2), Tiefschlaf (NREM3 + NREM4) und NREM-Schlaf (NREM1 + NREM2 + NREM3 + NREM4) ausgewertet wurden, woraus sich eine Gesamtvariablenzahl von 400 ergibt. Die Angaben erfolgen in $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$. Eine detaillierte Auflistung der im Rahmen der Powerspektralanalyse berücksichtigten Variablen findet sich in Tab. A11 im Anhang. Für die vorliegende Auswertung wurden die für die Ableitung C3-A2 (eine der zwei Standardableitungen nach Rechtschaffen & Kales 1968), ermittelten Powerspektralwerte herangezogen.

B 6.1.4 Automatische Auswertung von Spindeln mit dem Somnolyzer 24 x 7

Um die Frage nach dem Einfluss elektromagnetischer Felder auf die Mikrostruktur des Schlafes genauer zu untersuchen, wurde vor dem Hintergrund der Beobachtung einer Veränderung der Powerspektralwerte im Spindelfrequenzbereich (Borbély et al.1999, Huber et al.2000, 2002, 2003 und Loughran et al. 2005) das Graphoelement Spindel des Schlaf-EEG detailliert analysiert.

Da die Erkennung von Spindeln eine sehr hohe Inter- und Intra-Ratervariabilität aufweist, wurde die Analyse der Spindelaktivität in dieser Studie automatisch mit dem Somnolyzer 24 x 7 (Anderer et al.

2005) durchgeführt. Nach Anwendung der im Abschnitt B. 5.1.3 und B 5.1.4 bereits beschriebenen Algorithmen zur Minimierung und Identifikation von Artefakten wurden in einem ersten Schritt die Charakteristika (Dauer, mittlere und maximale Amplitude sowie mittlere Frequenz) von visuell gescorten Spindeln erfasst. Basierend auf der Verteilung dieser Merkmale wurden Grenzwerte für die minimale (0.3 sec) und maximale (2 sec) Dauer, die minimale Amplitude (12 μ V) sowie die minimale (11 Hz) und maximale (16 Hz) Frequenz festgelegt. In einem zweiten Schritt wurde basierend auf einer von Schimicek et al. (1994) beschriebenen Methode ein Algorithmus zur automatischen Spindel detektion entwickelt, der hinsichtlich dieser neu festgelegten Grenzwerte angepasst wurde. Mit dieser Methode wurden mit im Vergleich zur visuellen Auswertung hoher Sensitivität „mögliche“ Spindelmuster identifiziert. Das EEG Signal wurde mit einem Butterworth Bandpassfilter 4. Ordnung (10 – 18 Hz) gefiltert. Das Verfahren führte dazu, dass nur wenige visuell erkannte Spindeln vom Algorithmus nicht erkannt wurden (hohe Sensitivität). Nachteilig ist dabei jedoch die hohe Rate falsch-positiver Spindelereignisse (geringe Spezifität). Deshalb wurden in einem dritten Schritt diese „möglichen“ Ereignisse mittels einer linearen Diskriminanzanalyse (LDA), die mit 5 logarithmisch transformierten Charakteristika möglicher Spindeln (Dauer sowie mittlere Amplituden in folgenden vier Frequenzbändern: Spindelfrequenz (12-14 Hz), Theta (3-7 Hz), Alpha (8-12 Hz) und schnelles Beta (20-40Hz) durchgeführt wurde, weiter analysiert mit dem Ziel die Spezifität zu verbessern. Die fünf Merkmale wurden mittels schrittweiser LDA aus mehr als 20 Charakteristika durch Optimierung der Mahalanobis Abstände (ein mathematisches Verfahren das v.a. in der Diskriminanzanalyse dem Erkennen von Ausreißern dient) ausgewählt. Durch Variation der Detektionsschwellen der Diskriminanzwerte kann die Methode hinsichtlich Sensitivität und Spezifität angepasst werden. Der optimale Grenzwert für „sichere“ Spindeln wurde aus dem visuell gescorten Trainingsset bestimmt, wobei die visuell gescorten Spindeln als Goldstandard galten. Damit wurde erreicht, dass die Spezifität der automatischen Mustererkennung (98%) genauso hoch lag, wie beim Vergleich der visuellen Erkennung durch unterschiedliche Experten. Neben sicheren Ereignissen (Spezifität 97-98%) werden „mögliche“ (Sensitivität der Erkennung ca. 90%) und „wahrscheinliche“ Spindeln untersucht. Letztere sind definiert über eine Maximierung des Youden Index (bei dem Sensitivität und Spezifität annähernd gleich groß sind).

Die detaillierte Untersuchung der Spindelaktivität in diesem Forschungsprojekt umfasste neben der Berücksichtigung aller Spindeln eine getrennte Analyse für „langsame“ und „schnelle“ Spindeln. „Langsame“ Spindeln sind definiert als Spindeln, die im dritten Drittel der Dauer der Spindeln eine Frequenz < 13 Hz aufweisen wohingegen „schnelle“ Spindeln im ersten Drittel der Dauer eine Frequenz ≥ 13 Hz aufweisen. Ferner wurde für alle Spindeln unterschieden, ob es sich um sichere, wahrscheinliche oder mögliche Spindeln handelt. Jeder der so definierten 9 Spindelparameter (schnelle, langsame bzw. alle möglichen, wahrscheinlichen bzw. sicheren Spindeln) wurden hinsichtlich ihrer Anzahl, ihres Index (Anzahl pro Minute), ihres mittleren Diskriminanzscores, sowie der mittleren Dauer, Amplitude und Frequenz charakterisiert. Die Auswertung erfolgte sowohl für die gesamte Nacht, sowie nach Nachtviertel getrennt. Darüber hinaus wurde die Analyse zum einen für den gesamten NREM-Schlaf (Stadien NREM1, NREM2, NREM3 und NREM4) durchgeführt und zum

anderen getrennt für NREM 2 und Tiefschlaf (NREM3 und NREM4). Insgesamt wurden 810 Variablen zur Charakterisierung der Spindelaktivität in der Nacht berücksichtigt (siehe Tab. A12 des Anhangs).

B 6.2 Auswertung der am Tag erhobenen psychophysiologischen Daten

B 6.2.1 Auswertung des Ruhe-EEGs

Das Ruhe-EEG ohne Intervention und der Alpha Attenuation Test wurden von den Probanden in einem kombinierten Versuchsmodul absolviert. Nach kürzeren Abschnitten mit Augenöffnen und -schließen für den Alpha-Attenuation-Test folgte am Ende das Ruhe-EEG über 5 min. Zur Auswertung wurden zunächst, wie im Kapitel B 6.2.3 für VMT, CNV und BP beschrieben, die zum Versuchsmodul gehörenden Aufzeichnungen aus den Gesamt-Tagesaufzeichnungen entnommen. Für diese Abschnitte wurden mit einer Segmentlänge von 4s, einer von-Hann-Zeitfensterfunktion und 2 s Überlappung der Segmente Leistungsspektren berechnet, die über den Zeitraum des Ruhe-EEG gemittelt wurden. Zielparameter waren mittlere Leistungsdichten in den EEG-Bändern alpha (8-12,5 Hz), beta1 (13-21,5 Hz), beta2 (22-30 Hz), theta (4-7,5 Hz) und delta (0,5-3,5 Hz) für alle EEG-Elektroden, bezogen auf die gemittelten Mastoidelektroden (A1 + A2)/ 2 als gemeinsame Referenz. Segmente mit Spitze-Spitze-Amplituden von mehr als 100uV im Original-EEG galten als artefaktbehaftet und wurden ausgeschlossen. Die Auswertung der spektralen Leistung des Ruhe-EEG erfolgte für alle 19 Lokalisationen getrennt für den Frequenzbereich 0-25 Hz in 0.25 Hz-Schritten.

B 6.2.2 Auswertung des Alpha-Attenuation Test (AAT)

Der Alpha Attenuation Test und das Ruhe-EEG ohne Intervention wurden von den Probanden in einem kombinierten Versuchsmodul absolviert. Dies begann mit einem 2-minütigen Abschnitt bei geschlossenen Augen zur Adaptation, gefolgt von jeweils halbminütigen Abschnitten bei geöffneten Augen und 1-minütigen Abschnitten bei geschlossenen Augen. Beim dritten Zyklus hat der Abschnitt mit geschlossenen Augen eine längere Dauer von insgesamt 5 min. Von diesem Abschnitt ging die erste Minute in die AAT-Auswertung ein. Die Gesamtzeit von 5 min stellte gleichzeitig das Ruhe-EEG ohne Intervention dar.

Zur Auswertung wurden zunächst, wie im Kapitel B 6.2.3 für VMT, CNV und BP beschrieben, die zum Versuchsmodul gehörenden Aufzeichnungen aus den Gesamt-Tagesaufzeichnungen entnommen. Für diese Abschnitte wurden mit einer Segmentlänge von 4s, einer von-Hann-Zeitfensterfunktion und 2s Überlappung der Segmente die Leistungsdichten im alpha-EEG-Band von 8-12Hz (Spektrallinien, jeweils inklusive der Grenzen) für die Ableitungen C3-A2 sowie C4-A1 berechnet. Gleichzeitig wurden für dieselben Segmente Mittelwerte der Markersignale bestimmt. Da nur für zeitlich vollständig in einem Abschnitt liegende Segmente die zum Abschnitt gehörenden Markerwerte von der Aufzeichnung entstehen, ließen sich die Segmente automatisch den Abschnitten zuordnen. Segmente

mit Spitze-Spitze-Amplituden von mehr als 100 μ V im Original-EEG galten als artefaktbehaftet und wurden ausgeschlossen.

Nach Ausschluss der artefaktbehafteten 4sec-Segmente wurde überprüft, wie viele Segmente pro Proband/Tageszeit/Expositionsbedingung/Untersuchungstag, d.h. pro Testsituation zur Verfügung standen. Diese Überprüfung erfolgte für die „Augen auf“- und die „Augen zu“-Bedingung getrennt. Maximal standen pro Testsituation für die „Augen auf“-Bedingung 13 Segmente (d.h. 3X13 Segmente) zur Auswertung zur Verfügung und für die „Augen zu“-Bedingung 28 (d.h. bei drei Testsituationen 3X28 Segmente). Anschließend wurde die Anzahl der brauchbaren Segmente für jede Bedingung („Augen auf“ und „Augen zu“) probanden- und tageszeitspezifisch über die drei Versuchsbedingungen mit gleicher Exposition summiert. Es wurden nur Testsituationen berücksichtigt, bei denen mindestens 2/3 aller Segmente (≥ 56) für die „Augen zu“-Bedingung und mindestens 2/3 aller Segmente (≥ 26) für die „Augen auf“-Bedingung brauchbar waren. Für einen Probanden stand nach diesen Kriterien zu keinem Zeitpunkt eine ausreichende Anzahl brauchbarer Segmente zur Verfügung. Für weitere fünf Probanden musste jeweils eine Bedingung für die O2-Ableitung ausgeschlossen werden, für zwei Probanden jeweils eine Bedingung für die O1-Ableitung. Für die Ableitung an O1 gab es nach diesen Kriterien für weitere drei Probanden zu zwei Testzeiten keine verwertbaren Daten.

Für jede Messung wurde der Alpha Attenuation Coefficient (AAC) als Verhältnis der gemittelten Alpha-Leistungsdichte bei geschlossenen Augen zu der bei geöffneten Augen ermittelt.

B 6.2.3 Auswertung der Ereigniskorrelierten Potentiale

In der vorliegenden Studie gab es drei psychometrische Tests, bei denen Ereigniskorrelierte Potentiale betrachtet wurden: Die Aufgabe zur visuellen Folgereaktion, die Aufgabe zur Messung von Contingent Negative Variation und die Aufgabe zur Erzeugung eines Bereitschaftspotentials. In diesem Kapitel wird die Auswertung hinsichtlich der Potentiale beschrieben, in den nachfolgenden Kapiteln B 6.2.3.1 bis B 6.2.3.3 folgt die Beschreibung der Auswertung hinsichtlich der in den gleichen Versuchsmodulen entstandenen psychometrischen Testergebnisse.

In evozierten und ereigniskorrelierten Potentialen sind langsame Signalkomponenten enthalten. Die in der Auswertung gemessenen Kurvenformen dieser Potentiale würden durch die bei der Aufnahme erfolgte Hochpassfilterung merklich verfälscht, denn während der Aufnahme sind im benutzten Polygrafierecorder Hochpassfilter wirksam. Sie sind notwendig und nicht abschaltbar. Ihre Aufgabe ist es, Übersteuerungen und Blockierungen durch starke langsame Bewegungsartefakte zu reduzieren.

Deshalb wurden die für die Berechnung evozierter/ereigniskorrelierter Potentiale vorgesehenen Ausschnitte aus der polygrafischen Tagesaufzeichnung in einem Zwischenschritt einer zusätzlichen digitalen Filterung unterzogen. Dieses Filter bildet für alle EEG- und EOG-Signale je ein analoges Filter 2. Ordnung nach, das

- ein Hochpassfilter 1. Ordnung kompensiert (Zeitkonstante entsprechend der physischen Zeitkonstante des Aufzeichnungsgerätes) und
- eine neue Hochpassfilterung 1. Ordnung mit einer Zeitkonstante von 10s bewirkt. (Diese Hochpassfilterung ist zur Stabilität erforderlich.)

Weiterhin erfolgte für jedes Signal eine individuelle Offsetkorrektur, da sonst bereits kleinste Offsetabweichungen im Aufnahmegerät zu Übersteuerungen in der Filterung führen würden. Im Ergebnis der Filterung beträgt der Dachabfall bei Sprungantworten nur noch 5% nach 1s. Damit werden langsame Potentialverläufe über Zeiträume von <1s nicht mehr nennenswert verformt.

Die Versuche, die der Erzeugung langsamer Potentiale dienten, die Aufgabe zur visuellen Folgereaktion (VMT), die Contingent Negative Variation (CNV) und die Aufgabe zur Erzeugung eines Bereitschaftspotentials (BP), wurden weitgehend auf gleiche Weise vorausgewertet.

Pro Versuchstag wurde eine fortlaufende Tagesaufzeichnung auf dem Varioport-Rekorder aufgenommen und im gerätespezifischen Datenformat VPD gespeichert. Dieses wurde mittels des an der Charité entwickelten Kommandozeilenprogramms Vite_m in ein zur weiteren Auswertung geeignetes Datenformat, das European Data Format (EDF, Kemp 1992), umgewandelt.

Mittels des Programms EDFcut (Roessen, Leiden University Medical Centre 2002), das von der Adresse <http://www.edfplus.info/downloads/downloads.html> bezogen wurde, wurde aus der Tagesaufzeichnung der für die Auswertung der Aufgabe zur visuellen Folgereaktion benötigte Zeitabschnitt ausgeschnitten. Dabei wurden während der Datenaufnahme angefertigte Aufzeichnungen über Start- und Endzeiten der Testung zu Hilfe genommen.

Die Auswertung erfolgte mit der MATLAB-Toolbox EEGLAB, verwendet wurde MATLAB Professional (Version 7.2.).

Bei EEGLAB handelt es sich um ein frei erhältliches Open Source-Programm, das die Auswertung kontinuierlicher und zeitgebundener EEG-Daten erleichtert. Es ermöglicht u.a. die graphische Darstellung ereigniskorrelierter Potentiale (ERPs), die Analyse unabhängiger Komponenten (ICA) und Zeit-Frequenz-Analysen (Delorme und Makeig 2004).

EEGLAB (Version 5.02) wurde unter der Adresse <http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/> bezogen. Das in EEGLAB einbindbare frei erhältliche Zusatztool Biosig (© Schloegl 2003, 2004; Version 1.0) ermöglichte das Einlesen des Datenformats EDF. Biosig wurde unter der Adresse <http://biosig.sf.net/> bezogen.

Die weitere Datenauswertung wurde zum größten Teil identisch wie bei Freude et al. (1998, 1999, 2000) beschrieben durchgeführt. Zunächst wurden die frontpolaren Elektroden Fp1 und Fp2 aufgrund zu hoher Artefaktbelastung aus der Auswertung ausgeschlossen, des weiteren wurden die Elektrodenkanäle EOGh+, EOGh- (horizontales Elektroofokulogramm), EOGv+- (vertikales Elektroofokulogramm), EMGm+- (mentales Elektromyogramm), EMGs+- (submentales

Elektromyogramm), EKG+- (Elektrokardiogramm), Aktigraphiesignal und Beleuchtungsstärkesensor entfernt. Die Auswertung umfasste somit die Kanäle F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1 und O2. Für die Auswertung notwendig waren die Ohrelektrodenkanäle A1 und A2, die als Referenz dienten, und der Markerkanal.

Die Information des Markerkanals wurde in die Datenaufzeichnung importiert, was die anschließende Extraktion der Versuchsepochen ermöglichte. Es handelte sich bei CNV und VMT um jeweils 70 Epochen, bei BP um 40 Epochen, entsprechend der Anzahl der Trials im Versuchsdurchlauf. Die Markerinformation, auf die die Bestimmung gemittelter Potentiale bezogen wurde, war bei allen drei Versuchen der Zeitpunkt des Tastendrucks. Dieser war als Zeitpunkt 0 definiert. Bei der Aufgabe zur visuellen Folgereaktion (VMT) handelte es sich um das möglichst genaue Anhalten des Uhrzeigers in der 12-Uhr-Position nach drei Umdrehungen, bei der Contingent Negative Variation (CNV) war es der Augenblick des Zeigerstopps, möglichst sofort nach dem Loslaufen des Zeigers und bei der Aufgabe zur Erzeugung eines Bereitschaftspotentials (BP) waren es 40 in selbstbestimmten Abständen erfolgte Tastendrucke.

Eine Epoche umfasste jeweils 2,5 s (2500 ms) vor dem Zeitpunkt des Tastendrucks bis 0,5 s (500 ms) nach dem Tastendruck. Es erfolgte eine Korrektur der Baseline, d.h. eine Festlegung des Ordinaten-Nullpunkts anhand des Potential-Mittelwerts im Zeitraum 2500 ms bis 2300 ms vor dem Tastendruck.

Die weitere Verarbeitung umfasste eine Tiefpass-Filterung mit 10 Hz als oberer Grenzfrequenz sowie eine Referenzierung der Daten auf die gemittelten Ohrelektroden A1 und A2.

Abweichend von der Darstellung bei Freude et al. (1998, 1999, 2000) wurden Epochen mit Amplituden über 150 bzw. unter $-150 \mu\text{V}$ als Artefakte betrachtet und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Auf diesem Wege wurden bei der VMT durchschnittlich 27,70% und bei der CNV 41,15% der Epochen verworfen. Außerdem wurden alle Epochen manuell inspiziert und ggf. unerwünschte, zum im Zeitablauf vorangegangenen bzw. nachfolgenden Versuch gehörige Epochen entfernt.

Abschließend wurden für jeden Probanden für die Vormittags- und die Nachmittagsbedingung die jeweils drei Tagesaufzeichnungen für die Schein-, die GSM- und die UMTS-Exposition gemittelt und graphisch dargestellt. Es ergaben sich somit insgesamt sechs Versuchsbedingungen, die einen Vergleich zwischen Vormittags- und Nachmittagsaufzeichnung sowie zwischen den drei Expositionsbedingungen ermöglichten. Außerdem wurden die sechs Bedingungen über alle 30 Probanden aufsummiert und graphisch dargestellt. Dabei stellte die x-Achse den Zeitablauf in Millisekunden dar, die y-Achse die Amplitude in Mikrovolt. Um eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten, wurde bei den graphischen Repräsentationen der Mittelungen je Proband die Darstellung der y-Achse auf den Abschnitt von -40 bis $+40 \mu\text{V}$ begrenzt, bei den Gesamtmittelungen über alle 30 Probanden von -20 bis $+20 \mu\text{V}$. Die höhere Auflösung der Gesamtdarstellung bei $n=30$ wurde dadurch ermöglicht, dass sich die teilweise erheblichen Potentialabweichungen bei den Einzelabbildungen pro Proband bei der Darstellung über alle 30 Probanden herausmittelten. Die Darstellung der x-Achse reichte jeweils von -2500 bis $+495$ ms.

Für eine numerische Auswertung wurde bei der beschriebenen Mittelung der drei Versuchstage je Expositions- und Zeitbedingung der Mittelwert der Amplituden der langsamen Potentiale errechnet. Dies erfolgte jeweils über ein Zeitintervall von 0,5 s, das bei -0,5 s begann und bei 0 s (Zeitpunkt des Tastendrucks) endete. Der Mittelwert der Amplituden der langsamen Potentiale wurde für jede der insgesamt 16 Elektroden berechnet.

B 6.2.3.1 Auswertung der psychometrischen Testergebnisse vom Modul Contingent Negative Variation (CNV)

Zusätzlich zur EEG-Auswertung nach dem unter B 6.2.3 beschriebenen Verfahren wurde bei der Contingent Negative Variation eine Reaktionszeit als Leistungsparameter ermittelt. Die Reaktionszeit wurde aus der Differenz zwischen Loslaufen des Zeigers und Anhalten des Zeigers berechnet. Diese wurde ebenfalls über die drei Versuchstage für jede Versuchsbedingung und schließlich über alle 30 Probanden gemittelt.

B 6.2.3.2 Auswertung der psychometrischen Testergebnisse bei der Visuellen Folgereaktion (VMT)

Auch bei der Aufgabe zur visuellen Folgereaktion wurde neben dem EEG-Parameter ein Leistungsparameter bestimmt. Dazu wurde der Betrag der Winkelabweichung der tatsächlichen Zeigerstopp-Position von der 12-Uhr-Position als Performance-Parameter ausgewertet. Dieser wurde jeweils pro Versuchsdurchlauf über alle 70 Trials gemittelt. In der weiteren Auswertung wurden für jeden Probanden jeweils die drei Versuchsabläufe jeder Bedingung gemittelt (Scheinexposition vormittags, Scheinexposition nachmittags, GSM vormittags, GSM nachmittags, UMTS vormittags, UMTS nachmittags). Schließlich wurden die Mittelwerte der sechs Bedingungen über alle 30 Probanden berechnet. Es wurde kein Unterschied zwischen Zeigerstopp vor und nach der 12-Uhr-Position gemacht.

B 6.2.4 Auswertung der Evozierten Potentiale

Die Auswertung erfolgte analog zu der in Kapitel B 6.2.3 beschriebenen Auswertung der Ereigniskorrelierten Potentiale.

B 6.2.4.1 Auswertung der Akustisch Evozierten Potentiale (AEP)- Wahlreaktion auf Töne

Als Zielparame-ter wurden Schnelligkeit und Genauigkeit, mit der Töne zweier unterschiedlicher Tonhöhen, die in zufälliger Folge und in zufälligem zeitlichen Abstand präsentiert wurden, durch Drücken einer Taste abgeschaltet wurden. Insgesamt wurden sieben Parameter zur Beschreibung der Testleistung erhoben: die mittlere Reaktionszeit (MWRT), die Standardabweichung der Reaktionszeit (SDRT), die Anzahl der insgesamt fehlerhaften Zyklen (N_ZYK_FEHL), die aufgegliedert wurde nach der Art der Fehler in falsche Reaktionen, d.h. Reaktionen mit der falschen Hand (FALSCH), zu frühe Reaktionen, verspätete Reaktionen und Drücken beider Tasten. Da die letztgenannten Fehler in der

untersuchten Stichprobe junger, gesunder Männer nur sehr selten vorkamen, wurden sie für die Auswertung nicht weiter berücksichtigt, womit insgesamt vier Parameter zur Beschreibung der Leistung in diesem Test verblieben.

B 6.2.4.2 Auswertung der Akustisch Evozierten Potentiale (AEP)- Oddball Paradigma

Die kortikal mittels EEG ableitbare P300, die wie in Kapitel B 5.3.4.2 beschrieben im wesentlichen im Bereich des temperoparietalen Übergangs generiert wird, ist dort auch am deutlichsten ausgeprägt. Da sie sich in frontal abgeleiteten EEG-Kanälen nur sehr schwach bis gar nicht darstellen lässt, wurde auf die Ermittlung der Peak-Amplituden für die frontalen EEG-Kanäle verzichtet.

Die Mittelung erfolgte hinsichtlich der Reize ausschließlich für die seltenen Stimuli. Bestimmt wurden die Amplituden für die Komponente P300 des Akustisch Evozierten Potentials. Als Leistungsparameter wurden die mittlere Reaktionszeit auf seltene Töne und die Anzahl der fehlerhaften Reaktionen erhoben.

B 6.2.5 Auswertung der Pupillometrie

Die Pupillometriemessung lieferte für jede Testdurchführung den Zeitverlauf des Pupillendurchmessers mit einer Abtastfrequenz von 1000/min ($16 \frac{2}{3}$ Hz). Diese Daten sind infolge von fehlenden Werten und von Artefakten nicht direkt für die Berechnung von Parametern nutzbar. Fehlende Werte sind vom Pupillometriegerät markiert, die weitere Artefakterkennung erfolgte im Rahmen einer Vorverarbeitung.

Zeitabschnitte aller erkannten Artefakte wurden ebenfalls als Bereiche mit fehlenden Werten markiert. Als artifiziell waren alle Messwerte in Zeiträumen zu betrachten, zu denen die Messung des Pupillendurchmessers durch das Pupillometriegerät nicht zuverlässig arbeitete. Ursachen waren in erster Linie Lidschläge und Justierfehler während der Messung.

Neben einzelnen extremen Messwerten und fehlerhaften Werten unmittelbar vor und nach kurzen Störungen fanden sich auch häufig über längere Abschnitte artifizielle Daten, die für sich allein nicht als fehlerhaft erkennbar waren, da die entsprechenden Pupillendurchmesser auch in der Realität vorkommen konnten. Durch zusätzliche Entscheidungskriterien auf der Grundlage der Verteilungsfunktion der Messwerte in Teilabschnitten der Gesamtmesszeit und bedingt durch die biologische Begrenzung der Änderungsgeschwindigkeit des Pupillendurchmessers konnte die Artefakterkennung dennoch vollständig automatisch erfolgen. Für einen Teil der Parameterberechnung wird ein kontinuierlicher Signalverlauf benötigt, dazu wurde bei der Vorverarbeitung noch eine Version der Messdaten mit linearer Interpolation anstelle der fehlenden Werte erzeugt.

Zielparameter der Pupillometriemessung waren ein mittlerer Pupillendurchmesser, die summierte spektrale Leistung der Pupillenschwingungen im Frequenzbereich 0,1 Hz bis 0,8 Hz, sowie der PUI (pupillary unrest index). Zur Bestimmung des mittleren Pupillendurchmessers wurden die Messdaten

mit Markierung der fehlenden Werte herangezogen, für die anderen Parameter wurde die interpolierte Version benutzt. Die Berechnung des PUI erfolgte entsprechend (Lüdtke et al. 1998).

B 6.3 Auswertung der Leistungstests

Die Tests zu Messung der Aufmerksamkeitskomponenten wurden von der jeweiligen Testsoftware automatisch ausgewertet. Die Zielparameter werden im Folgenden für jeden Test beschrieben.

B 6.3.1 Auswertung der Selektiven Aufmerksamkeit – Daueraufmerksamkeitstest

Der Daueraufmerksamkeitstest liefert insgesamt 10 Zielparameter, die für die weitere Auswertung berücksichtigt wurden:

- **Anzahl der Richtigen** (Gesamtzahl der richtig beantworteten kritischen Reize. Als „richtig“ wurden Reaktionen bewertet, bei denen ein Tastendruck während der Vorgabe des kritischen Reizes oder in der anschließenden Pause bis zur nächsten Reizvorgabe erfolgt.)
- **Anzahl der Falschen** (Gesamtzahl der falschen Reaktionen. Als „falsch“ wurde eine Reaktion bewertet, die ohne Vorgabe eines kritischen Reizes – auch in der darauf folgenden Pause – erfolgte.)
- **Mittelwert der Reaktionszeit** (sec) (Durchschnittliche Reaktionszeit bei *richtig* beantworteten kritischen Reizen)
- **Streuung der Reaktionszeit** (sec) (Standardabweichung der Reaktionszeiten über den gesamten Testverlauf)
- **Mittelwert der Richtigen** (Mittelwert der Variable „Anzahl der Richtigen“ für die insgesamt 10 Teilzeiten)
- **Streuung der Richtigen** (Streuung der Variable „Anzahl der Richtigen“ für die insgesamt 10 Teilzeiten)
- **Anzahl der Ausgelassenen** (Gesamtzahl der nicht erfolgten Reaktionen auf einen kritischen Reiz. Als „Ausgelassen“ wird gezählt, wenn selbst innerhalb der Pausendauer keine Reaktion des Probanden erfolgt. Die Summe aus der Anzahl der Richtigen und Anzahl der Ausgelassenen ergibt die Anzahl der kritischen Reize).
- **Mittelwert der Ausgelassenen** (Mittelwert der Variable „Anzahl der Ausgelassenen“ für die insgesamt 10 Teilzeiten)
- **Mittelwert der Falschen** (Mittelwert der Variable „Anzahl der Falschen“ für die insgesamt 10 Teilzeiten)
- **Streuung der Falschen:** (Streuung der Variable „Anzahl der Falschen“ für die insgesamt 10 Teilzeiten)

B 6.3.2 Auswertung des Tests zur Geteilten Aufmerksamkeit

Als Ergebnisparameter werden zu diesem Test acht Ergebnisparameter ausgegeben:

- **Mittelwert der Reaktionszeit** (msec)
- **Standardabweichung der Reaktionszeit** (msec)
- **Median der Reaktionszeit** (msec)
- **Anzahl der richtigen Reaktionen**
- **Anzahl der antizipierten Reaktionen** (=Reaktionen mit Reaktionszeiten kleiner 100 msec)
- **Anzahl der ausgelassenen Reaktionen**
- **Anzahl der Fehlreaktionen** (=Reaktionen auf einen nicht-kritischen Reiz = „falscher Alarm“)
- **Anzahl der Ausreißer** (stellen, bezogen auf die Verteilung der individuellen Reaktionszeiten, verzögerte Reaktionen dar)

Diese Ergebnisparameter werden zum einen für den gesamten Test ausgegeben und zum anderen getrennt für optische und akustische kritische Reize.

B 6.3.3 Auswertung des Vigilanztests

Der über 10 Minuten durchgeführte Vigilanztest liefert insgesamt ebenfalls acht Zielparameter:

- **Mittelwert der Reaktionszeit** (msec)
- **Standardabweichung der Reaktionszeit** (msec)
- **Median der Reaktionszeit** (msec)
- **Anzahl der richtigen Reaktionen**
- **Anzahl der antizipierten Reaktionen** (=Reaktionen mit Reaktionszeiten kleiner 100 msec)
- **Anzahl der ausgelassenen Reaktionen**
- **Anzahl der Fehlreaktionen** (=Reaktionen auf einen nicht-kritischen Reiz = „falscher Alarm“)
- **Anzahl der Ausreißer** (stellen, bezogen auf die Verteilung der individuellen Reaktionszeiten, verzögerte Reaktionen dar)

Diese Zielvariablen wurden zum einen für den gesamten Untersuchungszeitraum berechnet und zum anderen getrennt für die ersten und die zweiten fünf Minuten des Versuchs.

B 6.3.4 Auswertung des Tests zum Arbeitsgedächtnis (WMT)

Beim Working Memory Task (n-back) waren in jeder Versuchssitzung 12 Testblöcke mit der Aufgabe no-back (direkte Antwort auf den präsentierten Stimulus) und 12 Testblöcke mit der Aufgabe 2-back (Angabe des um 2 Schritte zurückliegenden Stimulus) enthalten. Die beiden Aufgaben wurden alternierend absolviert. Mit 14 Stimuli in jedem Testblock ergaben sich je Versuchssitzung insgesamt 168 Stimuli für 0-back und 168 Stimuli für 2-back. Die Anzahl der richtigen und falschen Reaktionen sowie die mittlere Reaktionszeit wurden für jeden Testblock während der Versuchsdurchführung registriert. Als Zielparameter wurden für jede der beiden Aufgaben getrennt die Anzahl der richtigen bzw. falschen Reaktionen summiert und Mittelwerte der Reaktionszeiten über die Testblöcke gebildet. Bei der Aufgabe 2-back müssen jeweils die ersten beiden Stimuli unbeantwortet bleiben (keine Taste drücken ist die richtige Reaktion), da noch keine um 2 Schritte zurückliegenden Stimuli bekannt sind. Diese Reaktionen werden mitgezählt, so dass für beide Aufgaben die Höchstanzahl richtiger bzw. falscher Reaktionen bei 168 liegt.

B 7 Statistische Auswertung der Daten

Einleitend ist anzumerken, dass die statistische Analyse der Daten für die GSM- und die UMTS-Exposition getrennt erfolgte. Untersucht wurde jeweils im Vergleich zur Sham-Exposition, ob bei GSM-Exposition oder bei UMTS-Exposition ein Einfluss auf die untersuchten Schlafparameter zu beobachten war. Dabei wurde der gepaarten Natur der Daten durch Verwendung von statistischen Verfahren für abhängige Variablen Rechnung getragen. Zur Erzielung robuster Schätzwerte für die jeweiligen Expositionsbedingungen wurden individuell Mittelwerte aus den drei Nächten mit der jeweils gleichen Expositionsbedingung gebildet und als Basis für die weiteren Analysen verwendet.

In einem nächsten Schritt wurden auf individueller Ebene die Differenzen zwischen der GSM bzw. der UMTS-Expositionsbedingung und der Sham-Expositionsbedingung gebildet. Diese Differenzen wurden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit ($p < 0.01$) auf Normalverteilung geprüft (Shapiro-Wilk test für $n < 50$; Kolmogorov-Smirnov für $n > 50$). Für normalverteilte Differenzen wurde die Nullhypothese, dass die mittlere Differenz gleich Null ist, mit dem Student's t-Test überprüft, für nicht normalverteilte Daten wurde der Vorzeichenrangtest von Wilcoxon für gepaarte Beobachtungen herangezogen. Getestet wurde jeweils mit einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha < 0.05$. Beide Tests sind den Daten angemessene spezielle Anwendung einer einfaktoriellen Varianzanalyse.

Die primäre Struktur der Auswertung der Zielparameter, die während der Testungen am Tag gewonnen wurden, ist die gleiche wie bei den in der Nacht erhobenen Daten. Da die am Tag erhobenen Daten zweimal im Tagesverlauf erhoben wurden, einmal vormittags und einmal nachmittags, wurden zusätzlich Tageszeiteffekte untersucht.

Mit einem allgemeinen linearen Modell (GENMOD-Prozedur) wurden der Einfluss der Exposition und der Tageszeit simultan mit einem Repeated Measurement Ansatz untersucht. Auf die Berücksichtigung eines Sequenzeffekts wurde verzichtet, da die Daten von je drei Versuchen pro Expositionsbedingung für die weitere Auswertung gemittelt wurden, wodurch ein Sequenzeffekt minimiert wurde.

Alle statistischen Analysen wurden mit dem Statistikprogramm SAS Version 9.1. für Windows durchgeführt, Abbildungen wurden teils mit SAS und teils mit SigmaPlot Version 9.0 erstellt.

C Ergebnisse zum Schlaf

C 1 Charakterisierung des Schlafes der Probanden unter Sham-Bedingungen – Vergleich mit altersspezifischen Normdaten

Um die Teilnehmer der Studie hinsichtlich ihres Schlafes zu charakterisieren, wurden 21 Schlafparameter ausgewählt und die Daten der Teilnehmer (männlich, Alter 18 – 30 Jahre) für die nicht exponierten Nächte (Sham-Bedingung) mit denen einer gesunden Normstichprobe für gesunde männliche Probanden im Alter von 20 bis 39 Jahren verglichen (siehe Tab. 27). Die Normdaten wurden in einem von der EU geförderten Forschungsprojekt (SIESTA, siehe <http://ofai.at/siesta/>) erhoben, in dem unsere Arbeitsgruppe mitgearbeitet hat. Für nähere Informationen zu diesem Projekt sei u.a. auf Klösch et al. (2001), Rappelsberger et al. (2001), Danker-Hopfe et al. (2005b) sowie Anderer et al. (2006) verwiesen. Es wurden die Parameter ausgewählt, für die Referenzwerte vorliegen (Anderer et al. 2006).

Tab. 27: Vergleich von 21 ausgewählten Schlafparametern zur Charakterisierung der Stichprobe im Vergleich zu Normdaten (Anderer et al. 2006)

Variable	Abkürzung	Einheit	Normdaten Mittel ± SD	Stichprobe Mittel ± SD
Gesamtschlafperiode	TSP__00B	[min]	445 ± 38	476 ± 7
Gesamtschlafzeit	TST__00B	[min]	420 ± 34	456 ± 16
Schlafeffizienz	EFF__00B	[%]	90 ± 6	93 ± 3
Schlaflatenz	SLAT__00B	[min]	19 ± 24	16 ± 7
REM-Schlaflatenz	REML__00B	[min]	76 ± 18	88 ± 17
Anzahl der Schlafzyklen	FCYC__00B		4.2 ± 0.7	3.9 ± 0.5
Wach in der TSP	WTSP__00B	[min]	26 ± 19	14 ± 13
Wach nach Schlafende	WAFA__00B	[min]	3 ± 4	3 ± 1
Anzahl der Aufwachereignisse	FW__00B		16 ± 7	7 ± 4
Anzahl der Stadienwechsel	FS__00B		136 ± 37	141 ± 21
NREM1-Anteil	S1__00B	[min]	31 ± 15	41 ± 13
NREM1-Anteil	S1P__00B	[% TST]	7 ± 4	9 ± 3
NREM2-Anteil	S2__00B	[min]	225 ± 29	226 ± 35
NREM2-Anteil	S2P__00B	[% TST]	54 ± 6	50 ± 8
NREM3-Anteil	S3__00B	[min]	34 ± 13	36 ± 17
NREM3-Anteil	S3P__00B	[% TST]	8 ± 3	8 ± 4
NREM4-Anteil	S4__00B	[min]	41 ± 20	73 ± 29
NREM4-Anteil	S4P__00B	[% TST]	10 ± 5	16 ± 6
REM-Schlaf-Anteil	REM__00B	[min]	89 ± 16	80 ± 16
REM-Schlaf-Anteil	REMP__00B	[% TST]	21 ± 3	18 ± 4
Movement Time-Anteil	MT__00B	[min]	3 ± 2	6 ± 2

Ein Vergleich der Daten zur Schlafstruktur für die Teilnehmer zeigt zum einen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Normdaten. Da die Aufzeichnungszeit (Time in Bed) in beiden Studien gleich war, belegen die etwas längere Schlafperiodenzeit, eine längere Gesamtschlafzeit, eine höhere Schlaffeffizienz sowie eine geringere Einschlafzeit der Teilnehmer, dass es sich um nicht schlafgestörte Personen handelt. Der im Vergleich zur Normstichprobe (Anderer et al. 2006) höhere NREM4-Anteil an der Gesamtschlafzeit lässt sich vermutlich z.T. darauf zurückführen, dass die Normstichprobe zu 50% männliche Personen im Alter von 30 bis 39 Jahren umfasst. Es ist bekannt, dass die Reduktion des Tiefschlafes, insbesondere bei Männern, schon relativ früh beginnt (Danker-Hopfe et al. 2005b).

C 2 Ergebnisse auf der Basis visuell ausgewerteter Schlafaufzeichnungen

Zunächst lässt sich festhalten, dass die überwiegende Anzahl der individuellen Differenzen zwischen der Merkmalsausprägung unter Sham- und unter Expositionsbedingung normalverteilt ist. Für die GSM900-Exposition sind es 86,4% und für die UMTS-Exposition 80,3%, so dass in den meisten Fällen parametrische Verfahren zur Überprüfung der Hypothese, dass die individuellen Unterschiede sich nur zufällig von Null unterscheiden, herangezogen werden konnten.

Unter GSM900-Exposition zeigte eine der insgesamt 66 untersuchten Variablen eine Veränderung, welche die Signifikanzgrenze knapp erreichte ($p = 0.0488$). Der Anteil von NREM1-Schlaf an der Schlafperiodenzeit war unter Exposition um 3,2 min niedriger als unter der Sham-Bedingung, was auf eine tendenziell tieferen Schlaf unter Exposition schließen lässt (vgl. Abb. 40).

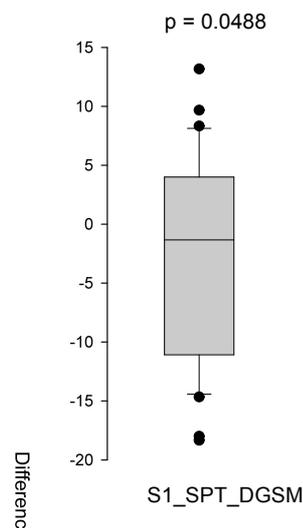


Abb. 40: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (GSM900-Exposition - Sham) für den NREM1 Schlaf [min] an der Schlafperiodenzeit.

Unter UMTS-Exposition weisen insgesamt sechs der 66 Variablen eine statistisch signifikante Veränderung auf, die ausnahmslos den leichten Schlaf, d.h. den NREM1-Schlaf betreffen. In den UMTS exponierten Nächten findet sich sowohl während der Time in Bed wie auch in der Schlafperiodenzeit und hier insbesondere im zweiten Drittel der Nacht absolut (vgl. Abb. 41) und prozentual (vgl. Abb. 42) signifikant weniger NREM1.

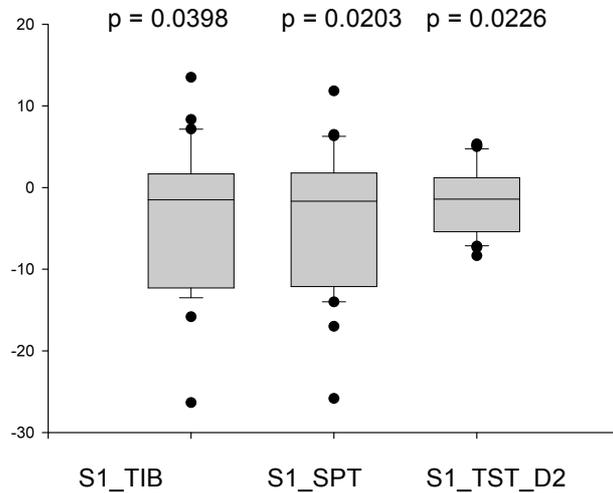


Abb. 41: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (UMTS-Exposition - Sham) für den NREM1 Schlaf [min] in der Time in Bed (S1_TIB), der Schlafperiodenzeit (S1_SPT) und der Zeit des zweiten Nachtdrittels (S1_TIB_D2).

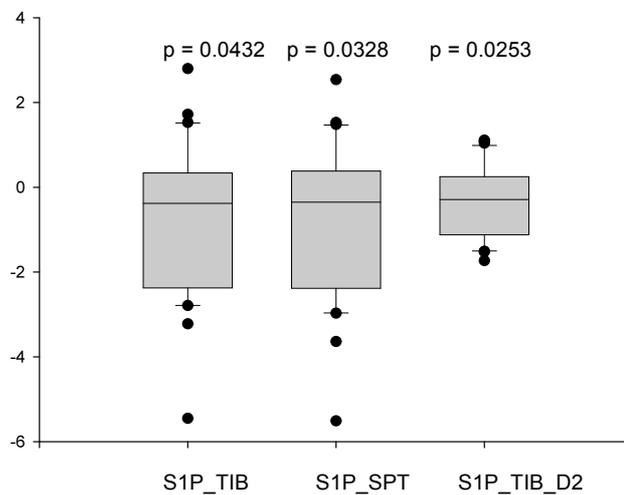


Abb. 42: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (UMTS-Exposition - Sham) für den NREM1 Schlaf [%] der Time in Bed (S1P_TIB), Schlafperiodenzeit (S1P_SPT) und der Zeit des zweiten Nachtdrittels (S1P_TIB_D2).

Die Diskussion dieser Ergebnisse erfolgt gemeinsam mit den Ergebnissen aus der automatischen Schlafstadienklassifikation.

C 3 Ergebnisse auf der Basis automatisch ausgewerteter Schlafaufzeichnungen

Eine Überprüfung der Normalverteilungshypothese der individuellen Differenzen in den Schlafparametern ergab, dass für die GSM900-Exposition 16,4% (29) der untersuchten Variablen (individuelle Differenzen zwischen Sham und GSM900) und für die UMTS-Exposition 22,6 % (40) der Variablen als nicht normalverteilt anzusehen sind. Der in Abhängigkeit vom Zutreffen der Normalverteilungsannahme gewählte Test (Student's t-Test bzw. Wilcoxon's Vorzeichenrangtest für gepaarte Beobachtungen) führte für die GSM900 MHz Exposition bei 13 der 177 Variablen zu signifikanten Ergebnissen und für die UMTS Exposition bei 3 Variablen. Die Verteilung der signifikanten Variablen ist hier noch einmal in den Abb. 43 – 46 graphisch dargestellt.

Von den insgesamt 13 signifikant unter GSM-Exposition veränderten Variablen beschreibt knapp die Hälfte (6) Veränderungen, die den REM-Schlaf betreffen. So ist über die gesamte Nacht gesehen sowohl die absolute (min) als auch die relative (% der TST) im REM-Schlaf verbrachte Zeit statistisch signifikant erhöht (6.3 min, $p = 0.0047$ bzw. 1.4%, $p = 0.0027$; vgl. Abb. 43 und Abb. 44). Dies spiegelt sich auch in einer erhöhten durchschnittlichen Dauer der REM-Zyklen wider (2.3min, $p = 0.0082$, Abb. 43). Insbesondere ist die Dauer des REM-Schlafes (2.7min, $p = 0.0375$) in den mittleren Schlafzyklen bzw. im dritten Nachtviertel erhöht (3.5min, $p = 0.0108$), im dritten Nachtviertel gilt dies auch für den prozentualen Anteil an der Gesamtschlafzeit (2.8%, $p = 0.0159$). Der erhöhte REM-Anteil geht sowohl über die gesamte Nacht gesehen als auch im dritten Viertel der Nacht auf Kosten der im Stadium 2 des NREM-Schlafes (Dauer in Minuten und in % der Gesamtschlafzeit) verbrachten Zeit (Abb. 43 und Abb. 44).

Ferner ist über die gesamte Nacht die Anzahl der Stadienwechsel vom Tiefschlaf in den leichten NREM1-Schlaf reduziert (0.3, $p = 0.0019$; Abb. 45). Eine statistisch signifikante Erhöhung lässt sich für die als Movement Time (Bewegung) zu bewertende Zeit im ersten Schlafzyklus (0.4min, $p = 0.0250$) bzw. ersten Viertel des Nachtschlafes (0.3min, $p = 0.0470$) beobachten (Abb. 45). Inhaltlich ist dieser Unterschied jedoch in keiner Weise relevant, die beobachtete Veränderung unter Exposition entspricht im Mittel weniger als einer Epoche.

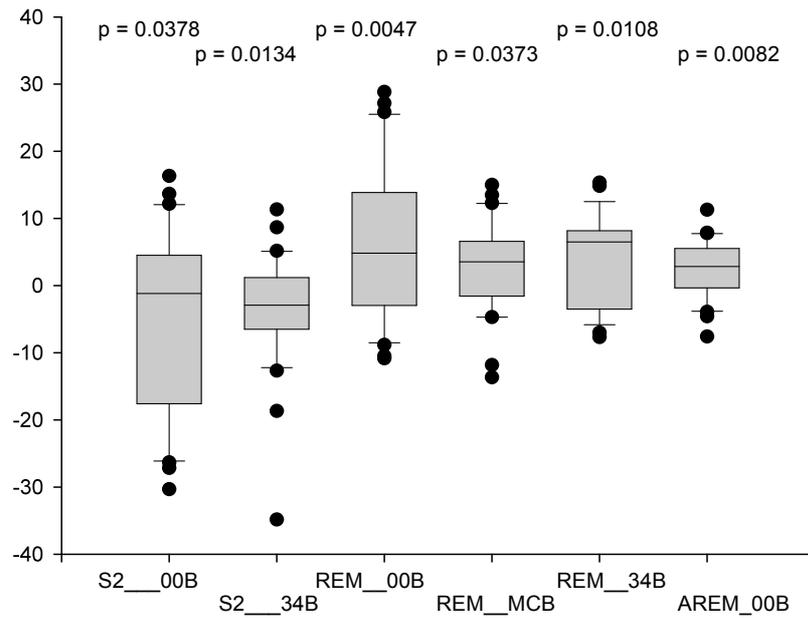


Abb. 43: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (GSM-Exposition - Sham) für die durchschnittliche Dauer [min] der im NREM2 verbrachten Zeit während der gesamten Nacht (S2__00B) sowie im dritten Viertel der Nacht (S2__34B), der im REM-Schlaf verbrachten Zeit in der gesamten Nacht (REM__00B), in den mittleren Schlafzyklen (REM__MCB) sowie im dritten Viertel der Nacht (REM__34B) und der durchschnittlichen Dauer der REM-Zyklen (AREM__00B).

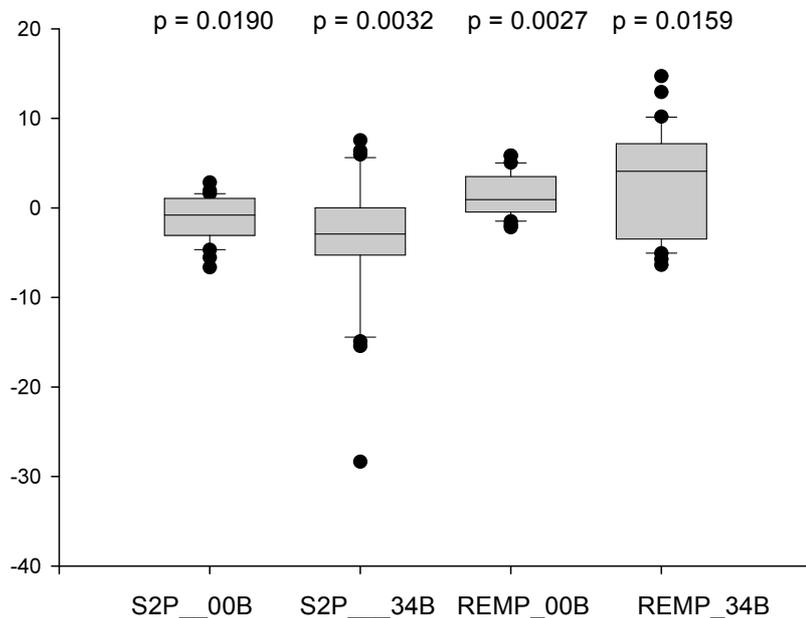


Abb. 44: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (GSM-Exposition - Sham) für die durchschnittliche Dauer [% der Gesamtschlafzeit] von NREM2 und REM-Schlaf in der Nacht (S2P__00B, REMP__00B) sowie im dritten Viertel der Nacht (S2P__34B, REMP__34B).

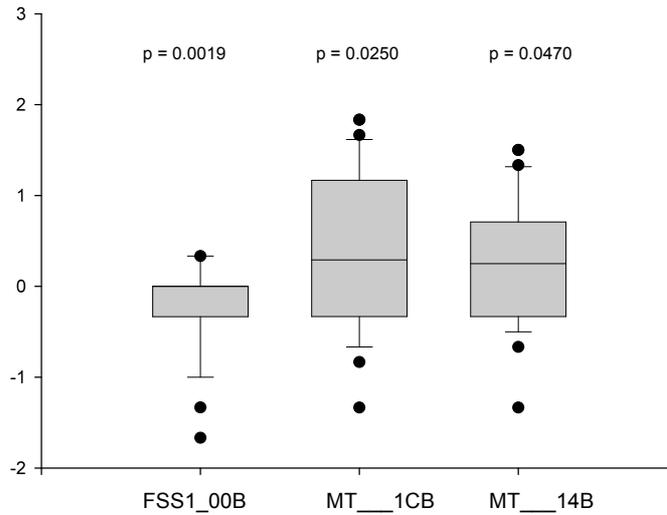


Abb. 45: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (GSM-Exposition - Sham) für die Anzahl der Stadienwechsel vom Tiefschlaf in den NREM1-Schlaf (FSS1_00B) sowie die Movement Time im ersten Schlafzyklus (MT__1CB) und im ersten Viertel der Nacht (MT__14B).

Unter UMTS-Exposition ist eine statistisch signifikante Erhöhung der Dauer der REM-Zyklen zu beobachten (1.3min, $p = 0.0493$), die Dauer der NREM-Zyklen ist entsprechend signifikant verkürzt (2.5min, $p = 0.0320$). Es ist insbesondere die im Stadium NREM2 verbrachte Zeit in den mittleren Schlafzyklen signifikant reduziert (2.3min, $p=0.0138$). Die Verteilung der individuellen Unterschiede dieser Parameter bei UMTS- und Sham-Exposition ist Abb. 46 zu entnehmen.

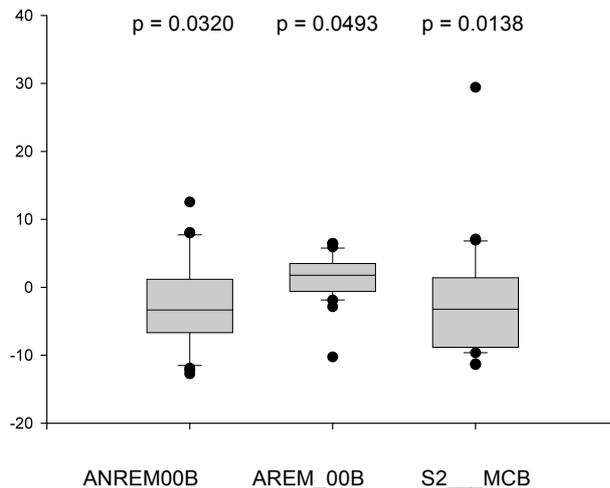


Abb. 46: Boxplot der Verteilung der individuellen Differenzen (UMTS-Exposition - Sham) für die durchschnittliche Dauer [min] der NREM-Zyklen in der Nacht (ANREM00B), der REM-Zyklen (AREM_00B) sowie der Dauer der im NREM2 Schlaf verbrachten Zeit in den mittleren Schlafzyklen (S2__MCB).

Diskussion

Der Schlaf-Wach Zyklus und die Schlafstruktur reflektieren die spontane Aktivität von autoregulatorischen zentralnervösen Prozessen (Anderer et al. 2006). In der vorliegenden Studie wurde der Schlaf als Modell für die Untersuchung des Einflusses von elektromagnetischen Feldern auf das zentrale Nervensystem herangezogen. Der Schlaf ist u.a. deshalb besonders geeignet, weil er ein reversibler Verhaltenszustand ist, der durch eine Abkoppelung der Wahrnehmung und damit verbunden eine relative Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen gekennzeichnet ist. Damit können viele Einflussfaktoren, die bei Untersuchungen zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf die Gehirnfunktion im Wachzustand als Confounder angesehen werden müssen, kontrolliert werden.

In der vorliegenden Studie wurde – anders als in den meisten vorhergehenden Studien – eine Exposition über die gesamte Nacht simuliert und zwar mit einer Intensität, welche die gesetzlich zulässigen Grenzwerte erreicht, aber nicht überschreitet. Darüber hinaus ist die vorliegende Studie unseres Wissens die erste Studie, in welcher der Einfluss einer UMTS-Exposition auf den Schlaf untersucht wird. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Anzahl der Variablen (insgesamt 241), die zur Beschreibung der Schlafstruktur herangezogen wurde. Sie ist in der vorliegenden Studie um ein Vielfaches höher als in den bisher publizierten Studien, in denen die Zahl von 1 (Borbély et al. 1999, Hung et al. 2007 – hier werden nur Ergebnisse für einen Parameter mitgeteilt) bis 14 (Fritzer et al. 2007) reicht.

Im Folgenden sollen zunächst die bei GSM900-Exposition beobachteten Ergebnisse im Vergleich zu publizierten Daten aus Laborstudien diskutiert werden. In Tab. 28 sind noch einmal alle für GSM900 beobachteten statistisch signifikanten Ergebnisse zusammengestellt. Festzuhalten ist, dass in der überwiegenden Zahl von Untersuchungen kein Effekt von elektromagnetischen Feldern des GSM-Mobilfunks beobachtet werden konnte. Die vereinzelt publizierten Beobachtungen zu statistisch signifikanten Veränderungen unter Exposition betreffen unterschiedliche Variablen (Einschlaflatenz, REM-Schlaf Dauer, REM-Schlaf Latenz sowie Wach nach Schlafbeginn) und sind Einzelbeobachtungen. Aus den bei Mann und Röschke (1996) angegebenen Werten lassen sich mit Einschränkung zu erwartende standardisierte Effektgrößen für den REM-Schlaf Anteil (ca. 1.03) und die Einschlaflatenz (0.53) ableiten. Mit einer Stichprobengröße von $n=30$ hätte ein entsprechender Effekt für den REM-Schlaf Anteil in einem t-Test für gepaarte Beobachtung und bei zweiseitiger Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0.05$ mit einer Power > 0.99 als statistisch signifikant nachgewiesen werden können. Eine Stichprobengröße von $n=26$ hätte ausgereicht, um einen solchen Effekt mit einer Power von 0.99 und einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0.01$ nachzuweisen. Für die Einschlaflatenz reicht eine Stichprobengröße von $n=28$ aus, um mit einer Power von 0.8 und einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0.05$ einen Effekt von 0.55 als statistisch signifikant nachzuweisen. Dass die Beobachtungen von Mann und Röschke (1996) in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden konnten, liegt also nicht an einer nicht ausreichenden Power.

Aus den bei Borbély et al. (1999) angegebenen Mittelwerten und Standardfehlern von Wake after Sleep onset unter GSM- und Sham- Exposition lässt sich ein standardisierter Effekt von 0.57

schätzen. Ein Effekt von 0.55 (d.h. ein geringerer als der beobachtete) wäre – wie bereits erwähnt - mit einer Stichprobengröße von $n=28$ bereits mit einer Power von 0.8 und einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit als statistisch signifikant nachzuweisen.

Aus den bei Loughran et al. (2005) publizierten Daten lässt sich ein Wert von 0.35 als Schätzwert der standardisierten Effektgröße ableiten. Die Stichprobengröße der vorliegenden Studie reicht nicht aus, um einen solchen Effekt mit einer Power von 0.8 und einer einseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0.05$ in einem t-Test für gepaarte Beobachtungen nachzuweisen. Dazu wäre eine Stichprobengröße von $n=52$ notwendig gewesen. Da jedoch die australische Arbeitsgruppe die einzige ist, die einen solchen Effekt gefunden hat und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die REM-Latenz in der Studie von Mann und Röschke (1996) tendenziell eine statistisch nicht signifikante Verlängerung aufweist, wird das Ergebnis von Loughran et al. (2005) im Kontext aller zu dieser Variable vorliegenden Ergebnisse eher als Zufallsbefund bewertet.

Für die Einschlaf Latenz, die REM-Schlaf Latenz und den Anteil an Wach nach Schlafbeginn ließen sich in der vorliegenden Studie keine entsprechenden signifikanten Veränderungen nachweisen. In der vorliegenden Studie ließ lediglich die detailliert untersuchte REM-Schlaf Dauer eine signifikante Veränderung unter Exposition im Vergleich zur Sham-Exposition erkennen. Allerdings ist in der vorliegenden Studie die REM-Schlaf Dauer erhöht, während Mann und Röschke (1996) unter GSM900-Exposition eine verkürzte REM-Schlaf Dauer (einen REM supprimierenden Effekt) beobachteten. Damit lässt sich festhalten, dass die in Kap. B1 aufgestellte Hypothese eines REM-Schlaf supprimierenden Effekts von GSM900- Exposition nicht bestätigt werden konnte. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die sechs in dieser Studie signifikanten den REM-Schlaf betreffenden Variablen voneinander abhängig sind und dass die Ergebnisse dieser Studie im Gegensatz zu zuvor publizierten Daten stehen, ist davon auszugehen, dass GSM900-Exposition keinen systematischen Effekt auf den REM-Schlaf hat. Die beobachteten Veränderungen unter GSM900-Exposition scheinen eher ein statistisch zufälliges Resultat zu sein.

Insgesamt wurden 241 Variablen getestet, welche die Makrostruktur des Schlafes beschreiben. Da die Tests mit einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% durchgeführt wurden, sind schon rein zufallsbedingt 12 Testergebnisse als statistisch signifikant zu erwarten. Die Anzahl der signifikanten Variablen in der vorliegenden Studie betrug 14. Davon sind allerdings zumindest zwei physiologisch überhaupt nicht relevant. Die statistisch signifikanten Veränderungen in der Movement Time (im ersten Schlafzyklus und im ersten Nachtviertel, wobei zu beachten ist, dass auch diese Variablen nicht unabhängig voneinander sind) betragen weniger als 0.5 Minuten, d.h. weniger als eine Auswertepoche (Dauer 30 Sekunden).

Die statistisch signifikanten Veränderungen im NREM2-Schlaf (Dauer und % der TST in der gesamten Nacht sowie insbesondere im 3. Viertel der Nacht) spiegeln die Veränderungen im REM-Schlaf wider. Die Erhöhung des REM-Schlaf Anteils geht zu Lasten des NREM2-Schlafes, der reduziert ist. Die Tatsache, dass die REM-Schlaf Erhöhung nicht zu einer Zunahme des Wachanteils oder des

Leichtschlaf-Anteils (NREM1) führt, belegt, dass die GSM900-Exposition nicht schlafstörend wirkt. Zusammen mit der Beobachtung eines reduzierten NREM1-Anteils sowie einer reduzierten Anzahl von Stadienwechseln Tiefschlaf zu NREM1 ließen sich die Veränderungen – sofern man sie überhaupt inhaltlich werten möchte – in Richtung leichter physiologischer Anpassungen deuten, die schlafkonsolidierend wirken. Keinesfalls lassen sich aus den Ergebnissen Hinweise auf eine schlafstörende Wirkung von GSM900-Exposition ableiten.

Tab. 28: Variablen der Schlafstruktur, für die signifikante Veränderungen beobachtet werden konnten.

Variable	Effekt	Autor(en)
Einschlaflatenz [min]	verkürzt	Mann und Röschke (1996)
REM-Schlaf Dauer [min]	verkürzt	Mann und Röschke (1996)
Wach nach Schlafbeginn [min]	reduziert	Borbély et al. (1999)
REM-Schlaf-Latenz [min]	verkürzt	Loughran et al. (2005)
NREM1-Schlaf gesamte Nacht [min]	reduziert	vorliegende Studie
REM-Schlaf Dauer gesamte Nacht [min]	erhöht	vorliegende Studie
REM-Schlaf Dauer gesamte Nacht [% der TST]	erhöht	vorliegende Studie
durchschnittliche Dauer der REM-Zyklen	erhöht	vorliegende Studie
REM-Schlaf Dauer in den mittleren Schlafzyklen [min]	erhöht	vorliegende Studie
REM-Schlaf Dauer im 3. Nachtviertel [min]	erhöht	vorliegende Studie
REM-Schlaf Dauer im 3. Nachtviertel [%]	erhöht	vorliegende Studie
NREM2-Schlaf gesamte Nacht [min]	reduziert	vorliegende Studie
NREM2-Schlaf gesamte Nacht [% der TST]	reduziert	vorliegende Studie
NREM2-Schlaf 3. Viertel der Nacht [min]	reduziert	vorliegende Studie
NREM2-Schlaf 3. Viertel der Nacht [% der TST]	reduziert	vorliegende Studie
Stadienwechsel vom Tiefschlaf zum NREM1	reduziert	vorliegende Studie
Movement Time im 1. Schlafzyklus [min]	erhöht	vorliegende Studie
Movement Time im 1. Nachtviertel [min]	erhöht	vorliegende Studie

Wie bereits erwähnt, ist die vorliegende Studie unseres Wissens die erste, in der ein möglicher Einfluss von UMTS-Exposition auf den Schlaf untersucht wird. Insgesamt zeigen sich unter UMTS-Exposition weniger Veränderungen als unter GSM900-Exposition. Die Zahl der signifikanten Ergebnisse liegt mit neun unter der, welche bei insgesamt 241 durchgeführten Tests als zufällig signifikant zu erwarten wären (12). Die beobachteten Veränderungen sind darüber hinaus

physiologisch nicht bedeutsam, so ist die Dauer der REM-Zyklen um 1.3 Minuten erhöht (bei einer durchschnittlichen REM-Schlaf Dauer von 80 Minuten). Die Dauer der NREM-Zyklen ist entsprechend verkürzt, um 2.5 Minuten bei insgesamt 376 Minuten, die im NREM-Schlaf (NREM1 + NREM2 + NREM3 + NREM4) verbracht werden. Dies ist im Wesentlichen durch die um 2.3 Minuten verkürzte Zeit bedingt, die in den mittleren Schlafzyklen im NREM2-Schlaf verbracht wurde.

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass eine UMTS-Exposition keinen Einfluss auf die Makrostruktur des Schlafes hat.

C 4 Ergebnisse der Auswertung der Powerspektralwerte

Für 44.5% aller Variablen zur Beschreibung der individuellen Differenzen der Leistungsspektren (57.8% für die GSM900-Differenzen und 31.3% der UMTS-Differenzen) musste ein nicht parametrisches Testverfahren herangezogen werden, da die Daten nicht normalverteilt waren.

Unter GSM900-Exposition wiesen insgesamt 32 Leistungsspektren-Variablen eine signifikante Veränderung auf (siehe Tab. 29). Für alle Schlafstadien gemeinsam betrachtet (Gesamtschlafzeit) wiesen lediglich die Frequenzbänder 21.0 und 22.0 Hz eine signifikante Veränderung auf. Die Leistungsdichte in diesen beiden Frequenzbändern war unter GSM900-Exposition erhöht. Dies gilt für die flankierenden Frequenzbänder 15.0 bis 25.0 Hz ebenfalls, ohne dass jedoch eine statistische Signifikanz erreicht wurde (siehe Abb. 46). Eine auf die Wach-Epochen in der Nacht beschränkte Analyse ergab in drei Frequenzbändern statistisch signifikante Ergebnisse: 6.5, 7.5 und 8.5 Hz. In diesen Frequenzbändern waren die Leistungsdichten unter Exposition ebenfalls erhöht. Insgesamt waren die Leistungsdichten im Frequenzband 5.5 – 9.0 Hz erhöht, wobei jedoch nur die angegebenen Frequenzen statistisch signifikante Veränderungen erkennen ließen. Im NREM1-Schlaf waren die Powerspektralwerte für den Frequenzbereich 1.5 – 9.0 Hz tendenziell erhöht, statistisch signifikant wurde diese Erhöhung jedoch nur für die Frequenzen 1.5 -2.5 und 6.5 Hz.

In Tab. 29 sind die signifikanten Differenzen der Powerspektralwerte zwischen Schein- und GSM900-Exposition dargestellt. Positive Differenzen sind Ausdruck höherer Powerspektralwerte unter Exposition GSM900.

Tab. 29: Differenzen zwischen Schein- und GSM900-Exposition: Positive Differenzen sind Ausdruck höherer Powerspektralwerte unter Exposition GSM900. Es sind folgende Irrtumswahrscheinlichkeiten angegeben:

Pr > |t|.....Irrtumswahrscheinlichkeit des gepaarten t-Tests

Pr >= |S|.....Irrtumswahrscheinlichkeit des Vorzeichenrangtests nach Wilcoxon

Pr >= |S|.....Irrtumswahrscheinlichkeit des Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung

Variable:	arithm. Mittel	SD	Pr > t	Pr >= S	Pr < W	Median
F21_0S0_DGSM	0,0317	0,0865	0,0544	0,0273	<0,0001	0,0100
F22_0S0_DGSM	0,0300	0,0818	0,0540	0,0433	<0,0001	0,0100
F06_5W0_DGSM	0,4133	1,0416	0,0380	0,0694	0,9431	0,3800
F07_5W0_DGSM	0,3820	0,8802	0,0243	0,0281	0,9797	0,2550
F08_5W0_DGSM	0,8703	2,1582	0,0352	0,0334	0,0346	0,3850
F01_510_DGSM	2,0747	4,9590	0,0294	0,0677	0,3201	1,9750
F02_010_DGSM	1,5983	3,1706	0,0099	0,0405	0,0186	0,6450
F02_510_DGSM	1,0667	2,6937	0,0384	0,1122	0,0335	0,4350
F06_510_DGSM	0,3137	0,7934	0,0387	0,0344	0,8056	0,2350
F18_020_DGSM	0,0330	0,1138	0,1231	0,0462	<0,0001	0,0200
F19_020_DGSM	0,0350	0,1098	0,0913	0,0194	<0,0001	0,0200
F19_520_DGSM	0,0370	0,1139	0,0856	0,0340	<0,0001	0,0100
F20_020_DGSM	0,0407	0,1162	0,0651	0,0138	<0,0001	0,0150
F20_520_DGSM	0,0387	0,1158	0,0777	0,0390	<0,0001	0,0100
F21_020_DGSM	0,0403	0,1063	0,0466	0,0068	<0,0001	0,0150
F22_020_DGSM	0,0357	0,0921	0,0425	0,0038	<0,0001	0,0150
F22_520_DGSM	0,0317	0,0863	0,0538	0,0182	<0,0001	0,0150
F23_020_DGSM	0,0267	0,0804	0,0798	0,0352	<0,0001	0,0100
F24_020_DGSM	0,0227	0,0767	0,1161	0,0362	<0,0001	0,0100
F19_0L0_DGSM	0,0310	0,1109	0,1367	0,0268	<0,0001	0,0200
F19_5L0_DGSM	0,0347	0,1111	0,0980	0,0344	<0,0001	0,0200
F20_0L0_DGSM	0,0373	0,1098	0,0727	0,0191	<0,0001	0,0200
F21_0L0_DGSM	0,0350	0,0980	0,0602	0,0357	<0,0001	0,0100
F22_0L0_DGSM	0,0313	0,0887	0,0627	0,0293	<0,0001	0,0100
F22_5L0_DGSM	0,0293	0,0825	0,0612	0,0353	<0,0001	0,0150
F01_0N0_DGSM	27,7917	62,0539	0,0204	0,0092	0,3168	21,9650
F01_5N0_DGSM	12,5180	26,6365	0,0154	0,0092	0,5045	15,0900
F02_0N0_DGSM	4,8033	10,7368	0,0205	0,0168	0,4884	4,9600
F02_5N0_DGSM	2,5880	6,4227	0,0354	0,0584	0,1583	2,6150
F03_0N0_DGSM	1,8880	4,8287	0,0408	0,0584	0,1230	0,9600
F19_5N0_DGSM	0,0333	0,0991	0,0758	0,0396	<0,0001	0,0150
F22_0N0_DGSM	0,0303	0,0843	0,0584	0,0448	<0,0001	0,0100

Im NREM2-Schlaf sind insgesamt 10 der 14 Leistungsdichten für die Frequenzen im Bereich 18.0 - 24.0 Hz signifikant erhöht. Sechs davon bleiben statistisch signifikant erhöht, wenn NREM1 und NREM2 zum Leichtschlaf zusammengefasst werden. Wenn dagegen alle NREM-Schlafstadien simultan betrachtet werden, sind es nur noch die Leistungsdichten der Frequenzen 19.5 Hz- und 22.0 Hz, die unter GSM900-Exposition signifikant erhöht sind. Hinzukommt, dass hier die Leistungsdichten im Delta- und langsamen Theta-Bereich (1.0 – 3.0 Hz) unter Exposition statistisch signifikant höher sind. Im Tiefschlaf sowie im REM-Schlaf ließen sich keine statistisch signifikanten Veränderungen der Leistungsdichten beobachten. Die Signifikanz lag nur bei 3 von 32 signifikanten Ergebnissen unter $p < 0.01$: bei 2Hz in Stadium 1 und bei 21 und 22 Hz in Stadium 2. Alle anderen waren „nur“ auf dem 0.05 Niveau signifikant.

Unter UMTS-Exposition lassen lediglich neun der insgesamt 400 untersuchten Variablen eine statistisch signifikante Veränderung erkennen (siehe Tab. 30). So ist im Wach die Leistungsdichte im Frequenzbereich 8.5 bis 9.5 Hz erhöht. Im NREM1-Schlaf ist sie für insgesamt fünf ausgewählte Frequenzen (2.0, 6.0, 6.5, 8.0 und 15.5 Hz) statistisch signifikant erhöht. Schließlich ist für die Stadien NREM1 und NREM2 gemeinsam betrachtet die Leistungsdichte für 7.5 Hz unter Exposition signifikant erhöht. Weder für den REM-Schlaf, noch für den Tiefschlaf, den NREM2-Schlaf allein sowie den NREM-Schlaf bzw. den gesamten Schlaf ließen sich statistisch signifikante Veränderungen der Leistungsspektren unter UMTS-Exposition beobachten.

In Tab. 30 sind die signifikanten Differenzen der Powerspektralwerte zwischen Schein- und UMTS-Exposition dargestellt. Positive Differenzen sind Ausdruck höherer Powerspektralwerte unter Exposition UMTS.

Tab. 30: Differenzen zwischen Schein- und UMTS Exposition: Positive Differenzen sind Ausdruck höherer Powerspektralwerte unter Exposition UMTS. Es sind folgende Irrtumswahrscheinlichkeiten angegeben:

Pr > |t|.....Irrtumswahrscheinlichkeit des gepaarten t-Tests
Pr >= |S|.....Irrtumswahrscheinlichkeit des Vorzeichenrangtests nach Wilcoxon
Pr >= |S|.....Irrtumswahrscheinlichkeit des Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung

Variable:	arithm. Mittel	SD	Pr > t	Pr >= S	Pr < W	Median
F08_5W0_DUMTS	0,7730	1,8549	0,0300	0,0018	0,0065	0,9150
F09_0W0_DUMTS	0,7193	1,8844	0,0454	0,0197	0,0638	0,5450
F09_5W0_DUMTS	0,0970	5,4713	0,9233	0,0365	<0,0001	0,7750
F02_010_DUMTS	1,1910	2,8228	0,0281	0,0138	0,1381	0,8250
F06_010_DUMTS	0,2730	0,5937	0,0176	0,0134	0,0366	0,1950
F06_510_DUMTS	0,2957	0,6299	0,0155	0,0166	0,2333	0,2150
F08_010_DUMTS	0,2827	0,9873	0,1277	0,0463	0,0096	0,3450
F15_510_DUMTS	0,0507	0,1134	0,0207	0,0209	0,9899	0,0600
F07_5L0_DUMTS	0,2533	0,6504	0,0415	0,0746	0,1621	0,1850

Diskussion

Obwohl unter GSM900-Exposition für verschiedene Stadien des Schlafes signifikante Veränderungen der Leistungsspektren beobachtet werden konnten, lassen sich damit frühere Beobachtungen nicht belegen. So haben Mann und Röschke (1996) unter kontinuierlicher GSM-Exposition während der gesamten Nacht eine erhöhte EEG-Amplitude speziell im REM-Schlaf beobachtet. In der vorliegenden Studie konnten gerade für den REM-Schlaf keine signifikanten Veränderungen der Leistungsspektren beobachtet werden. Zusammen mit der Tatsache, dass auch in keiner anderen Studie ein Expositionseffekt für die Zielgrößen während des REM-Schlafes beobachtet werden konnte (auch nicht in den Nachfolgestudien aus dem Mainzer Labor, Wagner et al. 1998, 2000), lässt sich vermuten, dass auf quantitativer Ebene die Beobachtung von Mann und Röschke (1996) eher ein Zufallsbefund war.

Auch die Ergebnisse der wenigen Studien, in denen ein Einfluss von GSM-Exposition auf die Leistungsspektren im NREM-Schlaf beobachtet wurde (Borbély et al. 1999, Huber et al. 2000, 2002 und Loughran et al. 2005), konnten in der vorliegenden Studie nicht repliziert werden. In einer Nacht mit durchgängiger Exposition fanden Borbély et al. (1999) eine signifikant erhöhte Amplitude im Frequenzbereich 7.25 - 14.25 Hz mit zwei Peaks, einen bei 10-11 Hz und einen weiteren bei 13.5 – 14.0 Hz, d.h. im Bereich hochfrequenter Spindeln. Für diesen Frequenzbereich ließ sich in der vorliegenden Studie weder bei Betrachtung des NREM-Schlafes insgesamt, noch bei getrennter Betrachtung der NREM-Stadien ein Beleg finden. Eine signifikante Erhöhung der Leistungsspektren fand sich für Frequenzen im Beta-Spektrum (> 18 Hz). Im NREM-Schlaf wurde eine signifikante Zunahme der Leistungsspektren für Frequenzen im Delta- und langsamen Theta-Bereich beobachtet. Damit konnten auch die Beobachtungen von Huber et al. (2000, 2002) sowie von Loughran et al. (2005) nicht bestätigt werden, die einen Anstieg der Power in den Spindelfrequenzen und im Alpha-Frequenzband fanden. Die zuletzt genannten Studien unterscheiden sich von der vorliegenden u.a. dadurch, dass die Probanden vor der Schlafableitung für 30 Minuten exponiert wurden.

Im Gegensatz dazu wurden in der Studie von Hinrichs et al. (2005) 13 Probanden während der gesamten Nacht exponiert, dies jedoch durch ein vertikal polarisiertes GSM 1800 elektromagnetisches Feld (Fernfeldcharakteristik, 1736 Pulsfrequenz). Die EEG-Leistungsspektren veränderten sich durch die Befeldung nicht.

In einer Studie aus Kiel, in der die Probanden ebenfalls während der gesamten Nacht mit einem GSM900 Signal exponiert wurden, fanden Fritzer et al. (2007) keine Effekte der Befeldung auf die Powerspektren, die aus den Stadien 2-4 und REM gewonnen wurden. Aus Stadium 1 konnten nicht genügend artefaktfreie Epochen extrahiert werden, weswegen dazu keine Spektralanalyse berechnet wurde. Bei getrennter Betrachtung des ersten und zweiten Schlafzyklus fanden sich in einzelnen Frequenzbereichen (>25 Hz im 1. REM-Zyklus, 5-7 Hz im 1. Non-REM Zyklus, 7-15Hz im 2. REM-Zyklus) statistisch signifikante Unterschiede. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass bei den betroffenen Frequenzen besonders niedrige Amplituden in den Spektren vorliegen, so dass die Beobachtungen insgesamt nicht als Kurzzeiteffekt von EMF auf den Schlaf gewertet werden können.

In der vorliegenden Studie waren die Effekte ebenfalls eher gering. Die Signifikanz lag bei lediglich 3 der 32 signifikanten Variablen unter $p < 0.01$. Dies betraf die Frequenzen 2 Hz in Stadium 1 und 21-22 Hz in Stadium 2. Alle anderen waren nur auf dem $p < 0.05$ Niveau signifikant. Effekte von EMF auf den Beta-Frequenzbereich wurden auch bei Wach-EEGs beschrieben.

D'Costa et al. (2003) exponierten 10 Probanden im wachen Zustand wiederholt für jeweils 5 Minuten mit einem GSM Feld und fanden Veränderungen im Alpha- (8-13 Hz) und Beta- (13-32 Hz) Frequenzband, wobei sich insgesamt 7 der 32 analysierten Frequenzbänder signifikant zwischen der Expositionsbedingung „maximale Power“ und der Exposition im „Standby“- Modus unterschieden. Eine Zunahme der Power im Theta-Band fanden Hung et al. (2007) in einer 90 minütigen Schlafbedingung am Nachmittag im Anschluss an eine 30 Minuten dauernde Exposition mit einem GSM 900 Handy. Der Effekt zeigte sich allerdings nur in den zweiten 10 Minuten nach Exposition im „Zuhör“-Modus und allerdings auch nach Scheinexposition, sowie im dritten 10-Minuten Zeitraum nach „Standby“-Exposition, jedoch nicht nach der Exposition im „Gesprächs“-Modus. Diese Beobachtung ist nicht überraschend, da der Schlafbeginn in die entsprechenden Zeitabschnitte fällt. Auswirkungen auf andere Frequenzbereiche wurden nur in der Diskussion beschrieben, aber nicht mit konkreten Daten belegt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die von der Mainzer, der Schweizer und der australischen Arbeitsgruppe beobachteten Effekte von GSM900 MHz-Exposition auf quantitative Aspekte des Schlaf-EEGs im REM- bzw. Non-REM-Schlaf durch die vorliegende Studie nicht bestätigt werden konnten.

Bezüglich der UMTS-Exposition ist festzuhalten, dass die vorliegenden Ergebnisse keinen Anhaltspunkt dafür liefern, dass die Aktivität des Gehirns im Schlaf gemessen an den Powerspektralwerten beeinflusst wird. Es lassen sich keine systematischen Veränderungen beobachten. Insgesamt liegt die Zahl der statistisch signifikanten Veränderungen mit neun deutlich unter den 20, die schon rein zufallsbedingt bei 400 Tests und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% zu erwarten sind.

C 5 Ergebnisse der Spindelanalyse

Eine Überprüfung der Normalverteilungshypothese ergab, dass für die GSM 900 MHz Exposition 69.0% (559) der untersuchten Variablen (individuelle Differenzen zwischen Sham und GSM 900 MHz) und für die UMTS-Exposition 83.8 % (679) der Variablen als normalverteilt anzusehen sind. Der in Abhängigkeit vom Zutreffen der Normalverteilungsannahme gewählte Test (Student's T Test bzw. Wilcoxon's Vorzeichenrangtest für gepaarte Beobachtungen) führte für die GSM 900 MHz Exposition bei 24 Variablen (siehe Auflistung in Tab. 31) zu signifikanten Ergebnissen und für die UMTS Exposition bei 11 Variablen (siehe Tab. 32).

Tab. 31: Liste der unter GSM-Exposition im Vergleich zur SHAM-Exposition signifikant veränderten Spindelparameter: p kennzeichnet die Irrtumswahrscheinlichkeit, mit der die Nullhypothese, der Mittelwert der individuellen Differenzen ist 0, abgelehnt wird; Tendenz beschreibt die Richtung der Veränderung unter Exposition: ↑ Erhöhung unter Exposition, ↓ Reduktion unter Exposition.

Variablenname	Beschreibung der Variable	Tendenz	P
SS0A200	Ganze Nacht, NREM2, Amplitude, langsame mögliche	↑	0.0463 *)
SA0N214	1. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, alle möglichen	↑	0.0310
SS0N214	1. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, langsame mögliche	↑	0.0256
SF0N214	1. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, schnelle mögliche	↑	0.0437
SA0D214	1. Viertel der Nacht, NREM2, Dauer, alle möglichen	↑	0.0226
SF0D214	1. Viertel der Nacht, NREM2, Dauer, schnelle mögliche	↑	0.0325
SS0IN14	1. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Index, langsame mögliche	↑	0.0468
SA2S224	2. Viertel der Nacht, NREM2, Diskriminanzscore, alle sicheren	↓	0.0353 *)
SF0NN24	2. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Anzahl, schnelle mögliche	↓	0.0325 *)
SA0N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, alle möglichen	↓	0.0121 *)

Tab. 31	<i>Fortsetzung</i>		
Variablenname	Beschreibung der Variable	Tendenz	P
SA1N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, alle wahrscheinlichen	↓	0.0168 ^{*)}
SS0N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, langsame mögliche	↓	0.0197 ^{*)}
SS1N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, langsame wahrscheinliche	↓	0.0417 ^{*)}
SF0N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, schnelle mögliche	↓	0.0055 ^{*)}
SF1N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, schnelle wahrscheinliche	↓	0.0130 ^{*)}
SF2N234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, schnelle sichere	↓	0.0463 ^{*)}
SS1S234	3. Viertel der Nacht, NREM2, Diskriminanzscore, langsame wahrscheinliche	↑	0.0193 ^{*)}
SA2AD34	3. Viertel der Nacht, Tiefschlaf, Amplitude, alle sicheren	↓	0.0316 ^{*)}
SS2FD34	3. Viertel der Nacht, Tiefschlaf, Frequenz, langsame sichere	↑	0.0423
SA1A244	4. Viertel der Nacht, NREM2, Amplitude, alle wahrscheinlichen	↑	0.0318
SS1A244	4. Viertel der Nacht, NREM2, Amplitude, langsame wahrscheinliche	↑	0.0161
SS2A244	4. Viertel der Nacht, NREM2, Amplitude, langsame sichere	↑	0.0322
SF1A244	4. Viertel der Nacht, NREM2, Amplitude, schnelle wahrscheinliche	↑	0.0358
SF0IN44	4. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Index, schnelle mögliche	↑	0.0363 ^{*)}

^{*)} nicht normalverteilt

Tab. 32: Liste der unter UMTS-Exposition im Vergleich zur SHAM-Exposition signifikant veränderten Spindelparameter: p kennzeichnet die Irrtumswahrscheinlichkeit, mit der die Nullhypothese, der Mittelwert der individuellen Differenzen ist 0, abgelehnt wird; Tendenz beschreibt die Richtung der Veränderung unter Exposition: ↑ Erhöhung unter Exposition, ↓ Reduktion unter Exposition.

Variablenname	Beschreibung der Variable	Tendenz	p
SS0FD14	1. Viertel der Nacht, Tiefschlaf, Frequenz, langsame mögliche	↓	0.0410
SS1FD14	1. Viertel der Nacht, Tiefschlaf, Frequenz, langsame wahrscheinliche	↓	0.0336
SS2FD14	1. Viertel der Nacht, Tiefschlaf, Frequenz, langsame sichere	↓	0.0054
SS0FN14	1. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Frequenz, langsame mögliche	↓	0.0408
SS1FN14	1. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Frequenz, langsame wahrscheinliche	↓	0.0277
SS2FN14	1. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Frequenz, langsame sichere	↓	0.0412
SF0N224	2. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, schnelle mögliche	↓	0.0373
SF1N224	2. Viertel der Nacht, NREM2, Anzahl, schnelle wahrscheinliche	↓	0.0488
SF2S224	2. Viertel der Nacht, NREM2, Diskriminanzscore schnelle sichere	↓	0.0283
SF2SN24	2. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Diskriminanzscore, schnelle sichere	↓	0.0089
SA2AN24	2. Viertel der Nacht, NREM gesamt, Amplitude, alle sichere	↓	0.0485

Von den 24 Variablen zur Charakterisierung der Spindelaktivität, die unter GSM-Exposition eine signifikante Veränderung erkennen ließen, fallen 50% (12) in die Kategorie „mögliche“ Spindeln und nur fünf in die Kategorie „sichere“ Spindeln. Knapp 80% (19) der signifikanten Parameter betrafen NREM2 Spindeln. Nur zwei der Variablen zur Charakterisierung der im Tiefschlaf auftretenden Spindeln waren signifikant und drei Variablen, die sich auf den NREM Schlaf insgesamt beziehen. Während Variablen zur Beschreibung der Frequenz und des Index (je 1) sowie der Dauer und des Diskriminanzscores (je 2) nur wenig Signifikanzen aufwiesen, betrafen sechs der 24 signifikanten Variablen die Amplitude und 10 die Anzahl der Spindeln. Schnelle Spindeln sowie die nicht nach der

Frequenz differenzierten Spindeln waren mit je acht gleich häufig unter den signifikanten Variablen vertreten, für langsame Spindeln gab es neun signifikante Ergebnisse. Im Hinblick auf die Verteilung der signifikanten Variablen nach ihrem Auftreten im Verlauf der Nacht lässt sich festhalten, dass 41,7% (10) dem dritten Viertel der Nacht zuzuordnen sind, 25,0% (6) dem ersten Viertel, 20,8% (5), 8,3% (2) dem zweiten Viertel der Nacht und 4,2% (1) der gesamten Nacht. Alle Variablen, die im ersten und letzten Viertel der Nacht signifikant sind, weisen konsistent eine Erhöhung unter GSM-Exposition auf, während die Parameter des zweiten und dritten Nachtviertels (mit zwei Ausnahmen) eine Reduktion unter GSM-Exposition aufweisen.

Die 11 Variablen zur Charakterisierung der Spindelaktivität, die unter UMTS-Exposition eine signifikante Veränderung erkennen ließen, beschreiben zu annähernd gleichen Anteilen mögliche (3), wahrscheinliche (3) und sichere Spindeln (5). Eine ähnlich homogene Verteilung findet sich hinsichtlich des Stadiums des Auftretens der Spindeln (NREM2-Schlaf: 3, Tiefschlaf: 3 sowie gesamter NREM-Schlaf: 5). Während Variablen zur Beschreibung der Amplitude (1), des Diskriminanzscores (2) und der Anzahl (2) wenig Signifikanzen aufwiesen, betrafen sechs der unter UMTS-Exposition 11 signifikanten Variablen die Frequenz. Eine bevorzugte Betroffenheit langsamer (6) bzw. schneller (4) Spindeln ließ sich nicht erkennen. Anders als bei GSM-Exposition waren jedoch alle 11 signifikanten Variablen dem ersten (6) bzw. zweiten Nachtviertel (5) zuzuordnen. Im ersten Nachtviertel weisen sowohl die möglichen als auch die langsamen wie auch die sicheren Spindeln im NREM2 und im Tiefschlaf eine signifikante Reduktion unter UMTS-Exposition auf. Die Spindelvariablen, die im zweiten Nachtviertel eine signifikante Veränderung unter Exposition erkennen lassen, zeigen ebenfalls eine Abnahme unter der Expositionsbedingung.

Diskussion

Schlafspindeln (oder kurz Spindeln) sind Sequenzen sinusoidaler Wellen mit einer Frequenz von 12-14 Hz (Sigma Frequenz; Terzano et al. 1997, Rechtschaffen and Kales 1968, Rodenbeck et al. 2006). Sie sind thalamocorticalen Ursprungs (Steriade et al. 1987, 2005) und am besten im Stadium 2 des NREM Schlafes in der zentralen Vertexregion sichtbar (McCormick et al. 1997). Spindeln haben eine Dauer von mindestens 0.5 sec, Amplitude, Frequenz und Dichte variieren mit dem Alter (Rodenbeck et al. 2006). Es werden zwei Typen von Spindeln unterschieden, die sich hinsichtlich Frequenz und topographischer Verteilung unterscheiden (Kubicki und Herrmann 1996). Mittels Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography (LORETA) konnten Anderer et al. (2001) nachweisen, dass langsame (< 13 Hz) Spindeln im präfrontalen Cortex generiert werden während der Precuneus als Quelle schneller (> 13 Hz) Spindeln lokalisiert werden konnte.

Die Funktion der Schlafspindeln ist nach wie vor unklar. Sie werden zum einen im Zusammenhang mit der Hemmung von Arousals im Schlaf und zur Aufrechterhaltung der Schlafkontinuität diskutiert (Yamadori 1971) sowie andererseits im Zusammenhang mit der Gedächtniskonsolidierung während des Schlafes (Gais et al. 2002, Schabus et al. 2004, 2006). Von Bonnet und Moore (1982) wurde ein enger Zusammenhang zwischen dem ersten Auftreten von Spindeln in der Nacht und der subjektiven

Schlafwahrnehmung sowie der Anstieg der akustischen Wahrnehmungsschwelle eine Minute nach dem Auftreten der ersten Spindel beschrieben.

Die Dichte von Schlafspindeln ist bei einigen Erkrankungen modifiziert, so ist sie bei Patienten mit Parkinson Erkrankung, bei Alzheimer Patienten und bei Patienten mit Asperger Syndrom reduziert während sie bei Patienten mit Chorea Huntington oder Gilles de la Tourette Syndrome erhöht ist (Terzano et al. 1997, Limoges et al. 2005). Eine selektive Unterdrückung des Tiefschlafes kann ebenfalls zu einer Reduktion von Schlafspindeln im ersten Schlafzyklus der Erholungsnacht im Vergleich zur Baselinenacht führen (De Gennaro et al. 2000). Die Auswirkung von Hypnotika (Benzodiazepinen und Non-Benzodiazepinen) auf die Spindelaktivität ist sowohl bei Gesunden als auch bei Patienten mit Insomnie gut dokumentiert (Jobert et al. 1992a, 1992b, Aeschbach et al. 1994, Parrino and Terzano 1996, Brunner et al. 1991, Blois et al. 1993).

Wie den in Kapitel C-6 beschriebenen Ergebnissen zu entnehmen ist, lassen sich einige statistisch signifikante Veränderungen in Spindelparametern unter GSM- bzw. UMTS-Exposition beobachten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass jedoch keine systematischen Veränderungen in der Anzahl, der Dauer, der Dichte und der Amplitude in Parametern, welche die Spindelaktivität im gesamten NREM-Schlaf, im NREM2-Schlaf und im Tiefschlaf charakterisieren zu beobachten sind. Obwohl sowohl unter GSM- als auch unter UMTS-Exposition einzelne Variablen statistisch signifikante Unterschiede im Vergleich zu SHAM-Exposition erkennen lassen, liegt deren Anzahl deutlich unter der, die zufallsbedingt zu erwarten ist. Bei 810 pro Exposition durchgeführten Tests sind bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0.05$ 40,5 Ergebnisse rein zufällig als statistisch signifikant zu erwarten.

D Ergebnisse zum Tag

In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse zu den Testungen, die am Tag durchgeführt wurden, dargestellt. Bei Experimenten, in denen sowohl EEG-Parameter als auch Leistungsparameter erhoben worden sind, sind diese jeweils getrennt beschrieben.

D 1 Ergebnisse der psychophysiologischen Experimente im Laufe der Studie

D 1.1 Ergebnisse zum Ruhe-EEG

Aufgrund der Vielzahl der analysierten Variablen (100 für jede der insgesamt 19 Lokalisationen und das jeweils für drei Expositionsbedingungen mal zwei Tageszeiten), wird an dieser Stelle auf eine Darstellung und Diskussion der Ergebnisse zum Einfluss von Exposition und Tageszeit unter univariatem Aspekt verzichtet. Auf eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Datenanalyse mit einem allgemeinen linearen Modell wird aus Platzgründen ebenfalls verzichtet. Da die doppelblinden Studien, die einen Effekt auf das Wach-EEG berichtet haben, diesen alle im Alpha-Frequenzbereich gefunden haben (Curcio et al. 2005; Croft et al. 2007; Krause et al. 2007; Regel et al. 2007; Vecchio et al. 2007), werden im Folgenden nur die Ergebnisse für diesen Frequenzbereich (alpha: 8-12.5 Hz) berichtet. Die statistisch signifikanten Effekte von Exposition und Zeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung des jeweils anderen Faktors sind in Abb. 47 für die GSM-Exposition und in Abb. 48 für die UMTS-Exposition grafisch zusammengestellt.

Es fanden sich unter GSM 10 signifikante Ergebnisse für den Faktor „Exposition“ und 79 signifikante Ergebnisse für den Faktor „Tageszeit“ bei insgesamt 361 durchgeführten Tests. Die Hälfte der signifikanten Ergebnisse für den Expositionsfaktor trat im Frequenzbereich von 10.0 Hz und 10.25 Hz auf und war über die gesamte Oberfläche verteilt (Fz, C4, T4, T5). Im Frequenzbereich von 8.50 Hz bis 9.25 Hz konzentrierten sich die restlichen signifikanten Expositionseffekte beidseitig auf der Mittellinie (T3, C4). Die Power im Alphaband war bei allen signifikanten Ereignissen unter Exposition mit GSM höher als unter Scheinbedingung. Aufgrund der hohen Anzahl der durchgeführten Tests wäre aber allein für 18 Tests ein zufällig signifikantes Ergebnis zu erwarten.

Eine wesentlich höhere Anzahl von signifikanten Effekten betraf den Faktor Tageszeit. Neben vereinzelt Signifikanzen im Frequenzbereich von 8.00 Hz bis 8.75 Hz, konnte eine Zunahme der Anzahl der signifikanten Ergebnisse von 9.75 Hz bis zu einem Maximum bei 10.25 Hz und anschließender Abnahme der Anzahl der Signifikanzen bis einschließlich 11.00 Hz beobachtet werden. Ab 11.75 Hz waren nur mehr einzelne signifikante Ereignisse rechts frontopolar und frontotemporal zu finden. Sämtliche signifikanten Ergebnisse zeigten eine höhere Power im Alphafrequenzband am Nachmittag im Vergleich zum Vormittag.

Unter UMTS war die Anzahl der signifikanten Ereignisse des Faktors „Exposition“ um die Hälfte geringer (5), und es zeigten sich auch weniger Signifikanzen für den Faktor „Tageszeit“ (59). Vier der fünf signifikanten Ergebnisse des Expositionseffekts wurden zwischen 8.00 Hz und 8.25 Hz gefunden. Es zeigten sich keine signifikanten Expositionseffekte zwischen 8.50 Hz bis 11.75 Hz, sowie von 12.25 Hz bis 12.50 Hz. Lediglich bei 12.00 Hz fand sich noch ein knapp signifikanter Expositionseffekt bei O2, der als einziger eine Abnahme der Power unter UMTS repräsentierte.

Der Effekt der Tageszeit wurde unter UMTS erst ab 10.25 Hz richtig deutlich, mit einem Maximum an signifikanten Ergebnissen (14) bei 10.50 Hz, mit einer leichten Abnahme bis 11.00 Hz und einem Fehlen jeglicher signifikanter Ereignisse bei 11.25 Hz. Zwischen 11.50 und 12.50 Hz zeigten sich noch 9 signifikante Werte an denselben 3 Elektrodenpositionen (rechts frontopolar und frontotemporal) wie in der GSM-Bedingung beschrieben, sowie eine zusätzliche Signifikanz unter O1.

Da nach Herrmann und Schärer (1987) eine Zunahme der Alpha-Power nicht linear mit einer Abnahme der Vigilanz einhergeht, sondern einer umgekehrten U-Funktion folgt, kann das hier gefundene Ergebnis nicht eindeutig interpretiert werden. Es könnte sich nach dem Vigilanzmodell von Herrmann und Schärer (1987) bei der Zunahme der Alpha-Power vom Vormittag zum Nachmittag um einen Übergang von Stufe 1 „angespannte Wachheit“ (geringe Alpha-Power) zu Stufe 2 „wachsamer Aufmerksamkeit“ (Anstieg der Alpha-Power) oder zu Stufe 3 „entspannte Wachheit“ („Höhepunkt“ der Alpha-Power) handeln. Eine Abnahme wäre nach diesem Modell gleich bedeutend gewesen mit „beginnender Müdigkeit“ (Stufe 4), bei noch geringerer Power mit „mittelgradiger Müdigkeit“ (Stufe 5) und zuletzt mit „starker Müdigkeit“ (Stufe 5). Eine bessere Testleistung in einigen der nachfolgend beschriebenen Tests und auch eine größere Wachheit, die in anderen physiologischen Maßen gefunden wurde, sprechen für diese Einschätzung.

Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum spontanen Wach-EEG wurden bis 2004 bis auf eine Ausnahme (Gehlen et al., 1996) mit einfach-blinden Designs durchgeführt (vgl. Kap. A 4.1). In den letzten Jahren hat sich das Design diesbezüglich zwar verbessert, die Anzahl der Probanden ist aber bei den neueren Studien (vgl. Kap. A-0 1.1) teilweise sehr gering (z.B. 10 Probanden bei Vecchio et al., 2007). Die Vergleichbarkeit der Studien wird erschwert durch die sehr große Bandbreite der verwendeten Expositionsbedingungen (u.a. Art und Dauer des Signals, SAR-Werte und SAR-Verteilungen) und der äußerst unterschiedlichen Techniken zur EEG-Ableitung und Analyse. Fasst man alle Studien dennoch zusammen, findet die Mehrheit keine Effekte von elektromagnetischen Feldern mobilfunkähnlicher Signale auf das spontane Wach-EEG.

Falls Effekte in doppelblinden Studien auftraten, betrafen diese überwiegend den Alpha-Frequenzbereich: In zwei italienischen Studien (Curcio et al., 2005; Vecchio et al., 2007), die jeweils mit Beteiligung von Giuseppe Curcio und einem sehr ähnlichen Design durchgeführt wurden, kam es während und nach einer 45 Minuten dauernden Exposition mit einem 902.4 MHz (217 Hz gepulst) zu einer Zunahme der Synchronisation temporal im Alpha-2 (8-10Hz) und zu einer Abnahme im Alpha-3

Abb. 47 Signifikanzen im Alpha-Frequenzbereich (0.25 Hz Schritte) für 19 Elektrodenpositionen unter Exposition mit GSM (Expositionseffekte rot, Tageszeiteffekte blau; ○ 0.05; ◐ 0.01; ○ 0.001)

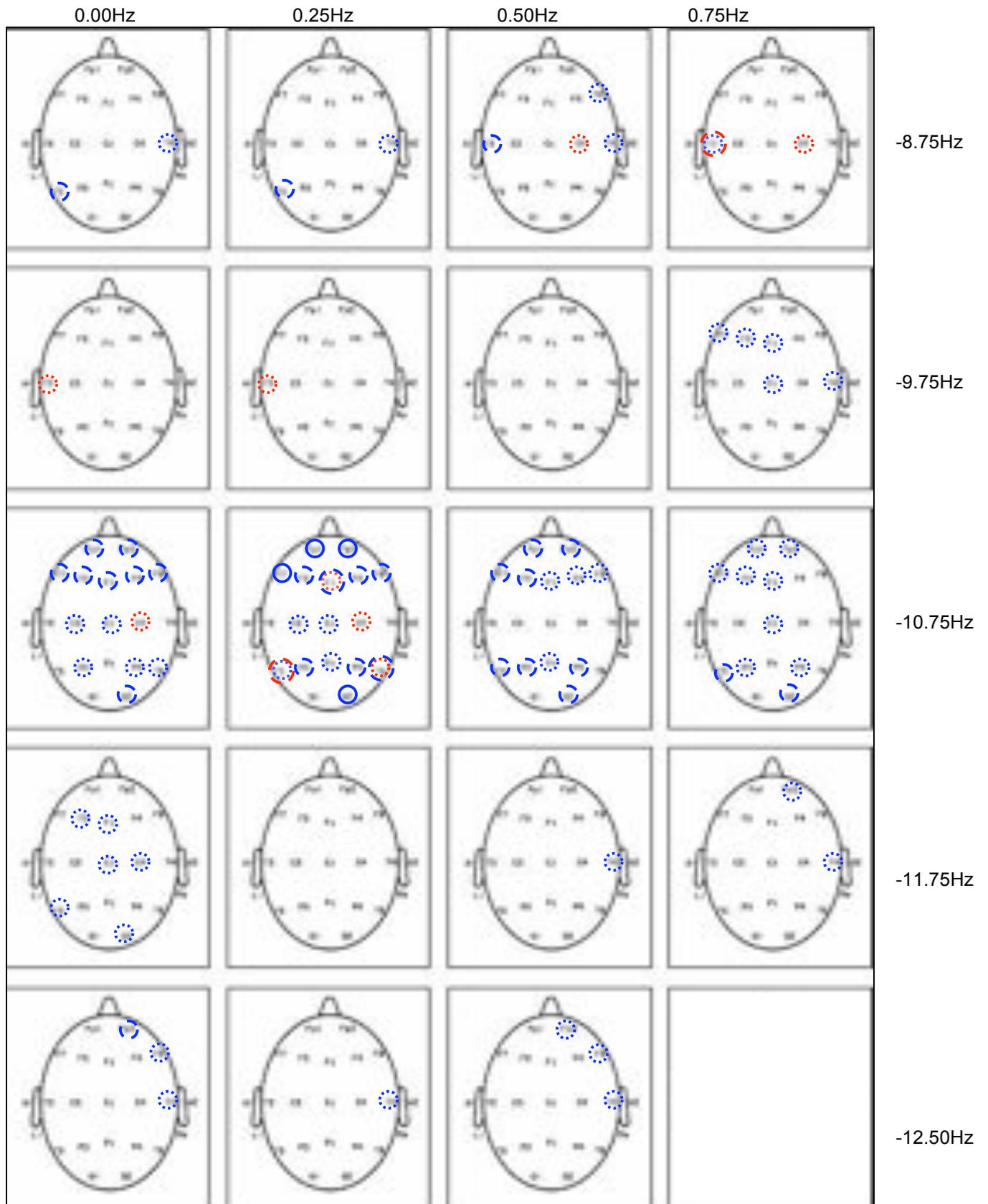
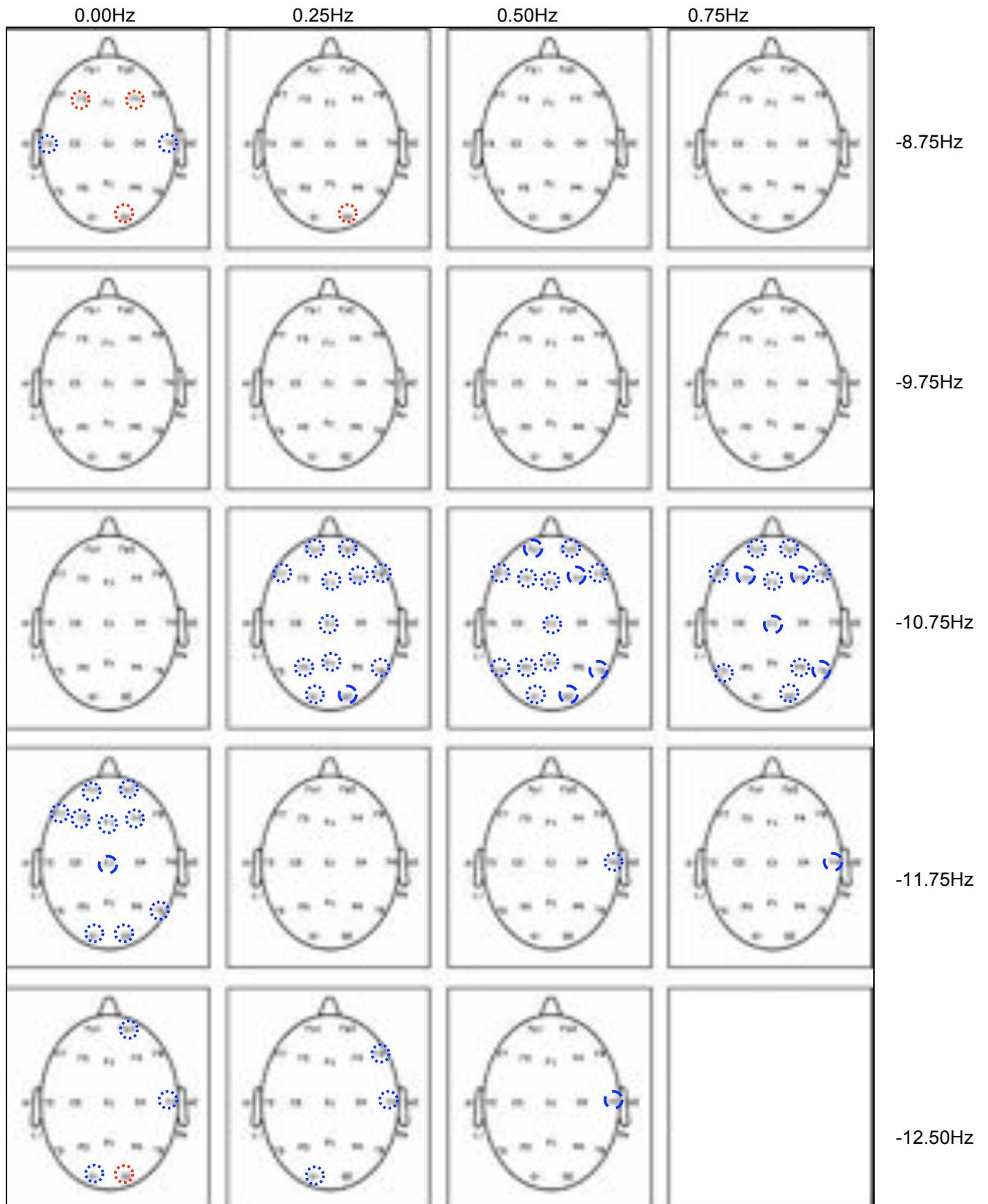


Abb. 48 Signifikanzen im Alpha-Frequenzbereich (0.25 Hz Schritte) für 19 Elektrodenpositionen unter Exposition mit UMTS (Expositionseffekte rot, Tageszeiteffekte blau; \odot 0.05; \ominus 0.01; \circ 0.001)



(10-12Hz) Frequenzbereich (Vecchio et al., 2007) bzw. zu einer Zunahme der Power im Alphafrequenzbereich von 9-10Hz bei Cz (Curcio et al., 2005). In der Studie von Croft et al. (2007), die sich am Design von Curcio et al. (2005) orientierte, nahm die Power im Alphafrequenzband während der 30 Minuten dauernden GSM-Exposition im Vergleich zur Scheinbedingung ebenso zu. Dieser Effekt war ipsilateral über posteriore Regionen am größten. Die 120 gesunden Probanden wurden im Abstand von einer Woche zweimal untersucht, zum Tageszeitpunkt der Testungen und zur Vigilanzkontrolle während der Ableitung wurden keine Angaben gemacht.

Regel et al. (2007) untersuchten 24 männliche Probanden unter 3 verschiedenen Expositionsbedingungen (GSM 900 MHz, entweder als kontinuierliches Signal oder moduliert mit 2, 8, 217, 1733 MHz und Scheinexposition). Das Wach-EEG (C3-A2) wurde direkt nach einer 30 Minuten dauernden linksseitigen Exposition, sowie 30 und 60 Minuten nach Ende der Exposition jeweils für 3 Minuten mit offenen und 3 Minuten mit geschlossenen Augen abgeleitet. Die Power im Alpha-Band zwischen 10.5-11.0 Hz nahm 30 Minuten nach pulsmodulierter Exposition in der 3-Minuten Ableitung bei geschlossenen Augen zu. Bei offenen Augen wirkte sich die Art der Exposition nicht aus.

Krause et al. (2007) fanden nur moderate Effekte im Alpha-Frequenzbereich (ca. 8-12 Hz), die jedoch unsystematisch und im Vergleich zu früheren Ergebnissen inkonsistent waren. Negative Befunde aus Doppelblindstudien stammen von Gehlen et al. (1996) an 52 Probanden mit einem 914.2 MHz (217Hz) Signal und von Hinrichs und Heinze (2006) an 27 Probanden mit einem 1800 MHz Feldtyp und unterschiedlichen Modulationen.

Krause et al. (2007) interpretierten ihre Ergebnisse dahingehend, dass elektromagnetische Felder nur sehr subtile Effekte auf das Gehirn ausüben, die auch durch andere Faktoren wie z.B. Aufmerksamkeit und natürliche Fluktuationen im EEG hervorgerufen werden können. Dem ist aufgrund unserer Ergebnisse hinzuzufügen, dass sowohl ein fixer Tagestestzeitpunkt als auch ein standardisierter Tagesablauf zur Kontrolle der zuvor genannten Einflussfaktoren unabdingbar für eine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse ist. Zum geregelten Tagesablauf gehören neben exakten Testzeitpunkten, die für alle Probanden gleichermaßen eingehalten werden müssen, auch eine Standardisierung der vorhergehenden Aktivitäten und der Ernährung, so wie es in dieser Studie auch durchgeführt wurde.

Eine aktuelle wissenschaftliche Diskussion, die im Rahmen eines Workshops der FGF zum Thema „Sleep Disorders, EEG-Changes, Altered Cognitive Functions – Is There a Connection With the Exposure to Mobile Communication RF Fields?“ vom 5. bis 9. November 2007 in Stuttgart geführt wurde, kam zu dem Schluss, dass das Wach-EEG noch am besten geeignet sei, Effekte elektromagnetischer Strahlung abzubilden. Gleichzeitig wurde aber auch kritisch angemerkt, dass die Ergebnisse hiezu teilweise sehr widersprüchlich sind, und dass Effekte, wenn sie aufträten, überwiegend im Alfaband zu sehen sind. Ob die in anderen Studien gefundenen Effekte tatsächlich allein auf den Einfluss elektromagnetischer Felder zurückzuführen sind, bleibt nach den hier präsentierten Ergebnissen fraglich.

D 1.2 Ergebnisse zum Alpha-Attenuation Test (AAT)

Wie in Kap. B 5.3.2 ausgeführt, kann der Alpha Attenuation Test als Indikator zur Erfassung von Müdigkeit auf physiologischer Ebene herangezogen werden. Mit zunehmender Müdigkeit nimmt der Alpha Attenuation Coefficient (AAC) ab. Die statistische Auswertung der individuellen Differenzen der Variablen des AATs zeigte weder am Vormittag noch am Nachmittag, weder für die rechte noch für die linke Hemisphäre einen signifikanten Expositionseffekt für GSM. Unter UMTS-Exposition war die Power in der Bedingung „Augen zu“ vormittags rechtshemisphärisch signifikant höher als in der Sham-Bedingung (O2: $p = 0.0180$).

Eine nach Exposition und für die Hemisphären getrennt durchgeführte Analyse tageszeitbedingter Variationen im Alpha Attenuation Coefficient ergab, dass unter GSM-Exposition für die rechte Hemisphäre nachmittags der AAC ($p = 0.0127$) und die Power in der Bedingung „Augen zu“ ($p = 0.0056$) statistisch signifikant größer waren. In der Sham-Bedingung zeigten sich die gleichen Effekte auf derselben Seite (AAC bei O2: $p = 0.0356$; „Augen zu“ bei O2: $p = 0.0135$), sowie eine signifikante linksseitige Zunahme der Power in der Bedingung „Augen zu“ von der Vormittags- zur Nachmittagsuntersuchung („Augen zu“ bei O1: $p = 0.0233$). Unter UMTS-Exposition zeigten sich keine signifikanten Differenzen.

Der signifikante Einfluss der Tageszeit unter GSM-Exposition lässt sich auch in der Datenauswertung mittels eines linearen Modells nachweisen, d.h. auch bei Kontrolle der Exposition bleibt der Tageszeiteffekt erhalten und betrifft nun beide Elektrodenpositionen (O2 und O1) (vgl. Tab. 33).

Unter UMTS-Exposition fand sich ein Tageszeiteffekt in der Bedingung „Augen zu“ bei O2, der univariat nicht zu beobachten war. Der Effekt der UMTS-Exposition auf die Bedingung „Augen zu“ am Vormittag im univariaten Modell konnte wiederum nicht bestätigt werden. Daher dürften zuvor nicht kontrollierte Tageszeiteffekte das signifikante Ergebnis im univariaten Modell bedingt haben (vgl. Tab. 34).

Tab. 33: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von GSM-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf Alpha Attenuation Coefficient (AAC)

Parameter			Verum-Exposition		Zeit: nachmittags	
	Konstante	P	Koeffizient	p	Koeffizient	p
Augen zu (μV^2) O1	11.4576	< 0.0001	1.1491	0.3763	3.2347	0.0130
Augen auf (μV^2) O1	4.3346	<0.0001	-0.0937	0.8352	0.0817	0.8278
AAC O1	3.2365	< 0.0001	0.7151	0.2038	1.5023	0.0266
Augen zu (μV^2) O2	11.8957	<0.0001	-0.0963	0.9482	5.3144	< 0.0001
Augen auf (μV^2) O2	4.4157	< 0.0001	-0.0451	0.9231	0.4286	0.4483
AAC O2	3.3243	<0.0001	0.1815	0.7031	2.3259	0.0072

Tab. 34: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von UMTS-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf Alpha Attenuation Coefficient (AAC)

Parameter	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	Konstante	P	Koeffizient	p	Koeffizient	p
Augen zu (μV^2) O1	12.0221	<0.0001	-1.0262	0.3522	2.0406	0.1739
Augen auf (μV^2) O1	4.3171	<0.0001	0.1274	0.7507	0.1188	0.7693
AAC O1	3.6167	<0.0001	-0.2914	0.5473	0.6981	0.3862
Augen zu (μV^2) O2	12.8452	<0.0001	-0.4242	0.7739	3.4493	0.0264
Augen auf (μV^2) O2	4.4160	<0.0001	0.1955	0.6067	0.4281	0.4161
AAC O2	3.7467	<0.0001	-0.1382	0.7819	1.4961	0.1263

Zusammenfassend konnte im Alpha Attenuation Test kein Einfluss der Exposition auf den Alpha Attenuation Coefficient (AAC) und dessen Komponenten (Power in der Bedingung „Augen auf“ und „Augen zu“) gefunden werden, es traten aber deutliche Tageszeiteffekte auf. Am Nachmittag war die Power im ACC unter O2 bei beiden Expositionstypen signifikant höher als am Vormittag, unter GSM war diese Zunahme auch linksseitig zu beobachten. Ein höherer ACC am Nachmittag spricht für eine geringere Müdigkeit im Vergleich zum Vormittag. Die größere Wachheit am Nachmittag schlug sich auch- wie in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt- in anderen physiologischen Messungen und auch in einzelnen Testleistungsparametern nieder. Bisher sind keine weiteren Studien bekannt, in denen der Einfluss elektromagnetischer Felder auf die Wachheit im AAT erfasst wurde.

D 1.3 Ergebnisse zu Ereigniskorrelierten Potentialen und langsamen Hirnpotentialen

D 1.3.1 Ergebnisse zur Contingent Negative Variation (CNV)

Zunächst folgt eine Darstellung der Ergebnisse im Leistungsparameter der CNV. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse zu den EEG-Analysen beschrieben.

D 1.3.1.1 Ergebnisse zur Reaktionszeit als Leistungsparameter in der CNV

Wie in Kap. B 6.2.3.1 bereits beschrieben, liefert der Test zur Überprüfung der Contingent Negative Variation (CNV) auch einen Leistungsparameter und zwar die Reaktionszeit, ermittelt aus der Differenz zwischen dem Loslaufen und dem Anhalten des Zeigers. Weder am Vormittag noch am Nachmittag ließ sich eine Veränderung der Reaktionszeit unter GSM900-Exposition im Vergleich zur Sham-Exposition beobachten. Unter UMTS-Exposition ließ sich am Nachmittag ebenfalls kein

signifikanter Effekt der Exposition beobachten. Am Vormittag war die Reaktionszeit unter UMTS-Exposition statistisch signifikant ($p = 0.0307$) verkürzt.

Wesentlich deutlicher als Expositionseffekte waren tageszeitbedingte Unterschiede, dies gilt insbesondere für die Sham- ($p = 0.0001$) und die GSM900-Exposition ($p = 0.0133$). Unter beiden Bedingungen waren die Reaktionszeiten am Nachmittag niedriger als am Vormittag. Unter UMTS-Exposition ließ sich der gleiche Trend beobachten, ohne dass die Unterschiede jedoch statistisch signifikant wurden ($p = 0.0849$).

Bei simultaner Berücksichtigung der Exposition und der Tageszeit (siehe Ergebnisse der Analyse der Daten mit einem allgemeinen linearen Modell in Tab. 35), blieb letztlich lediglich die Tageszeit als statistisch signifikanter Einflussfaktor erhalten.

Tab. 35: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Reaktionszeit in der Contingent Negative Variation (CNV)

Parameter	Verum - Exposition		Zeit: nachmittags			
	Konstante	p	Koeffizient	p		
GSM900-Exposition						
Reaktionszeit (ms)	5.4053	< 0.0294	0.0095	0.3924	-0.0449	<0.0001
UMTS-Exposition						
Reaktionszeit (ms)	5.4012	< 0.0001	0.0089	0.3416	-0.0368	0.0004

Freude et al. (2000, 2002) präsentierten jungen Männern die gleiche Zwei-Stimulus-Aufgabe zur Erzeugung einer Contingent Negative Variation (CNV). Die Befeldung erfolgte durch ein Mobiltelefon (916,2 MHz GSM; 217 Hz; 2.8 W). Die Reaktionszeiten blieben- wie in der vorliegenden Studie- von der Art der Exposition unbeeinflusst. Der Zeitpunkt der Testung der CNV wurde bei Freude et al. (2000, 2002) nicht angegeben. Tageszeitliche Unterschiede zwischen den Bedingungen innerhalb einer Person können aber vermutlich ausgeschlossen werden, da die Durchgänge hintereinander in zwei Blöcken stattfanden. Inwieweit interindividuell dieselben tageszeitlichen Bedingungen herrschten, kann mit den vorliegenden Publikationen nicht beantwortet werden. In unserer Studie war die Reaktionszeit am Nachmittag signifikant geringer als am Vormittag, was sowohl auf den Testzeitpunkt (1. Testung ca. 12:00, 2. Testung ca.17:00) als auch auf einen Übungs- und Adaptationseffekt zurückgeführt werden kann. Die geringere Reaktionszeit unter UMTS am Vormittag konnte bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Tageszeit und Exposition nicht bestätigt werden. Die Leistungssteigerung am Nachmittag trat auch unter dem Einfluss der Scheinexposition auf.

D 1.3.1.2 Ergebnisse zum EEG-Parameter in der CNV

Die statistischen Tests zu den individuellen Unterschieden in der CNV-Amplitude unter der Expositionsbedingung im Vergleich zur Sham Bedingung auf signifikante Abweichungen der Schwankungen von Null lieferten lediglich ein signifikantes Ergebnis. Unter GSM-Exposition war die negative Amplitude nachmittags occipital rechts (O2) größer ($p = 0.0363$) als unter der Sham-Bedingung. Dies galt tendenziell auch für die linke Seite (O1), ohne dass die Differenz jedoch signifikant wurde.

Unter UMTS-Exposition lässt sich bei univariater Betrachtung an keiner der berücksichtigten Elektrodenpositionen ein signifikanter Expositionseffekt beobachten.

Unter der Sham-Bedingung - nicht jedoch unter den Verum-Expositionsbedingungen - ließen sich in der CNV-Amplitude individuelle Variationen in Abhängigkeit von der Tageszeit beobachten, und zwar an den Positionen F8, T6, O2 und O1. Am Vormittag war die negative Amplitude an allen Positionen signifikant größer (F8: $p = 0.0023$, T6: $p = 0.0073$, O1: $p = 0.0130$, O2: $p = 0.0005$) als am Nachmittag.

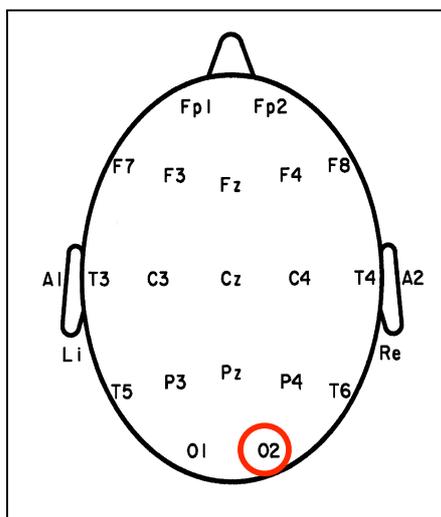


Abb. 49: Signifikante Ergebnisse bei univariater Analyse des Expositionseffekts
○ sign. GSM-Effekt

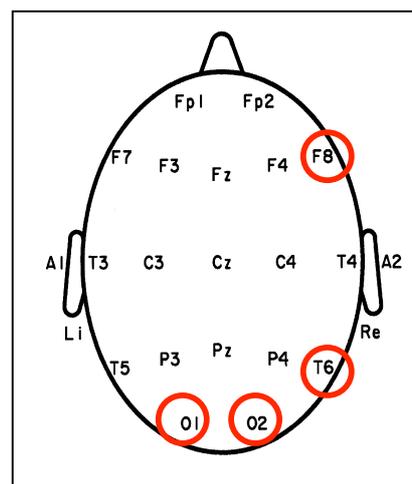


Abb. 50: Signifikante Ergebnisse bei univariater Analyse des Tageszeiteffekts
○ sign. unter Sham

Ein Ansatz, bei dem Tageszeit und Exposition simultan als Einflussgrößen in die Analyse eingingen, ergab für die GSM-Exposition abweichend von den univariaten Analysen einen signifikanten Expositionseffekt für das an P3 abgeleitete CNV-Poten

tial ($p = 0.0230$) sowie einen signifikanten ($p = 0.0258$) Tageszeiteffekt für das occipital rechts abgeleitete Potential (siehe Tab. 36). Die bei univariater Betrachtung signifikante Amplitudendifferenz unter GSM-Exposition an O2 entfällt, wenn die Tageszeit, die auch im linearen Modell einen signifikanten Einfluss widerspiegelt, kontrolliert wird.

Tab. 36: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von GSM-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Amplitude der Contingent Negative Variation (CNV)

<i>Parameter</i>	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Amplitude an F7 (μV)	0.1070	0.9402	-1.5612	0.0767	-0.2449	0.8642
Amplitude an F3 (μV)	-3.7997	0.0139	-1.1751	0.2614	0.8788	0.5582
Amplitude an Fz (μV)	-6.3711	< 0.0001	-0.6468	0.4794	0.7797	0.6244
Amplitude an F4 (μV)	-4.5171	0.0042	-1.6062	0.1586	0.6501	0.6810
Amplitude an F8 (μV)	-3.3280	0.0685	-0.8578	0.4826	1.5923	0.2579
Amplitude an T3 (μV)	-3.1631	< 0.0001	-0.8219	0.0771	-0.2555	0.6893
Amplitude an C3 (μV)	-8.4710	< 0.0001	-0.5665	0.3781	0.9778	0.2036
Amplitude an C4 (μV)	-7.3871	< 0.0001	-0.4373	0.6459	0.9534	0.3434
Amplitude an T4 (μV)	-3.2401	< 0.0001	0.0251	0.9666	0.3124	0.6932
Amplitude an T5 (μV)	-5.1189	< 0.0001	-0.1733	0.8040	0.7772	0.2694
Amplitude an P3 (μV)	-6.8484	< 0.0001	-1.1329	0.0230	0.3755	0.5243
Amplitude an Pz (μV)	-6.1473	< 0.0001	-0.9170	0.1149	1.2301	0.0605
Amplitude an P4 (μV)	-6.2489	< 0.0001	-0.3663	0.5160	0.9157	0.1851
Amplitude an T6 (μV)	-4.3500	< 0.0001	-0.1356	0.7945	0.9619	0.1060
Amplitude an O1 (μV)	-4.3758	< 0.0001	-0.7900	0.0941	0.9206	0.0843
Amplitude an O2 (μV)	-4.3379	< 0.0001	-0.4442	0.4283	1.1608	0.0258

Unter UMTS-Exposition erweist sich im linearen Modell lediglich der Tageszeiteffekt an fünf Elektrodenpositionen (Pz, P4, T6, O1 und O2) als statistisch signifikant (siehe Tab. 37). Die CNV-Amplitude ist am Nachmittag weniger stark ausgeprägt als am Vormittag. Die Tageszeiteffekte waren bei univariater Analyse der Daten nicht evident.

Tab. 37: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von UMTS-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Amplitude der Contingent Negative Variation (CNV)

<i>Parameter</i>	Verum-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Amplitude an F7 (μV)	-0.0989	0.9409	-0.1909	0.8614	0.1669	0.8465
Amplitude an F3 (μV)	-3.9932	0.0097	-0.2357	0.8559	1.2660	0.2338
Amplitude an Fz (μV)	-6.7753	< 0.0001	0.5187	0.6730	1.5882	0.1950
Amplitude an F4 (μV)	-4.7226	0.0019	-0.2240	0.8404	1.0610	0.2714
Amplitude an F8 (μV)	-3.3926	0.0507	-0.8034	0.4934	1.7214	0.0624
Amplitude an T3 (μV)	-3.3276	< 0.0001	-0.1105	0.8321	0.0735	0.8922
Amplitude an C3 (μV)	-8.3339	< 0.0001	-0.1196	0.8508	0.7036	0.1770
Amplitude an C4 (μV)	-7.4230	< 0.0001	-0.1761	0.7931	1.0252	0.1966
Amplitude an T4 (μV)	-3.3681	< 0.0001	0.5529	0.3731	0.5685	0.3367
Amplitude an T5 (μV)	-5.1288	< 0.0001	0.9327	0.1735	0.7969	0.1949
Amplitude an P3 (μV)	-6.9029	< 0.0001	-0.0091	0.9840	0.4845	0.2618
Amplitude an Pz (μV)	-6.1324	< 0.0001	-0.0222	0.9652	1.2000	0.0149
Amplitude an P4 (μV)	-6.4269	< 0.0001	0.0476	0.9164	1.2717	0.0186
Amplitude an T6 (μV)	-4.4188	< 0.0001	0.4038	0.2967	1.0995	0.0143
Amplitude an O1 (μV)	-4.5018	< 0.0001	0.4765	0.3215	1.1726	0.0015
Amplitude an O2 (μV)	-4.3497	< 0.0001	0.2720	0.5438	1.1843	0.0004

Unter Berücksichtigung von Tageszeiteffekten konnte lediglich ein signifikantes Ergebnis unter GSM bei P3 beobachtet werden, das aber aufgrund der multiplen Testungen als zufallsbedingt eingestuft werden kann. Unter der UMTS-Bedingung führte ein Effekt der Tageszeit zu einer signifikanten Amplitudenreduktion am Nachmittag an 5 überwiegend rechtsseitigen und parieto-occipitalen Positionen.

In der Studie von Freude et al. (2000) ließ sich für diese Aufgabe ebenfalls kein signifikanter Effekt von EMF appliziert durch ein Mobiltelefon (916,2 MHz GSM; 217 Hz; 2.8 W) beobachten. Die Interaktion von EMF x Region zeigte aber ausgeprägtere CNV-Amplituden während der Exposition an frontalen Elektroden. In einer weiteren Studie von Freude et al. (2002), in der 12 junge männliche Probanden einer 4-fach höheren Sendeleistung ausgesetzt wurden, waren die Amplituden unter EMF-Einfluss signifikant erhöht, dies galt für alle Hirnregionen.

D 1.3.2 Ergebnisse zum Bereitschaftspotential (BP)

Wie in Kap. B 5.3.3.2 und B 6.2.3 bereits beschrieben, ist die Amplitude des langsamen Potentials der Zielparameter der Auswertung der elektrophysiologischen Daten. Berücksichtigt wurde hier die Amplitude im Bereich von 500 ms vor Bewegungsbeginn, d.h. der Abschnitt, in dem der Anstieg steiler wird und der als Terminal Negative Slope (NS') bezeichnet wird.

Die tagesspezifischen Daten der individuellen Amplitudendifferenzen zwischen Verum- und Sham-Bedingung belegen, dass unter GSM-Exposition keine Veränderung der Terminal Negative Slope Komponente dieses langsamen Potentials zu beobachten ist. Unter UMTS-Exposition lässt sich in der Vormittagsmessung an den Elektroden T5 und O1, d.h. temporal und occipital auf der linken Kopfseite, eine signifikante Veränderung der Amplitude beobachten. Occipital erreicht der Unterschied jedoch sehr knapp die Schwelle der statistischen Signifikanz ($p = 0.0499$), an der temporalen Elektrode ist der Unterschied deutlicher ($p = 0.0058$). Unter UMTS-Exposition ist die Amplitudendifferenz positiv. Da die Terminal Negative Slope immer eine negative Amplitude hat (vgl. Abb. 35) bedeutet das, dass die Amplitude unter Sham-Exposition im Vergleich zur UMTS-Exposition größer ist, d.h. einen höheren (negativen) Wert aufweist. Dieser Effekt findet sich nur am Vormittag, nicht jedoch am Nachmittag. Anzumerken ist, dass diese Veränderungen nicht in der Gehirnregion beobachtet wurden, für die das Ausprägungsmaximum der NS' Komponente (Zentralregion) beschrieben ist.

Für die occipitale Elektrode der linken Hemisphäre lässt sich unter UMTS darüber hinaus eine statistisch signifikante ($p = 0.0319$) tageszeitbedingte Variation in der Amplitude der Terminal Negative Slope erkennen. Die Amplitude ist am Nachmittag deutlich stärker negativ als am Vormittag.

Im linearen Modell, in dem die Exposition und die Tageszeit simultan als Einflussfaktoren auf die Amplitude des Terminal Negative Slope untersucht werden, lässt sich weder unter GSM- noch unter UMTS-Exposition ein signifikanter Effekt von Tageszeit und/oder Exposition nachweisen (siehe Tab. 38 und Tab. 39). Das bedeutet, dass bei Kontrolle der Tageszeit die univariat beobachteten Effekte der von UMTS Exposition und bei Kontrolle der Exposition der univariat beobachtete Effekt der Tageszeit verschwinden.

Unter Berücksichtigung der Anzahl der durchgeführten Tests lassen diese Ergebnisse darauf schließen, dass es sich bei den univariat beobachteten signifikanten Effekten um Zufallsbefunde handelt.

Tab. 38: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von GSM-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Amplitude des Terminal Negative Slope Komponente des Bereitschaftspotentials

<i>Parameter</i>	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>P</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Amplitude an F7 (µV)	-3.2281	0.0546	-1.8628	0.1979	-0.8784	0.7012
Amplitude an F3 (µV)	-1.5621	0.2241	-0.2250	0.8829	-0.2717	0.8460
Amplitude an Fz (µV)	-1.8662	0.0677	0.1211	0.9319	0.9325	0.4512
Amplitude an F4 (µV)	-0.3833	0.7471	-0.6735	0.7184	1.4720	0.2962
Amplitude an F8 (µV)	1.6834	0.3941	-0.0573	0.9860	2.1697	0.3205
Amplitude an T3 (µV)	-1.9040	0.0537	-0.5622	0.4830	-0.1361	0.8854
Amplitude an C3 (µV)	-3.1963	0.0002	0.4865	0.5709	-0.1038	0.9107
Amplitude an C4 (µV)	-3.7771	0.2978	2.4292	0.3404	2.1978	0.3823
Amplitude an T4 (µV)	0.7677	0.2420	0.2630	0.7748	0.6476	0.4796
Amplitude an T5 (µV)	-1.2421	0.0277	1.1796	0.2842	-0.3862	0.6568
Amplitude an P3 (µV)	-1.2976	0.0928	0.0165	0.9786	-0.3961	0.6713
Amplitude an Pz (µV)	-0.9652	0.2143	0.2604	0.7428	0.5273	0.5236
Amplitude an P4 (µV)	-0.8228	0.3426	-0.3312	0.6922	1.0170	0.1788
Amplitude an T6 (µV)	-0.0668	0.9349	0.1373	0.8259	0.2916	0.7266
Amplitude an O1 (µV)	-0.9023	0.3679	0.5510	0.5241	0.0208	0.9805
Amplitude an O2 (µV)	-0.6667	0.3364	0.0333	0.9675	1.1810	0.0588

Tab. 39: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von UMTS-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Amplitude des Terminal Negative Slope Komponente des Bereitschaftspotentials

<i>Parameter</i>	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>P</i>
Amplitude an F7 (µV)	-3.7132	0.0196	-0.7532	0.7577	0.0918	0.9623
Amplitude an F3 (µV)	-2.2782	0.0595	-0.3135	0.8825	1.1605	0.4936
Amplitude an Fz (µV)	-2.3179	0.0959	1.2665	0.4610	1.8358	0.3722
Amplitude an F4 (µV)	-0.3367	0.8198	0.7725	0.6729	1.3787	0.4989

Parameter	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	Konstante	<i>p</i>	Koeffizient	<i>p</i>	Koeffizient	<i>P</i>
Amplitude an F8 (µV)	1.6351	0.4336	0.7038	0.8031	2.2663	0.1938
Amplitude an T3 (µV)	-1.7016	0.1335	0.4249	0.7359	-0.5407	0.5886
Amplitude an C3 (µV)	-3.0832	0.0068	0.3721	0.7225	-0.3301	0.7975
Amplitude an C4 (µV)	-3.8962	0.2731	2.9798	0.2194	2.4358	0.3069
Amplitude an T4 (µV)	1.1683	0.0935	0.1708	0.8370	-0.1536	0.8630
Amplitude an T5 (µV)	-1.0522	0.1357	0.9953	0.1574	-0.7662	0.3393
Amplitude an P3 (µV)	-1.2714	0.0854	0.1717	0.8750	-0.4485	0.5918
Amplitude an Pz (µV)	-0.8327	0.3754	0.0538	0.9628	0.2622	0.7831
Amplitude an P4 (µV)	-0.2125	0.8098	0.4653	0.6526	-0.2037	0.8218
Amplitude an T6 (µV)	0.3961	0.6341	-0.0757	0.9179	-0.6342	0.4313
Amplitude an O1 (µV)	-0.3465	0.7112	1.1737	0.2742	-1.0908	0.2263
Amplitude an O2 (µV)	-0.5799	0.3523	0.7746	0.3595	1.0073	0.0900

Die Ergebnisse zum Bereitschaftspotential sprechen gegen einen Einfluss der Exposition auf die Amplituden. Effekte, die lediglich an 2 (T5, O1) von 16 Elektrodenpositionen unter UMTS vormittags gefunden wurden, konnten nach Kontrolle des Einflusses der Tageszeit nicht mehr bestätigt werden. Der Tageszeitpunkt hatte in dieser Untersuchung nur unter UMTS bei O1 einen knapp signifikanten Effekt in Form einer deutlich höheren negativen Amplitude am Nachmittag, der sich im linearen Modell nicht nachweisen ließ. Zusammenfassend konnten damit weder Effekte des Tageszeitpunkts noch der Exposition auf die Amplitude im Bereitschaftspotential gefunden werden. Diese Ergebnisse stimmen mit den Arbeiten von Freude et al. (1998, 2000) überein, die ebenfalls keinen Einfluss elektromagnetischer Felder fanden:

Freude et al. (1998) untersuchten in einer einfach-blinden Studie 16 Probanden mit einer identischen Finger Tapping Aufgabe unter vergleichbarer Exposition mit einem GSM916.2 MHz Mobiltelefon, welches am linken Ohr angebracht war. Die erhobenen Parameter des Bereitschaftspotentials unterschieden sich nicht zwischen der Expositions- und der Scheinexpositionsbedingung. Auch bei Freude et al. (2000) ließen sich in der Finger Tapping Aufgabe keine signifikanten Unterschiede bei Auslösung des Bereitschaftspotentials zwischen den zwei Versuchsbedingungen erkennen.

D 1.3.3 Ergebnisse zu DC-Potential und Visueller Folgereaktion (VMT)

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Leistungsparameter beschrieben. Im Anschluss daran sind die Ergebnisse zur Amplitude des langsamen Potentials dargestellt.

D 1.3.3.1 Ergebnisse zur Winkelabweichung als Leistungsparameter in der VMT

Wie in Kap. B 5.3.3.3 und B 6.2.3.3 bereits beschrieben, lieferte auch der Test zur visuellen Folgereaktion einen Leistungsparameter. Es handelt sich um den Betrag der Winkelabweichung von der 12:00 Uhr Position beim Stoppen des Zeigers.

Es zeigt sich, dass weder vormittags noch nachmittags signifikante Unterschiede in der Winkelabweichung in Abhängigkeit von der Exposition zu beobachten sind. Dies gilt sowohl für die GSM900-Exposition als auch für die UMTS-Exposition.

Eine für die Expositionsbedingungen getrennt durchgeführte Analyse auf tageszeitbedingte Unterschiede in den Zielparametern ergab, dass die Winkelabweichung in diesem Test unter allen drei Expositionsbedingungen am Nachmittag statistisch signifikant niedriger (größere Präzision) war als am Vormittag: Sham: -0.81 ($p = 0.0038$), GSM900: -0.54 ($p = 0.0281$) und UMTS: -0.73 ($p = 0.0004$) (vgl. Abb. 51).

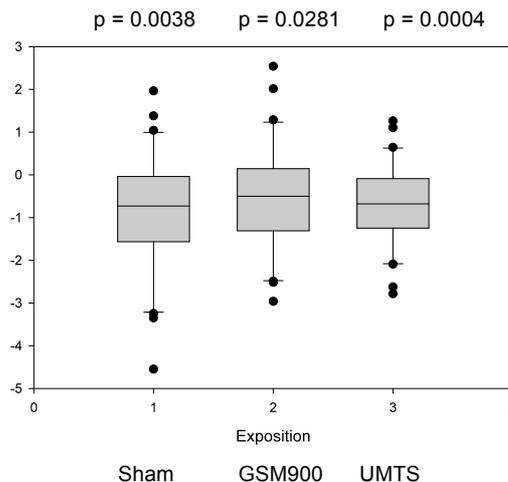


Abb. 51: Boxplot der individuellen Unterschiede in der Winkelabweichung zwischen der Vormittags- und der Nachmittagstestung. Negative Werte bedeuten kleinere Winkelabweichungen am Nachmittag.

Die Ergebnisse einer mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse des Einflusses von Exposition bei simultaner Berücksichtigung der Tageszeit sind für die GSM900- und für die UMTS-Exposition in Tab. 40 aufgelistet.

Tab. 40: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Winkelabweichung in der Visuellen Monitoring Task (VMT)

Parameter	Verum-Exposition		Zeit: nachmittags			
	Konstante	p	Koeffizient	p		
GSM900-Exposition						
Winkelabweichung (°)	2.4733	< 0.0001	0.0019	0.8706	-0.0584	0.0001
UMTS-Exposition						
Winkelabweichung (°)	2.4774	< 0.0001	0.0066	0.6780	-0.0666	< 0.0001

Die Ergebnisse zeigen, dass für beide Expositionsbedingungen ein signifikanter Tageszeiteffekt zu beobachten ist, während der Einfluss der Expositionsbedingung statistisch nicht signifikant ist.

In einer Studie von Freude et al. (1998, 2000) wurde die identische visuelle Folgereaktionsaufgabe angewendet. Auch hier zeigten sich keine Unterschiede in der Winkelabweichung zwischen den Expositionsbedingungen, wohl aber ein Einfluss des elektromagnetischen Feldes auf das Langsame Potential. Freude et al. (2002) konnten in einer weiteren Studie trotz einer vierfach höheren Sendeleistung keinen Einfluss der elektromagnetischen Exposition auf die Leistung (Verhaltensparameter) in der visuellen Folgereaktionsaufgabe feststellen.

Angaben zum Testzeitpunkt fehlen bei Freude et al. (1998, 2002). Bei Freude et al. (2000) findet sich für eine Gruppe die Angabe, dass die Testungen zwischen 9:00 und 12:00 Uhr stattfanden. In allen Studien von Freude et al. (1998, 2000, 2002) wurden die Tests aber innerhalb einer Session am selben Tag absolviert. Die bessere Leistung am Nachmittag in Form einer reduzierten Winkelabweichung in unserer Studie könnte einerseits am physiologisch betrachtet günstigeren Testzeitpunkt des Nachmittags (ca. 16:45) im Vergleich zum ersten Zeitpunkt (ca. 11:45) liegen, aber auch an einem Übungs- und Gewöhnungseffekt.

D 1.3.3.2 Ergebnisse zum EEG-Parameter (Langsame Potentiale, VMT)

Wie in Kap. B 5.3.3.3 und B 6.2.3 bereits beschrieben, ist die Amplitude des langsamen Potentials der Zielparame- ter der Auswertung der elektrophysiologischen Daten. Die tagesspezifischen Daten der individuellen Amplitudendifferenzen zwischen Verum- und Sham-Bedingung belegen, dass weder unter GSM- noch unter UMTS-Exposition eine signifikante Veränderung der Amplitude zu beobachten ist.

Eine Analyse tageszeitbedingter Variationen in der Amplitude des langsamen Potentials ergab lediglich für die Position T3, d.h. die Temporalregion der linken Hemisphäre, einen signifikanten Unterschied unter Sham-Exposition. Am Nachmittag war die negative Amplitude statistisch signifikant größer als am Vormittag ($p = 0.0258$). Angesichts der Vielzahl der durchgeführten Tests (je 16 pro

Expositionsbedingung) sowie der Tatsache, dass der Effekt bei Kontrolle der Exposition nicht mehr statistisch signifikant ist, sollte dieses Ergebnis jedoch als Zufallsbefund gewertet werden.

Eine Auswertung der Daten mit einem linearen Modell sowohl unter GSM- als auch unter UMTS-Exposition ließen weder einen signifikanten Expositions- noch einen signifikanten Tageszeiteffekt erkennen (siehe Tab. 41 und Tab. 42). Dies gilt für alle untersuchten Elektrodenpositionen.

Tab. 41: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von GSM-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Amplitude des langsamen Potentials während der VMT

<i>Parameter</i>	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>P</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Amplitude an F7 (µV)	-2.3718	0.0207	0.3166	0.7346	-0.5218	0.5255
Amplitude an F3 (µV)	-5.5417	< 0.0001	0.3856	0.6603	-0.1045	0.8988
Amplitude an Fz (µV)	-7.9245	< 0.0001	0.6944	0.2958	-1.0842	0.1095
Amplitude an F4 (µV)	-5.2500	< 0.0001	0.8466	0.2397	-0.7143	0.3155
Amplitude an F8 (µV)	-0.3242	0.7700	1.6804	0.0685	-0.4985	0.5542
Amplitude an T3 (µV)	-4.1251	< 0.0001	0.1353	0.8502	-1.1027	0.0554
Amplitude an C3 (µV)	-11.0405	< 0.0001	0.0663	0.9003	-0.7038	0.1500
Amplitude an C4 (µV)	-8.2796	< 0.0001	-0.1326	0.8434	-0.6441	0.2833
Amplitude an T4 (µV)	-2.6179	0.0001	0.2320	0.6334	0.2951	0.6192
Amplitude an T5 (µV)	-5.0328	< 0.0001	-0.4671	0.2485	-0.1202	0.7862
Amplitude an P3 (µV)	-8.6612	< 0.0001	-0.3859	0.4548	-0.2124	0.6565
Amplitude an Pz (µV)	-6.2763	< 0.0001	-0.0424	0.9429	-0.1463	0.7278
Amplitude an P4 (µV)	-6.2200	< 0.0001	0.1758	0.7961	0.0640	0.8753
Amplitude an T6 (µV)	-3.5302	< 0.0001	-0.0764	0.8860	-0.1010	0.8137
Amplitude an O1 (µV)	-3.7707	< 0.0001	-0.1885	0.7120	0.2561	0.4977
Amplitude an O2 (µV)	-3.3927	< 0.0001	-0,2541	0.6742	0.6629	0.1669

Tab. 42: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von UMTS-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Amplitude des langsamen Potentials während der VMT

<i>Parameter</i>	Verum-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Amplitude an F7 (μV)	-2.3239	0.0153	-0.0024	0.9967	-0.6177	0.4669
Amplitude an F3 (μV)	-5.5275	< 0.0001	-0.1829	0.7520	-0.1330	0.8849
Amplitude an Fz (μV)	-8.0639	< 0.0001	-0.4248	0.4052	-0.8055	0.3214
Amplitude an F4 (μV)	-5.3252	< 0.0001	-0.55379	0.3756	-0.5638	0.4797
Amplitude an F8 (μV)	-0.4269	0.6899	0.7016	0.4096	-0.2931	0.7412
Amplitude an T3 (μV)	-4.1696	< 0.0001	-0.6097	0.2258	-1.0137	0.0609
Amplitude an C3 (μV)	-11.1902	< 0.0001	-0.7890	0.1749	-0.4043	0.5803
Amplitude an C4 (μV)	-8.3942	< 0.0001	-0.1934	0.7197	0.4149	0.5302
Amplitude an T4 (μV)	-2.5917	< 0.0001	0.2337	0.5975	0.2427	0.6446
Amplitude an T5 (μV)	-5.1219	< 0.0001	-0.6739	0.0782	0.0581	0.8817
Amplitude an P3 (μV)	-8.7928	< 0.0001	-0.3291	0.4370	0.0509	0.9279
Amplitude an Pz (μV)	-6.5070	< 0.0001	-0.5628	0.2098	0.3150	0.5672
Amplitude an P4 (μV)	-6.3794	< 0.0001	-0.1249	0.7963	0.3827	0.4935
Amplitude an T6 (μV)	-3.6970	< 0.0001	-0.2500	0.5662	0.2327	0.5778
Amplitude an O1 (μV)	-3.8400	< 0.0001	-0.1087	0.7718	0.3946	0.4620
Amplitude an O2 (μV)	-3.5033	< 0.0001	-0.3819	0.4521	0.8841	0.0897

Insgesamt zeigte sich in der Analyse der Amplituden der langsamen Potentiale, die während der Bearbeitung der Visuellen Folgereaktion abgeleitet wurden, weder ein Effekt der Exposition noch der Tageszeit in den Verum-Bedingungen. Die Tageszeit schlug sich nur in einer einzigen Elektrodenposition (T3) in der Scheinbedingung und in den Leistungsparametern (Winkelabweichung, vgl. D 1.3.3.1) in Form einer Abnahme der Reaktionszeiten nieder (vgl. D 1.3.3.1).

Im Gegensatz dazu fanden Freude et al. (1998, 2000, 2002) in ihren Studien zum Einfluss von EMF auf die langsamen Potentiale während der visuellen Folgereaktion eine Abnahme der Amplituden. In der Studie von Freude et al. (1998) konnten die deutlichsten Effekte rechts central/temporo-parieto-occipital registriert werden. Eine höhere Sendeleistung (Freude et al. 2002) führte dazu, dass sich die Effekte auf weitere Ableitpunkten ausweiteten. Es wurden im Gegensatz zu den hier präsentierten Ergebnissen neben einer doppelseitigen Exposition in der Studie von Freude et al. (2002) lediglich

Daten von 12 Probanden erhoben. Auch in den früheren Studien war die Anzahl der Probanden mit 19 (Freude et al. 2000) und 20 (Freude et al. 1998) um ein Drittel geringer als in unserer Studie.

D 1.4 Ergebnisse zu den evozierten Potentialen

D 1.4.1 Ergebnisse zu den Akustisch Evozierten Potentialen (AEP)- Wahlreaktion auf Töne

Es folgt zuerst eine Darstellung der Leistungsparameter, die während der Akustisch Evozierten Potentiale erhoben wurden.

In dieser Aufgabe wurden als Zielparameter die Schnelligkeit und die Genauigkeit der Bearbeitung erfasst. Insgesamt wurden vier Parameter zur Beschreibung der Testleistung erhoben: die mittlere Reaktionszeit (MWRT), die Standardabweichung der Reaktionszeit (SDRT), die Anzahl der insgesamt fehlerhaften Zyklen (N_ZYK_FEHL) und die Anzahl der falschen Reaktionen, d.h. Reaktionen mit der falschen Hand (FALSCH).

Es gab weder am Vormittag noch am Nachmittag expositionsbedingte Abweichungen in den Leistungsparametern von den entsprechenden unter Scheinexposition erzielten Ergebnissen. Dies gilt für GSM900- und UMTS-Exposition gleichermaßen.

Während eine Exposition mit elektromagnetischen Feldern keinen Effekt zeigte, ließen sich deutliche tageszeitbedingte Unterschiede in den mittleren Reaktionszeiten beobachten. Für alle drei Expositionsbedingungen war die mittlere Reaktionszeit am Nachmittag signifikant kürzer als am Vormittag (GSM900: $p = 0.0010$; UMTS: $p = 0.0084$; Sham: $p < 0.0001$). Unter UMTS-Exposition war darüber hinaus am Nachmittag eine geringere Variation in den Reaktionszeiten im Vergleich zum Vormittag zu beobachten, was sich in einer statistisch signifikant ($p = 0.0036$) niedrigeren Standardabweichung der Reaktionszeit niederschlägt. Allerdings ist die geringere Reaktionszeit am Nachmittag unter UMTS-Exposition mit einer höheren Zahl von Zyklen mit fehlerhaften Reaktionen verbunden ($p = 0.0290$).

Die Ergebnisse der expositions- und tageszeitspezifisch durchgeführten Analysen spiegeln sich in den Ergebnissen der mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse wider. Letztere sind für die GSM-Exposition in Tab. 43 und für die UMTS-Exposition in Tab. 44 aufgelistet.

Tab. 43: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter der Wahlreaktion auf Töne

<i>Parameter</i>	GSM900-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Mittelwert d. Reaktionszeit (ms)	-0.9968	< 0.0001	0.0002	0.9849	-0.0452	< 0.0001
SD der Reaktionszeit (ms)	-2.4777	< 0.0001	0.0037	0.8923	-0.0448	0.1199
Anzahl von Zyklen mit Fehlern	1.5835	< 0.0001	0.0277	0.6158	0.0678	0.0954
Anzahl falscher Reaktionen	1.5082	< 0.0001	0.0141	0.7822	0.0670	0.1288

Tab. 44: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter der Wahlreaktion auf Töne

<i>Parameter</i>	UMTS-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Mittelwert d. Reaktionszeit (ms)	-0.9993	< 0.0001	0.0003	0.9681	-0.0403	< 0.0001
SD der Reaktionszeit (ms)	-2.4635	< 0.0001	0.0172	0.5093	-0.0728	0.0016
Anzahl von Zyklen mit Fehlern	1.5767	< 0.0001	-0.0047	0.9156	0.0819	0.0266
Anzahl falscher Reaktionen	1.5126	< 0.0001	0.0051	0.9108	0.0580	0.1083

Erneut zeigt sich ein deutlicher Effekt der Tageszeit auf die Leistung. Sowohl der Mittelwert der Reaktionszeit als auch die Streuung waren nachmittags unabhängig von der Exposition geringer, d.h. es kam in der zweiten Testung zu einer signifikanten Verbesserung. Die Leistungen wurden durch die Exposition mit GSM900 und UMTS nicht beeinflusst.

Ebenfalls keinen Einfluss elektromagnetischer Felder auf die Reaktionszeiten in einem akustischen Wahlreaktionstest fanden Krafczyk et al. (1998). Die Probanden mussten zur Registrierung der Reaktionszeiten die Präsentation eines bestimmten Tonreizes bei der Ableitung der ereigniskorrelierten Potentiale mit einem Tastendruck quittieren. Die Reaktionszeiten zeigten keine Veränderungen durch Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern, wie sie bei Benutzung handelsüblicher Mobiltelefone des D-Netzes (Frequenz 902.4 MHz) entstehen.

In einer Studie von Preece et al. (1999) fand sich unter Exposition mit einem simulierten GSM-Signal (915 MHz, mit und ohne Modulation mit 217 Hz) im visuellen Wahlreaktionstest ein signifikanter Anstieg der Bearbeitungsgeschwindigkeit, der sich in einer Abnahme der Reaktionszeit äußerte. Dieser Anstieg zeigte sich stärker unter analoger als digitaler Simulation. Der Test unterschied sich allerdings wesentlich von dem in dieser Studie verwendeten, da Entscheidungen in Bezug auf *visuell*

dargebotene Worte verlangt waren. Auch in den Untersuchungen von Keetley et al. (2006) nahm im visuellen Wahlreaktionszeittest der Median der Reaktionszeit unter Befeldung signifikant ab. Über den zeitlichen Ablauf der Experimente ist nur bekannt, dass die Probanden in einem cross-over Design im Abstand von ca. einer Woche für jeweils 60 Minuten untersucht wurden, es finden sich allerdings keine Angaben zum Tageszeitpunkt der Testungen. Damit kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese einen Einfluss auf das Ergebnis hatten. Außerdem wurden keine Korrekturen für multiples Testen angewendet, obwohl Keetley acht verschiedene Leistungstests mit 18 Variablen untersucht hatten. Unter Verwendung derselben visuellen Wahlreaktionsaufgabe fanden Regel et al. (2006, 2007) nach einer Korrektur für multiples Testen keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit im Wahlreaktionszeittest und im Einfachwahlreaktionszeittest.

D 1.4.2 Ergebnisse zu den akustisch evozierten Potentialen (AEP) – Oddball Paradigma

Zuerst folgt die Darstellung der Ergebnisse der Leistungsparameter im Oddball-Paradigma und im Anschluss die Ergebnisse aus der EEG-Analyse.

D 1.4.2.1 Ergebnisse zu den Leistungsparametern der AEP– Oddball Paradigma

Als Leistungsparameter für den in Kap. B 5.3.4.2 und B 6.2.4.2 beschriebenen Test werden die mittlere Reaktionszeit auf seltene Töne und die Anzahl der fehlerhaften Reaktionen herangezogen.

Es lassen sich weder für die Ergebnisse der Vormittagstestung noch für die der Nachmittagstestung signifikante Veränderungen unter Exposition erkennen. Dies gilt sowohl für GSM-Exposition als auch für UMTS-Exposition. Darüber hinaus lassen sich für beide Leistungsparameter aus diesem Test keine tageszeitbedingten Unterschiede beobachten. Dies gilt für alle drei Expositionsbedingungen.

Die Ergebnisse der univariaten Analyse werden durch die Ergebnisse des allgemeinen linearen Modells, in dem die Exposition und die Tageszeit simultan berücksichtigt werden, mit einer Ausnahme bestätigt (vgl. Tab. 45 für die GSM-Exposition und Tab. 46 für die UMTS-Exposition). In diesem Modell wird der Effekt der GSM900-Exposition auf die mittlere Reaktionszeit bei simultaner Berücksichtigung der Tageszeit statistisch signifikant ($p = 0.0304$). Unter Exposition ist die Reaktionszeit kürzer.

Tab. 45: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Oddball Paradigma

Parameter	GSM900-Exposition Zeit: nachmittags					
	Konstante	p	Koeffizient	p	Koeffizient	p
Mittelwert d. Reaktionszeit (ms)	6.0117	< 0.0001	-0.0195	0.0304	0.0223	0.0782
Anzahl der Fehler	1.3663	< 0.0001	0.0959	0.4319	-0.4239	0.1568

Tab. 46: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Oddball Paradigma

<i>Parameter</i>	UMTS-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Mittelwert d. Reaktionszeit (ms)	6.0221	< 0.0001	0.0001	0.9959	0.0017	0.8994
Anzahl der Fehler	1.2187	< 0.0001	0.1204	0.5538	-0.0796	0.7038

Unter Einfluss eines GSM900 Signals verringerte sich die mittlere Reaktionszeit in der hier genannten Studie nur unter Berücksichtigung der Tageszeit im linearen Modell. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Hamblin et al. (2004), die in einer Pilotstudie unter Anwendung eines anderen akustischen Oddball Paradigmas eine signifikant erhöhte mittlere Reaktionszeit unter Exposition mit einem GSM895 MHz Signal bei 12 jungen gesunden Probanden beobachten konnten. Die Versuchspersonen waren aufgefordert worden, sobald die Zahl 6 in einer Zahlensequenz, die über Kopfhörer zu hören war, vorkam, mit einem Tastendruck zu reagieren. Die Fehlerrate als Maß der Bearbeitungsgüte blieb im Gegensatz zur Reaktionsgeschwindigkeit von der Art der Exposition unbeeinflusst. In einer weiteren Studie von Hamblin et al. (2006) wurden unter Verwendung einer Oddball-Aufgabe, die der hier verwendeten in Bezug auf das akustische Stimulusmaterial ähnlicher war (Tastendruck bei bestimmter Tonhöhe eines Tons), Daten von 120 Personen (74 Frauen, 46 Männer) im Alter zwischen 18 und 69 Jahren erhoben. Die Reaktionszeiten zwischen der Sham- und der Expositionsbedingung (GSM895 MHz Signal, 250 mW; SAR 0.11 W/kg) unterschieden sich diesmal nicht.

Die hier verwendete auditive Diskriminationsaufgabe (Oddball-Paradigma) wurde nach den Vorgaben von Eulitz et al. (1998, 2002) durchgeführt, in den genannten Publikationen sind allerdings keine Auswertungen der Leistungsparameter dargestellt. Die Ausführungen bei Eulitz et al. (1998, 2002) konzentrieren sich ausschließlich auf die Einflüsse der elektromagnetischen Felder auf die EEG-Parameter wie sie nachfolgend unter D 1.4.2.2 diskutiert werden.

D 1.4.2.2 Ergebnisse zu den EEG-Parametern der AEP– Oddball Paradigma

Unter der GSM-Exposition erwiesen sich die Amplituden des an den Positionen C4 ($p = 0.0105$), T4 ($p = 0.0090$) und P3 ($p=0.0496$) abgeleiteten EEGs als statistisch signifikant. Die Amplituden waren unter der Verum-Bedingung größer als unter der Sham-Bedingung. Dies galt allerdings nur für die Vormittagstestung und ließ sich bei Kontrolle der Tageszeit im multivariaten Modell nicht bestätigen (siehe Tab. 47). Unter UMTS-Exposition ließ sich für keine Region des Gehirns eine signifikante Veränderung der Peak-Amplitude der P300-Komponente des AEP beobachten.

Unter GSM900-Exposition ließ sich für sieben der insgesamt 11 untersuchten Regionen (C3: $p = 0.0138$, C4: $p = 0.0013$, T4: $p = 0.0428$, T5: $p = 0.0203$, P3: $p = 0.0292$, P4: $p = 0.0125$ und Pz: $p = 0.0069$) ein statistisch signifikanter Tageszeiteffekt beobachten. Die Amplituden waren am Nachmittag

signifikant niedriger als am Vormittag. Dieser Effekt blieb in dem statistischen Modell, in dem der Einfluss der Exposition kontrolliert wurde, für fünf Ableitungen erhalten (vgl. Tab. 47). Dieser Effekt ließ sich weder unter der Sham- noch unter der UMTS-Expositionsbedingung beobachten.

Ein Ansatz, bei dem Tageszeit und Exposition simultan als Einflussgrößen in die Analyse eingingen, ergab für die GSM-Exposition einen signifikanten Tageszeiteffekt für fünf der insgesamt 11 untersuchten Regionen: die zentralen Spuren C3 und C4, die parietale Region in der Mediansagittalebene (Pz) sowie die parietale und die temporale Region (P4 und T4) der rechten Kopfseite (vgl. Abb. 52). Am Nachmittag war die Peak-Amplitude der P300-Komponente des akustisch evozierten Potentials signifikant niedriger als am Vormittag. Für drei weitere Kanäle, welche die temporale Region (T3 und T5) sowie die parietale Region (P3) auf der linken Kopfseite abdecken, ist ein entsprechender Trend ($p < 0.10$) zu beobachten (vgl. Tab. 47). Ein signifikanter Expositionseffekt ließ sich für keinen der abgeleiteten EEG-Kanäle beobachten.

Tab. 47: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von GSM-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Peak-Amplitude der P300 des Oddball-Paradigmas

Parameter	Verum-Exposition		Zeit: nachmittags	
	Konstante	<i>p</i>	Koeffizient	<i>p</i>
Amplitude an T3 (μV)	4.3705	< 0.0001	0.0158	0.9307
Amplitude an C3 (μV)	5.9324	< 0.0001	0.1413	0.6239
Amplitude an C4 (μV)	7.4426	< 0.0001	0.5169	0.1369
Amplitude an T4 (μV)	5.4359	< 0.0001	0.3109	0.2015
Amplitude an T5 (μV)	5.2846	< 0.0001	-0.1854	0.5098
Amplitude an P3 (μV)	7.9662	< 0.0001	0.3829	0.3132
Amplitude an Pz (μV)	10.3729	< 0.0001	0.1860	0.6228
Amplitude an P4 (μV)	8.6772	< 0.0001	0.1089	0.7282
Amplitude an T6 (μV)	5.0538	< 0.0001	0.0635	0.8222
Amplitude an O1 (μV)	4.9925	< 0.0001	0.4791	0.2265
Amplitude an O2 (μV)	4.7228	< 0.0001	0.3896	0.2357

Unter UMTS-Exposition zeigt sich- wie auch bei univariater Analyse der Daten- weder ein Tageszeiteffekt noch ein Effekt der Exposition (siehe Tab. 48, Abb. 53).

Tab. 48: Ergebnisse der Analyse des Einflusses von UMTS-Exposition (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Peak-Amplitude der P300 des Oddball-Paradigmas

Parameter	Verum-Exposition		Zeit: nachmittags			
	Konstante	p	Koeffizient	p		
Amplitude an T3 (µV)	4.1972	< 0.0001	-0.2364	0.3422	-0.2327	0.2228
Amplitude an C3 (µV)	5.6829	< 0.0001	-0.1191	0.7115	-0.3613	0.2083
Amplitude an C4 (µV)	7.0300	< 0.0001	0.2044	0.6285	-0.2352	0.3146
Amplitude an T4 (µV)	5.1544	< 0.0001	0.0547	0.8523	-0.0172	0.9207
Amplitude an T5 (µV)	5.1079	< 0.0001	-0.1925	0.5334	-0.2384	0.4221
Amplitude an P3 (µV)	7.8800	< 0.0001	-0.1485	0.6001	-0.2425	0.3536
Amplitude an Pz (µV)	10.0764	< 0.0001	-0.1187	0.7221	-0.1428	0.6258
Amplitude an P4 (µV)	8.4223	< 0.0001	-0.1616	0.5655	-0.0204	0.9336
Amplitude an T6 (µV)	4.9711	< 0.0001	-0.0924	0.6421	0.1592	0.3674
Amplitude an O1 (µV)	4.8202	< 0.0001	0.0254	0.9102	0.3040	0.2567
Amplitude an O2 (µV)	4.6255	< 0.0001	-0.0418	0.8542	0.2072	0.4163

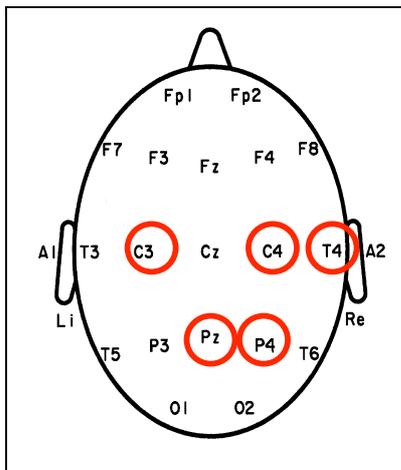


Abb. 52 Signifikante Ergebnisse der GENMOD Analyse des Tageszeiteffekts
○ sign. unter GSM-Exposition

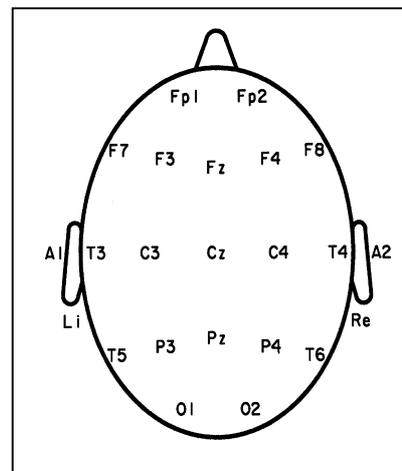


Abb. 53 Signifikante Ergebnisse der GENMOD Analyse des Tageszeiteffekts
○ sign. unter UMTS-Exposition

In den linearen Modellen konnte ein Tageszeiteffekt nur unter GSM nachgewiesen werden, ein Effekt der Exposition war jedoch unter beiden Expositionstypen nicht zu beobachten.

Da die positive Auslenkung der P300 umso stärker ist, je seltener und unsicherer ein Reiz auftritt, ist denkbar, dass die Amplitude am Nachmittag geringer ausgeprägt war, da die Person bereits an die Aufgabe gewöhnt war und somit weniger Aufmerksamkeit notwendig war, um die Aufgabe zu bearbeiten.

In den Studien von Krafczyk (1998, 2002) wurden neben dem Ruhe-EEG auch akustisch evozierte Potentiale (Oddball Paradigma) unter Darbietung von Tönen unterschiedlicher Frequenz abgeleitet. Eine varianzanalytische Auswertung ergab keine Hinweise auf eine durch elektromagnetische Felder bedingte Änderung der Hirnaktivität.

Eulitz et al. (1998) fanden bei Anwendung eines Oddball-Paradigma keinen Zusammenhang zwischen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern im Mobilfunkfrequenzbereich und den gemittelten EEG-Antworten auf auditive Stimuli. In einer weiteren Studie mit deutlich höheren SAR-Werten unter Verwendung eines Oddball-Paradigmas fanden Eulitz et al. (2002) die deutlichste Modulation der oszillatorischen Hirnaktivität unter EMF in höherfrequenten Bereichen (ca. 60-80Hz) ab ca. 350 bis 700 ms nach Reizdarbietung für verhaltensrelevanten Stimuli und überwiegend bei Personen, die rechtsseitig exponiert wurden.

Hamblin et al. (2004) fanden in ihrer Pilotstudie an 12 Probanden unter rechts-temporalen Exposition mit einem GSM-Signal 894,6 MHz (217Hz) eine statistisch signifikant reduzierte Amplitude und Latenz der N100 für non-Targets in einer auditiven Oddball-Aufgabe. Die stärksten Ausprägungen fanden sich über der mittleren Hirnregion sowie auf der rechten Hemisphäre. Die P300-Latenz, die für Targets ausgewertet wurde, war in der Expositionsbedingung verzögert. In einer weiteren Studie von Hamblin et al. (2006) wurde das Versuchsdesign wesentlich verbessert, indem die Anzahl der Probanden auf 120 erhöht wurde und ein doppelblindes Design das zuvor einfach-blind ersetzte. Diesmal zeigte sich kein Effekt der Exposition auf die Latenzen und Amplituden der Komponenten N100 und P300 der ereigniskorrelierten Potentiale mehr.

Die Ergebnisse der erwähnten Studien bestätigen somit im Wesentlichen das hier präsentierte Ergebnis, wonach eine Exposition mit elektromagnetischen Feldern die Amplituden der P300 in einer auditiven Oddball-Aufgabe nicht verändern.

D 1.5 Ergebnisse zur Pupillometrie

Die zur Beurteilung der tonischen zentralnervösen Aktivierung herangezogenen Pupillenparameter: mittlerer Pupillendurchmesser, Pupillenunruheindex, und die summierte spektrale Leistung zeigen weder am Vormittag noch am Nachmittag eine signifikante Veränderung unter Exposition.

Tageszeitbedingte Unterschiede lassen sich dagegen für den mittleren Pupillendurchmesser konsistent für alle drei Expositionsbedingungen erkennen. Am Nachmittag war der Pupillendurchmesser unter der Sham-Bedingung um 0.24 mm größer als am Vormittag ($p = 0.0205$), unter GSM900-Exposition betrug die entsprechende Differenz 0.26 mm ($p = 0.0087$) und unter UMTS-Exposition 0.20 mm ($p = 0.0382$).

Die Ergebnisse der expositions- und tageszeitspezifisch durchgeführten Analysen spiegeln sich im Wesentlichen in den Ergebnissen der mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse wider. Letztere sind für die GSM-Exposition in Tab. 49 und für die UMTS-Exposition in Tab. 50 aufgelistet. Im allgemeinen Modell wirkt sich der Tageszeiteffekt unter UMTS-Exposition auf den Pupillenunruheindex (PUI) ebenfalls statistisch signifikant ($p = 0.0336$) aus, wenn der Expositionseffekt kontrolliert wird. Im Vergleich zum Vormittag ist der Pupillenunruheindex am Nachmittag geringer. Diese Tendenz lässt sich auch unter GSM900-Exposition beobachten, allerdings wird die statistische Signifikanz knapp verfehlt ($p = 0.0516$).

Tab. 49: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter in der Pupillometrie

<i>Parameter</i>	GSM900-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Pupillendurchmesser (mm)	1.9471	< 0.0001	-0.0064	0.4120	0.0344	0.0037
Pupillenunruheindex (mm/min)	2.0408	< 0.0001	-0.0494	0.1808	-0.1015	0.0516
Spektrale Leistung (mm x s)	-3.7821	< 0.0001	-0.1240	0.1301	-0.1823	0.1057

Tab. 50: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter in der Pupillometrie

<i>Parameter</i>	UMTS-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Pupillendurchmesser (mm)	1.9477	< 0.0001	0.0006	0.9378	0.0331	0.0020
Pupillenunruheindex (mm/min)	2.0450	< 0.0001	-0.0275	0.4228	-0.1100	0.0336
Spektrale Leistung (mm x s)	-3.7944	< 0.0001	-0.0605	0.4380	-0.1577	0.1783

Es zeigte sich weder unter GSM900 noch unter UMTS ein Effekt der Exposition auf die erhobenen Parameter in der Pupillometrie. Die nachmittags erhobenen Werte zeigten unabhängig von der Bedingung jeweils einen größeren Pupillendurchmesser und unter UMTS nachmittags auch einen geringeren Unruheindex, was ebenfalls als Ausdruck einer größeren zentralnervösen Aktivierung verstanden werden kann. Da die Größe des Pupillendurchmessers negativ mit dem PUI korreliert ist, ist letzteres Ergebnis in diesem Zusammenhang zu sehen. Relativ gesehen waren die Probanden aufgrund dieser Ergebnisse in der zweiten Messung „wacher“ als in der ersten, da eine große Pupillenweite auf einen hohen zentralen Sympathotonus zurückzuführen ist und damit mit einer geringeren Müdigkeit einhergeht. Da die Pupillometrie jeweils zu Beginn jedes Testdurchlaufs durchgeführt wurde, war bei der zweiten Messung um 16:00 Uhr, nach der verlängerten Mittagspause, die zentralnervöse Aktivierung vermutlich höher als in der ersten Testung, die um 11:00 Uhr stattfand.

Bisher gibt es keine weiteren Studien zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf Prozesse im Gehirn, die durch die Ergebnisse der Pupillometrie widerspiegelt werden.

In einer (eigenen) Studie zum Tagesverlauf objektiver und subjektiver Schläfrigkeit zeigte sich in einer Gruppe von 12 gesunden Probanden im Alter von 23-59 Jahren ein Maximum der subjektiven Schläfrigkeit um 11:00 Uhr vormittags, was dem Zeitpunkt der 1. Testung entspräche (Danker-Hopfe et al., 2001; Kraemer et al., 2000) und mit dem geringeren Pupillendurchmesser übereinstimmen würde. Die objektiven Maße der Pupillometrie in den genannten Studien folgten aber einem davon abweichenden Tagesverlauf: Der Pupillendurchmesser war morgens um 7:00 Uhr am größten und nahm bis zur 2. Messung um 9:00 Uhr sehr stark ab, danach verringerte er sich weiter, allerdings deutlich abgeschwächt und erreichte einen minimalen Wert um 19:00 Uhr. Die Pupillendurchmesser unterschieden sich nicht signifikant zwischen 11:00 Uhr und 17:00 Uhr (Kraemer et al. 2000). Diese fehlenden Unterschiede zwischen den Messungen am späten Vormittag und Nachmittag in unseren anderen Studien (Danker-Hopfe et al., 2001; Kraemer et al., 2000) könnten zum einen im höheren durchschnittlichen Alter der Probanden liegen und zum anderen auch durch das andere Setting bedingt sein. In einer weiteren Studie konnten Daten von 229 Probanden im Alter von 20-80 Jahren analysiert werden, die zwischen 9:00 und 10:00 und zwischen 13:00 und 14:00 mit der Pupillometrie untersucht wurden (Danker-Hopfe et al., 2006): Der PUI war am Vormittag signifikant niedriger als am Nachmittag. Der Pupillendurchmesser änderte sich nicht signifikant zwischen den zwei Testungen. Alter und Tageszeit beeinflussten den PUI und den Pupillendurchmesser. Frauen wiesen einen geringeren PUI auf als Männer, der Pupillendurchmesser blieb vom Geschlecht unbeeinflusst. Aufgrund eines früheren Zeitpunkts der Vormittags- und Nachmittagstestung sind auch diese Daten nicht direkt vergleichbar, es wird allerdings deutlich, wie stark der Tageszeitpunkt der Testung, sowie Alter und Geschlecht die Parameter in der Pupillometrie beeinflussen.

Wilhelm et al. (2001) fanden bei 13 Probanden im Alter zwischen 24 und 32 Jahren tageszeitabhängige Schwankungen der Messwerte in der Pupillometrie mit einem 2-gipfligen Verlauf. Die niedrigsten PUI-Werte zeigten sich morgens um 9:00 Uhr und abends um 23:00 Uhr. Die Werte um 11:00 und 16:00 unterscheiden sich nicht. Im Vergleich mit dem Tagesmittelwert aus 15

Einzelmessungen war der Pupillendurchmesser um 9:00 Uhr und um 17:00 Uhr am größten. In unserer Studie reichen zwei Messwerte zwar nicht aus, um einen Tagesgang zu erfassen, ein 2-gipfliger Verlauf mit einem (nicht gemessenen) Hoch am Morgen, einer Senke am späten Vormittag und einem zweiten höheren Aktivierungsniveau am späteren Nachmittag ließe sich aus unseren Daten vermuten und würde mit den erwähnten Studien übereinstimmen.

Die höhere Aktivierung in unserer aktuellen Studie spiegelt sich in besseren Leistungen am Nachmittag in sämtlichen Tests wider und unterstreicht die Wichtigkeit der Kontrolle des Tageszeitpunktes bei Untersuchungen von Expositionseffekten.

D 2 Ergebnisse der Tests zur Objektivierung aufmerksamkeitsbezogener Prozesse

D 2.1 Ergebnisse des Tests Selektive Aufmerksamkeit – Daueraufmerksamkeitstest

Wie in Kapitel B 6.3.1 bereits beschrieben, liefert der Daueraufmerksamkeitstest aus dem Wiener Testsystem insgesamt die folgenden 10 Zielparameter: Anzahl der Richtigen (AdR), Anzahl der Flaschen (AdF), Anzahl der Ausgelassenen (AdA), Mittelwert und Streuung der Reaktionszeit (MWRT und SDRT), Mittelwert und Streuung der Richtigen (MWdR und SDdR), Mittelwert der Ausgelassenen (MWdA) sowie Mittelwert und Streuung der Falschen (MWdF und SDdF). Da die Anzahl der Ausgelassenen und der falschen Reaktionen bei jungen gesunden Probanden in der Regel nicht variiert und Mittelwerte und Streuungsmaße für Teilzeiten damit nicht gut diskriminierten, wurden für die vorliegende Auswertung lediglich die für die Gesamtdauer des Tests berechneten Parameter Anzahl der Richtigen, sowie Mittelwert und Streuung der Reaktionszeit herangezogen.

Es zeigt sich, dass weder vormittags noch nachmittags signifikante Unterschiede in der Anzahl der richtigen Reaktionen in Abhängigkeit von der Art der Exposition zu beobachten sind. Auch lassen die Reaktionszeiten und deren Streuung unter GSM- bzw. UMTS-Exposition keine signifikanten Abweichungen erkennen.

Eine für die Expositionsbedingungen getrennt durchgeführte Analyse auf tageszeitbedingte Unterschiede in den Zielparametern ergab, dass die mittlere Reaktionszeit in diesem Test sowohl unter Sham ($p = 0.0016$) als auch unter UMTS-Exposition ($p = 0.0007$) am Nachmittag signifikant verkürzt war. Eine entsprechende Tendenz war auch unter GSM-Exposition zu erkennen, ohne dass dieser Unterschied jedoch signifikant wurde ($p = 0.0741$).

Die Ergebnisse einer mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse des Einflusses von Exposition bei simultaner Berücksichtigung der Tageszeit sind für die GSM-Exposition in Tab. 51 und für die UMTS-Exposition in Tab. 52 aufgelistet.

Tab. 51: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Daueraufmerksamkeitstest

<i>Parameter</i>	GSM900-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Anzahl der Richtigen	4.3632	< 0.0001	0.0019	0.4335	0.0040	0.0931
Mittelwert der Reaktionszeit (s)	-0.3586	< 0.0001	-0.0050	0.3971	-0.0152	0.0006
SD der Reaktionszeit (s)	-2.0686	< 0.0001	-0.0944	0.3702	-0.1144	0.2719

Tab. 52: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Daueraufmerksamkeitstest

<i>Parameter</i>	UMTS-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Anzahl der Richtigen	4.3634	< 0.0001	-0.0003	0.9163	0.0036	0.1902
Mittelwert der Reaktionszeit (s)	-0.3561	< 0.0001	-0.0054	0.2942	-0.0203	< 0.0001
SD der Reaktionszeit (s)	-2.1140	< 0.0001	0.0028	0.9859	-0.0150	0.9258

Im Test zur Erfassung der Daueraufmerksamkeit während einer Dauer von 10 Minuten zeigten sich, wie auch schon in der Pupillometrie, keine Einflüsse der EMF auf die erhobenen Parameter. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass weder die GSM900- noch die UMTS-Exposition einen bedeutsamen Einfluss auf die Aufmerksamkeit bei hoher Reizfrequenz hat, dies gilt sowohl für die Genauigkeit als auch für die Schnelligkeit.

Auch in diesem Test war die Leistung im jeweils zweiten Durchgang besser als im ersten, was sich in kürzeren Reaktionszeiten, unabhängig von der Art der Exposition, niederschlug. Da die erste Testung in die Zeit des Mittagstiefs fiel (ca. 13:00), könnten die Reaktionszeiten aus diesem Grund etwas langsamer ausgefallen sein als zum späteren Zeitpunkt (17:50 Uhr). Nicht auszuschließen sind jedoch auch Übungseffekte, die zu einer verbesserten Leistung in der zweiten Testung geführt haben könnten.

Der hier verwendete Test zur Messung der langfristigen selektiven Aufmerksamkeit wurde eigens für die Studie von einer ursprünglichen Dauer von 40 Minuten auf 10 Minuten gekürzt, um die Gesamtdauer der Testbatterie in zumutbarem Rahmen zu halten. Publierte Studien, die den Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Aufmerksamkeit untersuchten verwendeten andere Verfahren bzw. überprüften andere Aspekte der Aufmerksamkeit, wie z.B. geteilte Aufmerksamkeit oder Vigilanz (vgl. nachfolgende Ergebnisse). In einer der wenigen Studien, die die selektive Aufmerksamkeit als Zielparameter auswählte, konnte kein Unterschied zwischen den

„Expositionsbedingungen“ Mobiltelefon (GSM9000 MHz, 217 Hz) und reguläres Telefon gefunden werden (Hladky et al., 1999). Die Testdauer betrug lediglich 3 Minuten und es handelte sich um ein nicht-verblindetes Design. In den Studien von Haarala (2003a, 2007) und Koivisto et al. (2000a) wurde zwar laut Autoren eine „vigilance task“ verwendet, dabei handelte es sich allerdings um einen Test zur Untersuchung der selektiven Aufmerksamkeit (vgl. B 5.4) während 15 Minuten. Die Aufgabe bestand darin, auf die Buchstaben „L“, „M“ und „Y“ zu reagieren und irrelevante Stimuli zu ignorieren. Die Interstimulus-Intervalle waren zwischen 500ms und 3s lang, 15% der Stimuli waren Targets. Auch Russo et al. (2006) verwendeten diesen Vigilanztest, die Targetrate war aber mit 20% etwas höher. Die genannten Studien sind damit nur bedingt vergleichbar. Während in der Studie von Koivisto et al. (2000a) die Probanden unter Exposition mit einem 902 MHz Signal (217 Hz) signifikant schneller reagierten und eine geringere Fehlerrate aufwiesen, zeigte sich dieser Effekt in den Replikationsstudien von Haarala et al. (2003a, 2007) und bei Russo et al. (2006) nicht (mehr). In den Studien von Haarala et al. (2003a) ließ sich allerdings ein signifikanter Effekt des Untersuchungstages (erster vs. zweiter Tag – unabhängig von der Exposition) erkennen, der zu einer kürzeren Reaktionszeit am 2. Tag im Sinne eines Lerneffekts führte. Dies stimmt mit unseren Daten überein, wonach die Probanden von der ersten zur zweiten Testung schneller reagierten, unabhängig von der Art der Exposition. Die Bearbeitungsgüte gemessen mit der „Anzahl der falschen Reaktionen“ in den Studien von Haarala (2003a, 2007) und mit der „Anzahl der Ausgelassenen“ bei Russo et al. (2006) war von den Faktoren Exposition und Testzeitpunkt unbeeinflusst.

Lee et al. (2003) testeten 78 Studenten mit 2 verschiedenen Aufmerksamkeitstests, die beide überwiegend die selektive Aufmerksamkeit erheben: Trail Making Test (TMT, Version A und B) und Sustained Attention to Response Test (SART). Die Exposition erfolgte einfachblind in Parallelgruppen mit einem GSM 1900 MHz Mobiltelefon. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen ergab zwar keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Gruppe (Exposition), wohl aber einen signifikanten Interaktionseffekt, der nahe legt, dass die (lernbedingte) Veränderung der Reaktionszeit im SART zwischen der Experimentalgruppe und der Kontrollgruppe statistisch signifikant unterschiedlich ist. Für die Anzahl der richtigen Reaktionen und die Leistungsparameter im TMT ergab sich auch hier kein Hinweis auf einen Expositionseffekt. Aufgrund eines einfach-blinden Parallelgruppendesigns, bei dem die Exposition nur im ersten Durchgang erfolgte, sind diese Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren. Vielmehr dürfte auch hier ein Lerneffekt eingetreten sein, der zu einer Beschleunigung der Reaktionsfähigkeit geführt hat. Keetley et al. (2006) verwendeten ebenfalls den Trail Making Test (Version A und B) und fanden in der Version A (Verbinden von 25 verschiedenen Zahlen mit einem Stift) unter EMF von einem digitalen GSM-Handy (ohne Frequenzangabe; Power 0.23 W) zwar eine Zunahme der benötigten Bearbeitungszeit, im Gegensatz dazu kam es in der Version B (Verbinden von Zahlen und Buchstaben) zu einer Verbesserung. Wäre eine Bonferroni- Korrekturen für multiples Testen angewendet worden, hätte keines der Ergebnisse statistische Signifikanz erreicht (Lewis, 2007).

In der niederländischen TNO-Studie untersuchten Zwamborn et al. (2003) bei EMF-sensiblen Personen (Gruppe A) und bei einer nicht-sensiblen Kontrollgruppe (Gruppe B) Auswirkungen von vier

Versuchsbedingungen (GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, UMTS 2100 MHz und Scheinexposition) auf das Wohlbefinden und auf vier verschiedene kognitive Parameter. Die Signale simulierten Mobilfunkbasisstationen. In der Testleistung zur selektiven Aufmerksamkeit zeigte sich während der Placebobedingung ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen A und B, der unter anderen Bedingungen nicht auftrat. Aufgrund von mangelnder Beschreibung des Testverfahrens (Durchführung, Dauer) und fehlender Einheit des untersuchten Parameters („basic speed of focussing attention“ und „sterring time parameter“) können keine Aussagen über die Richtung der Veränderung getroffen werden. Das gilt auch für die Effekte von UMTS 2100 MHz, die in beiden Gruppen zu signifikanten Unterschieden führten. Aufgrund der Mängel im Studiendesign (vgl. A 4.3) sind die Ergebnisse eher als Zufallsprodukt zu werten. Diese Annahme wird durch die Studie von Regel et al. (2006) unterstützt, die die Ergebnisse von Zwamborn et al. (2003) nicht replizieren konnten. Diese Forschergruppe adaptierte den Test zur selektiven Aufmerksamkeit von Zwamborn et al. (2003), so dass die Aufgabe der Versuchsperson darin bestand, aus einer zufälligen Kombination von 4 Buchstaben und/oder Kreuzen das alleinige oder gemeinsame Auftreten der Buchstaben „U“ und „F“ mit einer Taste („J“) zu bestätigen und mit einer anderen Taste („N“) zu reagieren, wenn diese Targetstimuli nicht zu sehen waren. Die Exposition mit Feldern, die UMTS Mobilfunkbasisstationen simulierten, zeigte keinen Effekt auf Reaktionszeit bei „EMF-sensiblen“ und „nicht-sensiblen“ Testpersonen. In einer Studie zum Einfluss von UMTS auf die visuelle Wahrnehmung konnte kein Effekt zwischen Sham und 2 verschiedenen Stufen der Exposition (hoch-niedrig) auf die selektive Aufmerksamkeit in einem Linienverfolgungstest, bei dem aus einem Durcheinander von Linien der Endpunkt einer bestimmten Linie so schnell wie möglich gefunden werden musste (Schmid et al., 2005).

Unsere Ergebnisse stimmen somit mit der überwiegenden Mehrheit der Befunde zur selektiven Aufmerksamkeit überein.

D 2.2 Ergebnisse des Tests Geteilte Aufmerksamkeit

Die geteilte Aufmerksamkeit wurde mit einem Test aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeit (TAP) von Zimmermann und Fimm (2002) erfasst. In dem Test werden eine optische und eine akustische Aufgabe kombiniert (siehe B 5.4.2). Der Test liefert insgesamt 24 Zielparameter, je acht für die optische und die akustische Teilaufgabe getrennt sowie acht für den kombinierten Test. Erfasst werden Mittelwert (MWRT), Standardabweichung (SDRT) und Median der Reaktionszeit (P50RT) sowie die Anzahl der richtigen (AdR), der antizipierten, der ausgelassenen, der fehlerhaften und der verzögerten Reaktionen (vgl. Kap B 6.3.2). Da die Anzahl der antizipierten, der ausgelassenen, der fehlerhaften und der verzögerten Reaktionen in der von uns untersuchten Stichprobe äußerst gering war (0 oder 1), wurden diese Parameter für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt.

Eine tageszeitspezifische Überprüfung auf Abweichungen in den Leistungsparametern unter Exposition ergab, dass unter GSM900-Exposition die Standardabweichung der Reaktionszeit in der akustischen Teilaufgabe am Vormittag statistisch signifikant ($p = 0.0203$) reduziert war. Ein entsprechender Trend ließ sich weder am Nachmittag noch für die optische Teilaufgabe bzw. für den gesamten Test bestätigen. Die Reduktion der Standardabweichung, d.h. die reduzierte Variabilität bzw. die größere Konstanz der Reaktionszeit hatte keine Entsprechung in Veränderungen der mittleren bzw. medianen Reaktionszeit. Auch die Anzahl der richtigen Reaktionen zeigte unter GSM900-Exposition keine Veränderung.

Unter UMTS-Exposition waren in der Vormittagstestung das arithmetische Mittel ($p = 0.0393$) und der Median ($p = 0.0094$) der Reaktionszeit in der optischen Teilaufgabe statistisch signifikant erhöht. Dieses Ergebnis konnte in der Nachmittagstestung nicht bestätigt werden. Für den Mittelwert der Reaktionszeit ließ sich sogar eine deutliche (statistisch aber nicht signifikante) Reduktion beobachten. Für alle anderen Parameter variierten die individuellen Differenzen zufallsbedingt um Null.

Tageszeitliche Variationen in den Zielparametern ließen sich lediglich unter UMTS-Exposition beobachten. Die Standardabweichung der Reaktionszeit war für den gesamten Test ($p = 0.0304$) sowie für die optische Teilaufgabe ($p = 0.0023$) am Nachmittag statistisch signifikant reduziert. Gleiches gilt auch für die mittlere Reaktionszeit der optischen Teilaufgabe ($p = 0.0274$).

Die Ergebnisse einer mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse des Einflusses von Exposition bei simultaner Berücksichtigung der Tageszeit sind für die GSM-Exposition in Tab. 53 und für die UMTS-Exposition in Tab. 54 aufgelistet.

Tab. 53: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Test Geteilte Aufmerksamkeit

<i>Parameter</i>	GSM900-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Gesamter Test						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.4235	< 0.0001	0.0045	0.4725	-0.0008	0.9141
SD der Reaktionszeit (ms)	5.1119	< 0.0001	0.0322	0.0231	-0.0123	0.3937
Median der Reaktionszeit (ms)	6.3923	< 0.0001	-0.0052	0.5428	-0.0072	0.3448
Anzahl der Richtigen	3.4424	< 0.0001	-0.0025	0.5902	-0.0021	0.6486
Optische Teilaufgabe						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.6007	< 0.0001	0.0151	0.0263	-0.0031	0.6606
SD der Reaktionszeit (ms)	4.9956	< 0.0001	0.0804	0.0052	-0.0151	0.6031
Median der Reaktionszeit (ms)	6.5625	< 0.0001	0.0146	0.0521	0.0067	0.4452
Anzahl der Richtigen	2.8449	< 0.0001	-0.0431	0.3901	-0.0480	0.3175
Akustische Teilaufgabe						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.2139	< 0.0001	-0.0091	0.2837	0.0009	0.9308
SD der Reaktionszeit (ms)	4.4454	< 0.0001	-0.0320	0.4359	-0.0086	0.7588
Median der Reaktionszeit (ms)	6.1823	< 0.0001	-0.0056	0.5619	0.0113	0.3680
Anzahl der Richtigen	2.7219	< 0.0001	-0.0041	0.4676	-0.0048	0.4006

Tab. 54: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Test Geteilte Aufmerksamkeit

<i>Parameter</i>	UMTS-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
Gesamter Test						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.4265	< 0.0001	0.0050	0.3883	-0.0069	0.3557
SD der Reaktionszeit (ms)	5.1241	< 0.0001	-0.0092	0.4788	-0.0366	0.0473
Median der Reaktionszeit (ms)	6.3946	< 0.0001	-0.0002	0.9823	-0.0117	0.0989
Anzahl der Richtigen	3.4404	< 0.0001	0.0018	0.6412	0.0018	0.7317

Parameter	UMTS-Exposition				Zeit: nachmittags	
	Konstante	p	Koeffizient	p	Koeffizient	p
Optische Teilaufgabe						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.6098	< 0.0001	-0.0015	0.8631	-0.0213	0.0582
SD der Reaktionszeit (ms)	5.0242	< 0.0001	0.0025	0.9095	-0.0713	0.0479
Median der Reaktionszeit (ms)	6.5686	< 0.0001	0.0141	0.0424	-0.0055	0.6399
Anzahl der Richtigen	2.8467	< 0.0001	-0.0428	0.3962	-0.0518	0.2891
Akustische Teilaufgabe						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.2100	< 0.0001	0.0150	0.0868	0.0086	0.4706
SD der Reaktionszeit (ms)	4.4771	< 0.0001	-0.0319	0.4429	-0.0733	0.0116
Median der Reaktionszeit (ms)	6.1843	< 0.0001	0.0108	0.3418	0.0073	0.4933
Anzahl der Richtigen	2.7199	< 0.0001	0.0022	0.6720	-0.0007	0.8912

Das allgemeine lineare Modell lässt eine signifikante Erhöhung der Variabilität der Reaktionszeit unter GSM900-Exposition für den gesamten Test ($p = 0.0231$) sowie für die optische Teilaufgabe ($p = 0.0052$) erkennen, nicht jedoch für die akustische Teilaufgabe. Darüber hinaus ist unter GSM900-Exposition der Mittelwert der Reaktionszeit auf die optischen Reize statistisch signifikant erhöht ($p = 0.0263$). Tageszeitbedingte Einflüsse auf die Testergebnisse sind nicht zu erkennen.

Unter UMTS-Exposition ist dagegen die Standardabweichung der Reaktionszeit sowohl für den gesamten Test als auch für die optische und die akustische Teilaufgabe getrennt, am Nachmittag statistisch signifikant geringer. Ein Expositionseffekt lässt sich nur für den Median der Reaktionszeit auf die optischen Reize beobachten. Er ist unter Exposition knapp statistisch signifikant ($p = 0.0424$) erhöht.

Bei 24 Tests pro Vergleich GSM900 - Sham bzw. UMTS - Sham wären zufallsbedingt 1,2 Test signifikant. Da beim Vergleich GSM900 - Sham lediglich ein Test signifikant war und bei UMTS - Sham zwei Tests für den gleichen Parameter (Reaktionszeit-Mittelwert, Reaktionszeit-Median) eine statistisch bedeutsame Signifikanz aufwiesen, sind die Ergebnisse als Zufallsprodukt zu werten. Dasselbe gilt für die Ergebnisse, die mit dem linearen Modell gewonnen wurden: Unter GSM900 ist zwar die Standardabweichung des gesamten Tests und der optischen Teilaufgabe signifikant erhöht, der Wert der Standardabweichung des gesamten Tests setzt sich aber zur Hälfte aus der optischen Teilaufgabe zusammen. Als zweiter Parameter war der Mittelwert der Reaktionszeit auf optische Reize erhöht. Insgesamt überschreitet die Anzahl von 3 signifikanten Ergebnissen die zufallsbedingt zu erwartende, nämlich 1,2 Tests, aufgrund der direkten Abhängigkeit sind sie aber als zufallsbedingt zu werten. Unter UMTS war nachmittags die Standardabweichung der Reaktionszeit in der optischen,

in der akustischen und in der gesamten Aufgabe signifikant niedriger. Aufgrund der Zusammensetzung der Ergebnisse des gesamten Tests aus den zwei Teilaufgaben ist auch hier von einem zufallsbedingtem Ergebnis auszugehen. Unter UMTS war der Median der Reaktionszeit knapp signifikant erhöht, nicht jedoch der Mittelwert.

In der TNO-Studie Zwamborn et al. (2003) wurde die geteilte Aufmerksamkeit mithilfe eines Tests erfasst, bei dem während einer „Tracking-Aufgabe“ gleichzeitig gezählt werden musste. Unter GSM1800 MHz nahm die Reaktionszeit nur in der Kontrollgruppe signifikant ab. In der Gruppe der „Elektrosensiblen“ nahm unter GSM900 die Fähigkeit, irrelevante Information zu filtern, signifikant ab. Unter UMTS gab es gar keine Unterschiede in den zwei Leistungsparametern der geteilten Aufmerksamkeit. Aufgrund der Inkonsistenz der Ergebnisse und fehlender Korrektur für multiple Tests handelt es sich vermutlich dabei nur um zufällige Signifikanzen. Unabhängig davon sollte die Exposition in der TNO-Studie Signale von Mobilfunkbasisstationen simulieren und ist daher nicht direkt mit den hier gefundenen Ergebnissen vergleichbar.

Derzeit gibt es keine weiteren publizierten Studien, die den Einfluss auf die geteilte Aufmerksamkeit bei erwachsenen Probanden zum Untersuchungsgegenstand hatten.

D 2.3 Ergebnisse des Vigilanztests

Die optische Vigilanz wurde, wie die geteilte Aufmerksamkeit, mit einem Test aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeit (TAP) von Zimmermann und Fimm (2002) erfasst. Der Test liefert acht Zielparameter: Mittelwert (MWRT), Standardabweichung (SDRT) und Median der Reaktionszeit (P50RT) sowie die Anzahl der richtigen (AdR), der antizipierten, der ausgelassenen, der fehlerhaften und der verzögerten Reaktionen. Diese acht Parameter werden zum einen für die gesamte Testdauer (10 Minuten) und zum anderen für die ersten und die letzten fünf Minuten des Tests getrennt ausgegeben (vgl. Kap. B 6.3.3). Da auch bei diesem Test die Anzahl der antizipierten, der ausgelassenen, der fehlerhaften und der verzögerten Reaktionen in der von uns untersuchten Stichprobe äußerst gering war (0 oder 1), wurden sie für die weitere Auswertung ebenfalls nicht berücksichtigt.

Eine nach Tageszeit getrennt durchgeführte Überprüfung auf Abweichungen in den Leistungsparametern unter GSM900-Exposition ergab für fünf der insgesamt 24 (je 12 für den Vormittag und den Nachmittag) untersuchten Variablen einen statistisch signifikanten Effekt. Am Vormittag war unter GSM900-Exposition die Anzahl der richtigen Reaktionen sowohl in den ersten 5 Minuten ($p = 0.0437$) als auch in den zweiten 5 Minuten des Tests ($p = 0.0181$) sowie für den gesamten Test ($p = 0.0212$) statistisch signifikant erhöht, was für eine bessere Testleistung unter Exposition spricht. Der Mittelwert der Reaktionszeit war dagegen am Vormittag in der zweiten Hälfte des Tests signifikant niedriger ($p = 0.0435$). Am Nachmittag ließ lediglich die Standardabweichung der Reaktionszeit in der ersten Testhälfte eine Veränderung unter GSM900-Exposition erkennen. Sie war unter Exposition signifikant reduziert ($p = 0.0263$), was eine homogenere Testleistung bedeutet.

Auch unter UMTS-Exposition war die Anzahl der richtigen Reaktionen am Vormittag tendenziell erhöht, statistisch signifikant war der Unterschied jedoch nur für die richtigen Reaktionen in der ersten Testhälfte ($p = 0.0178$). Dies war auch das einzig statistisch signifikante Testergebnis unter UMTS-Exposition.

Tageszeitliche Variationen ließen sich für vier der insgesamt 36 Zielparameter (je 12 pro Exposition) beobachten. Betroffen war die Standardabweichung der Reaktionszeit unter GSM900-Exposition, sie war in der ersten Testhälfte am Nachmittag signifikant geringer als am Vormittag ($p = 0.0220$), was für eine homogenere Reaktionszeit unter Exposition zu dieser Tageszeit spricht. Die übrigen drei signifikanten tageszeitabhängigen Veränderungen waren unter Scheinexposition zu beobachten. Die Anzahl der richtigen Reaktionen war sowohl für die Gesamttestdauer ($p = 0.0387$) als auch für die erste ($p = 0.0494$) und die zweite ($p = 0.0331$) Testhälfte getrennt am Nachmittag statistisch signifikant besser als am Vormittag.

Die Ergebnisse einer mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse des Einflusses von Exposition bei simultaner Berücksichtigung der Tageszeit sind für die GSM-Exposition in Tab. 55 und für die UMTS-Exposition in Tab. 56 aufgelistet.

Tab. 55: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Vigilanztest

<i>Parameter</i>	GSM900-Exposition		Zeit: nachmittags			
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>		
Gesamter Test						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.1170	< 0.0001	-0.0227	0.1656	-0.0068	0.6311
SD der Reaktionszeit (ms)	4.7446	< 0.0001	-0.0310	0.5351	-0.0512	0.1887
Median der Reaktionszeit (ms)	6.0997	< 0.0001	-0.0251	0.2954	-0.0003	0.9780
Anzahl der Richtigen	2.4042	< 0.0001	-0.0004	0.9852	0.0248	0.2691
1. 5-Minuten Abschnitt						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.1170	< 0.0001	-0.0104	0.6173	-0.0115	0.4441
SD der Reaktionszeit (ms)	4.7445	< 0.0001	-0.0234	0.6151	-0.0535	0.2530
Median der Reaktionszeit (ms)	6.0906	< 0.0001	-0.0218	0.4611	0.0090	0.5758
Anzahl der Richtigen	1.7344	< 0.0001	0.0007	0.9739	0.0308	0.1416

Parameter	GSM900-Exposition				Zeit: nachmittags	
	Konstante	p	Koeffizient	p	Koeffizient	p
2. 5-Minuten-Abschnitt						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.1357	< 0.0001	-0.0304	0.0441	-0.0032	0.8756
SD der Reaktionszeit (ms)	4.7699	< 0.0001	-0.0241	0.6104	-0.0073	0.9040
Median der Reaktionszeit (ms)	6.1122	< 0.0001	-0.0317	0.0615	0.0007	0.9717
Anzahl der Richtigen	1.7120	< 0.0001	0.0056	0.8176	0.0288	0.1846

Tab. 56: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Vigilanztest

Parameter	UMTS-Exposition				Zeit: nachmittags	
	Konstante	p	Koeffizient	p	Koeffizient	p
Gesamter Test						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.1174	< 0.0001	0.0039	0.7647	-0.0076	0.5647
SD der Reaktionszeit (ms)	4.7162	< 0.0001	-0.0081	0.8487	0.0043	0.9102
Median der Reaktionszeit (ms)	6.0966	< 0.0001	0.0004	0.9783	0.0057	0.6214
Anzahl der Richtigen	2.3981	< 0.0001	-0.0093	0.6497	0.0367	0.0949
1. 5-Minuten Abschnitt						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.1115	< 0.0001	0.0010	0.9582	-0.0006	0.9614
SD der Reaktionszeit (ms)	4.7049	< 0.0001	0.0167	0.7534	0.0223	0.5499
Median der Reaktionszeit (ms)	6.0880	< 0.0001	-0.0101	0.5825	0.0140	0.2943
Anzahl der Richtigen	1.7324	< 0.0001	0.0026	0.8903	0.0346	0.1006
2. 5-Minuten-Abschnitt						
Mittelwert der Reaktionszeit (ms)	6.1397	< 0.0001	0.0122	0.4595	-0.0112	0.5526
SD der Reaktionszeit (ms)	4.7760	< 0.0001	-0.0208	0.7269	-0.0196	0.7531
Median der Reaktionszeit (ms)	6.1184	< 0.0001	0.0130	0.5054	-0.0117	0.5456
Anzahl der Richtigen	1.7130	< 0.0001	-0.0083	0.6798	0.0267	0.2226

Bei simultaner Berücksichtigung des Expositions- und des Tageszeiteinflusses erweist sich lediglich ein Effekt als statistisch signifikant. Der Mittelwert der Reaktionszeit ist in der zweiten Testhälfte nach Kontrolle der Tageszeit unter GSM900-Exposition signifikant ($p = 0.0441$) geringer als unter der Scheinbedingung.

Unter Scheinbedingung ist die Anzahl der richtigen Reaktionen am Nachmittag sowohl für die erste als auch für die zweite Hälfte des Tests und dadurch auch für den gesamten Test signifikant höher. Unter GSM900 am Vormittag sind dieselben drei Parameter in gleicher Weise signifikant erhöht. Werden im linearen Modell alle Expositionsbedingungen und beide Tageszeiten simultan berücksichtigt, gleichen sich diese Ergebnisse aus. Lediglich der signifikante Mittelwert der Reaktionszeit in der 2. Hälfte, der unter GSM900 am Vormittag gefunden wurde, bleibt auch im linearen Modell als einziger Parameter signifikant, unabhängig von der Tageszeit. Dieses Ergebnis ist aufgrund der multiplen Tests als Zufallsereignis zu werten, da bei 24 Tests pro Exposition und Tageszeit mit 1,2 zufallsbedingten Signifikanzen zu rechnen ist.

Gehlen et al. (1996) und Spittler et al. (1997) testeten 52 Probanden (je 26 Männer und Frauen) im Alter von 20 bis 38 Jahren ebenfalls mit der Vigilanzaufgabe aus der TAP unter Einfluss eines mit 217 Hz gepulsten 914.2 MHz-Signals und unter Scheinexposition. Die Dauer der Exposition betrug ca. 60-70 Minuten. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied in den erhobenen kognitiven Parametern zwischen Exposition und Nicht-Exposition. Weitere Studien, die auch nur ansatzweise vergleichbare Testverfahren zur Messung der Vigilanz eingesetzt haben, liegen nicht vor.

D 2.4 Ergebnisse des Tests zum Arbeitsgedächtnis (WMT)

Die in Kap. B 5.5 und B 6.3.4 beschriebene Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis als Unterform des Kurzzeitgedächtnisses liefert pro Testparadigma (0-back und 2-back) je drei Zielparameter: die mittlere Reaktionszeit sowie die Anzahl der falschen und der richtigen Reaktionen. Da die Anzahl der falschen Reaktionen sich als Differenz aus der Gesamtzahl der zu beantwortenden Stimuli und der Anzahl der richtigen Reaktionen ergibt, liefern diese beiden Variablen identische Ergebnisse. Es wurde daher nur die Anzahl der richtigen Reaktionen berücksichtigt.

Keiner der Leistungsparameter, die für den Test zum Arbeitsgedächtnis erhoben wurden, ließ eine Veränderung unter GSM900- oder UMTS- Exposition erkennen. Dies gilt für die Vormittagstestung ebenso wie für die Nachmittagstestung.

Für die leichtere Teilaufgabe des Tests, das 0-back Paradigma, ließ sich dagegen unter allen drei Expositionen ein signifikanter Tageszeiteffekt in der mittleren Reaktionszeit beobachten. Sie war unabhängig von der Exposition am Nachmittag signifikant verkürzt (Sham: $p = 0.0370$; GSM900: $p = 0.0002$; UMTS: $p = 0.0295$). Unter der Sham-Bedingung war die Reaktionszeit im 2-back Testparadigma am Nachmittag ebenfalls signifikant verkürzt ($p = 0.0231$). Eine entsprechende Tendenz ließ sich auch unter UMTS-Exposition beobachten, ohne dass die Unterschiede jedoch statistisch signifikant wurden.

Unter GSM900-Exposition war im 0-back-Paradigma am Nachmittag eine signifikant höhere Anzahl richtiger Reaktionen zu verzeichnen ($p = 0.0365$), für das 2-back-Paradigma zeichnete sich eine entgegengesetzte Tendenz ab, ohne dass diese jedoch statistisch signifikant wurde ($p = 0.0627$). Unter UMTS-Exposition war am Nachmittag im 2-back-Paradigma die Anzahl der richtigen Reaktionen ebenfalls signifikant geringer ($p = 0.0221$) als am Vormittag.

Die Ergebnisse einer mit einem allgemeinen linearen Modell durchgeführten Analyse des Einflusses von Exposition bei simultaner Berücksichtigung der Tageszeit sind für die GSM-Exposition in Tab. 57 und für die UMTS-Exposition in Tab. 58 aufgelistet.

Tab. 57: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit GSM900 (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Test zum Arbeitsgedächtnis

<i>Parameter</i>	GSM900-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
0-back Paradigma						
Anzahl der Richtigen	5.0484	< 0.0001	0.0054	0.5936	0.0028	0.5247
Mittelwert der Reaktionszeit	5.9923	< 0.0001	-0.0031	0.6463	-0.0247	< 0.0001
2-back Paradigma						
Anzahl der Richtigen	4.9068	< 0.0001	0.0067	0.5210	-0.0175	0.0213
Mittelwert der Reaktionszeit	5.5649	< 0.0001	0.0075	0.6298	-0.0357	0.1250

Tab. 58: Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Exposition mit UMTS (Default: Sham) und Tageszeit (Default: vormittags) mittels eines allgemeinen linearen Modells (GENMOD) auf die Parameter im Test zum Arbeitsgedächtnis

<i>Parameter</i>	UMTS-Exposition				Zeit: nachmittags	
	<i>Konstante</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>	<i>Koeffizient</i>	<i>p</i>
0-back Paradigma						
Anzahl der Richtigen	5.0497	< 0.0001	0.0090	0.1440	0.0001	0.9712
Mittelwert d. Reaktionszeit	5.9894	< 0.0001	-0.0076	0.3282	-0.0188	0.0069
2-back Paradigma						
Anzahl der Richtigen	4.9074	< 0.0001	0.0196	0.1178	-0.0186	0.0086
Mittelwert d. Reaktionszeit	5.5733	< 0.0001	-0.0440	0.0304	-0.0526	0.0185

Die Ergebnisse des linearen Modells bestätigen im Wesentlichen die Bedeutung des Einflusses der Tageszeit auf Leistungsparameter in der Aufgabe zum Arbeitsgedächtnis. Die Reaktionen erfolgten im Mittel nachmittags schneller als vormittags. Bei Kontrolle der Tageszeit erlangt in diesem Modell allerdings für das 2-back- Paradigma zusätzlich auch der Einfluss von UMTS-Exposition auf den Mittelwert der Reaktionszeit statistische Signifikanz ($p = 0.0304$).

Wie in fast allen zuvor berichteten Ergebnissen zu behavioralen Maßen ist auch hier wieder ein deutlicher Effekt des Testzeitpunktes auf die Reaktionszeit zu finden. In der einfacheren 0-back Aufgabe sind diese nachmittags unter allen Bedingungen kürzer als am Vormittag. Im linearen Modell zeigt sich dieser Effekt ebenfalls signifikant. Auch in der 2-back Aufgabe reagierten die Probanden am Nachmittag schneller als in der Vormittagstestung. Unter UMTS ging die Beschleunigung in den Reaktionen nachmittags auf Kosten der Arbeitsgüte im komplexeren 2-back task, denn die Anzahl der richtigen Reaktionen war nachmittags signifikant geringer. Auch unter GSM nahm die Anzahl der Richtigen ab, allerdings ohne Abnahme der Reaktionszeit.

In einer einfachblinden cross-over Studie von Koivisto et al. (2000b) zur Beeinflussung der Leistung im Arbeitsgedächtnis absolvierten 48 rechtshändige gesunde Probanden (je 24 Männer und Frauen) im Alter von 18 bis 34 Jahren eine n-back Aufgabe, wobei die Schwierigkeitsgrade von 0 bis 3 variierten. Die Aufgabe bestand darin, auf einzeln dargebotene Buchstaben zu reagieren. Auf Target-Reize war eine Reaktion mit dem rechten Zeigefinger verlangt, auf Non-Target Reize musste mit dem rechten Mittelfinger reagiert werden. Im 0-back task war dann eine Reaktion verlangt, wenn der Buchstabe „x“ erschien. In der 1-back Bedingung fungierte als Target-Stimulus der letzte Buchstabe, welcher dem zuvor präsentierten entsprach, aber eine andere Groß- oder Kleinschreibung aufwies (z.B. f-F). In der 2- und 3-back Aufgabe folgten zwischen den beiden Buchstaben einer bzw. zwei weitere (z.B. f-G-F; M-h-k-m). Die Exposition erfolgte mit einem gepulsten (217 Hz) 902 MHz GSM-Signal. Lediglich die Interaktion Exposition x Schwierigkeitsgrad x Typ (Target – Non-Target) erwies sich als signifikant ($p < 0.01$). In einer für Targets und non-Targets getrennt durchgeführten Varianzanalyse erwies sich für die Targets der Interaktionsterm Exposition x Schwierigkeitsgrad als signifikant. Eine für Aufgaben mit unterschiedlichem Schweregrad getrennt durchgeführte Analyse ergab, dass in der schwierigsten Bedingung (3-back Aufgabe) ein statistisch signifikanter Effekt ($p < 0.05$) im Sinne einer Beschleunigung der Reaktionszeit zu beobachten war, für alle anderen Aufgaben dagegen nicht. Für non-Targets ließ sich kein statistisch signifikanter Effekt der Exposition erkennen. Eine entsprechende Varianzanalyse für die Anzahl der Fehler ergab keine Hinweise auf einen Einfluss der Exposition.

Eine weitere Publikation aus dem Jahr 2000 der finnischen Arbeitsgruppe um Hämäläinen (Krause et al., 2000b) beschreibt die gleichen Ergebnisse zur Auswirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich (GSM 916,2 MHz Signal, 217Hz) auf die Bearbeitung einer visuellen n-back Aufgabe: Unter EMF kam es ebenfalls zu einer signifikanten Verringerung der Reaktionszeit auf Target-Stimuli in der 3-back Task bei 24 Versuchspersonen vergleichbaren Alters und Geschlechts wie bei Kovisto et al. (2000b) dargestellt. In den einfacheren Aufgaben (0-, 1-, 2-

back) trat dieser Effekt nicht auf. Es zeigten sich keine signifikante Auswirkungen auf die Reaktionszeiten auf Non-Target Stimuli und auf die Fehlerrate für beide Arten von Stimuli.

Auch in unserer Studie verringerte sich die Reaktionszeit signifikant unter UMTS in der schwierigeren Version (2-back Task), allerdings wurde dieser Effekt nicht bei GSM-Exposition beobachtet.

In einer akustischen Variante des n-back Task fand sich kein Effekt von GSM 902 MHz (217 Hz) auf die Anzahl der falschen Reaktionen (Krause et al., 2000a) bei 14 Probanden.

Haarala und Mitarbeiter publizierten 2004 die Resultate zum „n-back Test“ aus ihrer Replikationsstudie zu Koivisto et al. (2000a, 2000b). Es zeigten sich keine Effekte von 902 MHz (moduliert mit 217Hz) auf die Reaktionszeit und die Genauigkeit in der Bearbeitung bei den 64 untersuchten Probanden. So auch nicht in einer weiteren Studie von Haarala et al. (2007) bei Anwendung des n-back Tasks (4 Schwierigkeitsgrade) und unter Exposition mit GSM 902 MHz, sowohl gepulst mit 217 Hz, als auch als kontinuierliches Signal, bei 48 Probanden.

Krause und Mitarbeiter publizierten 2007 eine Replikationsstudie zu ihren Experimenten, die 2000 und 2004 (Krause et al. 2000a, 2000b, 2004; siehe auch Literaturübersicht A 4.2) veröffentlicht wurden. Eine Gruppe von 36 Probanden bearbeitete eine visuelle Gedächtnisaufgabe (n-back Task), jeweils unter 3 verschiedenen Expositionsbedingungen: Scheinexposition, kontinuierliches 902 MHz EMF (Power: 0.25 W), mit 217 Hz moduliertes 902 MHz EMF. Die Expositionsbedingungen beeinflussten die behavioralen Maße „Anzahl der Richtigen“ und „Reaktionszeit“ nicht.

In der Studie von Regel et al. (2006) wurden 84 Personen (43 Frauen, 41 Männer) untersucht, die sich selbst als „sensitiv“ gegenüber EMF bezeichneten, sowie 33 „Nicht-sensitive“ (14 Frauen, 19 Männer). Die Probanden bearbeiteten unter einer von drei möglichen Expositionsbedingungen (Schein, UMTS 1 V/m, UMTS 10 V/m; SAR: 6.2 ± 1.8 und 620 ± 180 $\mu\text{W}/\text{kg}$ für 1 V/m und 10 V/m) sechs verschiedene kognitive Tests, darunter auch eine n-back Aufgabe (1-, 2-, 3- back). In der Gruppe der „Nicht-Sensitiven“ nahm die Genauigkeit der Bearbeitung im 1-Back Task unter UMTS 10V/m-Exposition ab. Dieses Ergebnis war aber nach Anwendung einer Bonferroni-Korrektur nicht mehr signifikant. Die Reaktionszeiten in den n-back Tasks blieben unbeeinflusst. Zum Verlauf der Leistungen stellten Regel et al. (2006) fest, „in the course of the entire study, subjects got faster in all tasks ($p < 0.02$) except the SRT [simple reaction time].“

In einer weiteren Studie von Regel et al. (2007) absolvierten 24 Probanden während 30 Minuten dauernder linksseitiger Exposition unter anderem einen n-Back Test. Es gab drei unterschiedliche Expositionsbedingungen: GSM 900 MHz, entweder als kontinuierliches Signal oder moduliert (2, 8, 217, 1733 MHz) oder Scheinexposition. Mit zunehmender Dauer der Exposition (Pulsmodulation) verbesserte sich die Genauigkeit im n-back Task mit der höchsten Anforderung an die kognitive Leistungsfähigkeit (3-back Task). Die Reaktionszeiten in der 2-back und 3-back Aufgabe verringerten sich.

Eine Reduktion des Mittelwertes der Reaktionszeiten konnte zwar auch in unserer Studie festgestellt werden, allerdings nicht unter GSM. Lediglich unter UMTS kam es unter der gleichzeitigen

Berücksichtigung der Exposition und der Tageszeit zu einer Abnahme der Reaktionszeit in der schwierigeren 2-back Bedingung. Die Bearbeitungsgüte, gemessen in der Anzahl der richtigen Reaktionen, blieb auch in unserer Studie unbeeinflusst von der Art der Exposition. Der Tageszeitpunkt wirkte sich hingegen auf den Mittelwert der Reaktionszeiten signifikant aus: Nachmittags reagierten die Probanden unter allen drei Expositionsbedingungen (Sham, GSM, UMTS) in der 0-back Aufgabe schneller als vormittags. In der 2-back Aufgabe nahm hingegen die Anzahl der richtigen Antworten nachmittags ab. Damit schlug sich die Tageszeit wesentlich deutlicher nieder als ein möglicher Effekt von elektromagnetischen Feldern.

Zusammenfassung der Ergebnisse zum Tag

Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Expositionsbedingung und des Testzeitpunktes waren in 5 von insgesamt 39 Leistungsparametern signifikante Veränderungen unter GSM900 zu beobachten. Diese 5 Signifikanzen traten in 3 von 8 Tests auf. Im Oddball-Paradigma und im Vigilanztest nahm der Mittelwert der Reaktionszeit ab, in der optischen Teilaufgabe des Tests zur Geteilten Aufmerksamkeit hingegen zu. Wird die Anzahl der Zufälligkeit statistisch bedeutsamer Ereignisse bei multiplen Tests berücksichtigt, bleibt unter GSM900 keine Reaktionszeit mehr signifikant.

Unter UMTS unterschieden sich 2 von 39 Testparameter signifikant von den Ergebnissen in der Scheinbedingung. Dies betraf 2 von 8 Tests. Der Median der Reaktionszeiten im optischen Subtest der Geteilten Aufmerksamkeit nahm zu und der Mittelwert der Reaktionszeiten im schwierigeren von zwei Tests zum Arbeitsgedächtnis ab. Nach Berücksichtigung der Anzahl der Leistungsparameter pro Test aufgrund der Anwendung mehrfacher Signifikanztests sind die gefundenen Unterschiede unter UMTS als nicht länger bedeutsam zu werten.

Wie in den einzelnen Abschnitten auch diskutiert, war in fast allen Tests in mindestens einem Parameter pro Test ein tageszeitlicher Effekt zu sehen, der sich in Form einer besseren Leistung am Nachmittag niederschlug. Ein deutlich höheres Aktivierungsniveau am Nachmittag, welches sich in der Pupillometrie, im Alpha Attenuation Test und v.a. im Wach-EEG widerspiegelte, dürfte diesen Verbesserungen zugrunde liegen, auch wenn gewisse Übungseffekte nicht vollkommen ausgeschlossen werden können. Die tageszeitlichen Effekte auf die Leistung waren damit wesentlich stärker ausgeprägt als etwaige Expositionseffekte.

E Literatur

- Aeschbach D, Dijk DJ, Trachsel L, Brunner DP, Borbély AA 1994: Dynamics of slow-wave activity and spindle frequency activity in the human sleep EEG: effect of midazolam and zopiclone - *Neuropsychopharmacology* 11, 237-244.
- Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale (AFSSE) (Hrsg.) 2003: Avis de l'AFSSE sur la téléphonie mobile. S1-18.
- Åkerstedt T, B Arnetz, G Ficca, LE Paulsson and A Kallner 1999: A 50 Hz electromagnetic field impairs sleep. – *J Sleep Res* 8, 77-81.
- Anderer P, Gruber G, Parapatics S, Woertz, Miazhynskaia T, Klösch G, Saletu B, Zeitlhofer J, Barbanoj MJ, Danker-Hopfe H, Himanen SL, Kemp B, Penzel T, Grözinger M, Kunz D, Rappelsberger P, Schlögl A, Dorffner G. 2005: An E-health solution for automatic sleep classification according to Rechtschaffen and Kales: Validation study of the Somnolyzer 24x7 utilizing the Siesta database. – *Neuropsychobiology* 51, 115-133.
- Anderer P, Klösch G, Gruber G, Trenker E, Pascual-Marqui RD, Zeitlhofer J, Barbanoj MF, Rappelsberger P, Saletu B 2001: Low-resolution brain electromagnetic tomography revealed simultaneously active frontal and parietal sleep spindle sources in the human cortex. – *Neuroscience*; 103, 581-592.
- Anderer P, Roberts SJ, Schlögl A, Gruber G, Klösch G, Herrmann WM, Rappelsberger P, Filz O, Barbanoj MJ, Dorffner G, Saletu B 1999: Artifact processing in computerized analysis of sleep EEG – a review. – *Neuropsychobiology* 3, 150-157.
- Anderer P, Saletu B, Saletu-Zyhlarz GM, Gruber G, Parapatics S, Miazhynskaia T, Woertz M, Rosipal R, Klösch G, Zeitlhofer J, Dorffner G 2006: Electrophysiological evaluation of sleep. In: Kinoshita T (ed) Textbook for the Training Course of the International Pharmaco-EEG Society, September 7&8, 2006, in the Awaji Island of Hyogo Prefecture, Japan 107-129.
- Arai N, H Enomoto, S Okabe, K Yuasa, Y Kamimura and Y Ugawa 2003: Thirty minutes mobile phone use has no short-term adverse effects on central auditory pathways. – *Clin Neurophysiol.* 114, 1390-1394.
- Bahr A, H Dorn, and T Bolz 2006: Dosimetric assessment of an exposure system for simulating GSM and WCDMA mobile phone usage, – *Bioelectromagnetics* 27 (4), 320- 327.
- Bahr A, C Adami, T Bolz, A Rennings, H Dorn and L Rüttiger 2007: Exposure setups for laboratory animals and volunteer studies using body-mounted antennas. – *Rad. Prot. Dos.*
- Bak M, M Sliwinska-Kowalska, M Zmyslony and A Dudarewicz 2003: No effects of acute exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on brainstem auditory potentials in young volunteers. – *Int J Occup Med Environ Health* 16, 201-208.

- Begley DJ und F Gollnick 2003: Bericht zum FGF-Workshop in Reisenburg über mögliche Einflüsse von Mobilfunkfeldern auf die Blut-Hirn-Schranke. – Forschungsgemeinschaft e.V. Newsletter 11 (4), 2 – 7.
- Benischke A, D Bunke, C Küppers und C Wassilew-Reul 2000: Gutachten zum Erkenntnisstand zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks. – Gutachten im Auftrag von T-Mobil.
- Berger H 1929: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. – Arch. Psychiat. Nervenkrankh 87, 527-570.
- Beset A, F Espa, Y Dauvilliers, M Billiard and R de Seze 2005: No effect on cognitive function from daily mobile phone use. - *Bioelectromagnetics* 26(2), 102-108.
- Birbaumer N, Schmidt RF 5. Aufl. 2003: *Biologische Psychologie*. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Blois R, Gaillard JM, Attali P, Coquelin JP 1993: Effect of zolpidem on sleep in healthy subjects: a placebo-controlled trial with polysomnographic recordings - *Clin Ther* 15, 797-809.
- Bonnet MH, Moore SE 1982: The threshold of sleep: perception of sleep as a function of time asleep and auditory threshold - *Sleep* 5, 267-276.
- Borbély AA, R Huber, T Graf, B Fuchs, E Gallmann and P Achermann 1999: Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. – *Neuroscience Letters* 275, 207-210.
- Brunner DP, Dijk DJ, Munch M, Borbély AA 1991: Effect of zolpidem on sleep and sleep EEG spectra in healthy young men - *Psychopharmacology (Berl)* 104, 1-5.
- Brunner DP, Vasko RC, Detka CS, Monahan JP, Reynolds CF III, Kupfer DJ 1996: Muscle artifacts in the sleep EEG: Automated detection and effect on all-night EEG power spectra. – *J Sleep Res* 5, 155-164.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg) 2002: Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Workshop vom 22. November 2000 in Berlin. – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin.
- Buysse DJ, CF Reynolds 3rd, TH Monk, SR Berman and DJ Kupfer 1989: The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. – *Psychiatry Res* 28, 193-213.
- Callicott JH, Venkata SM, Bertolino A, Finn K, Coppola R, Frank JA, Goldberg TE and Weinberger D 1999: Physiological characteristics of capacity constraints in working as revealed by functional MRI. – *Cerebral Cortex* 9, 20-26.
- Cinèl C, A Boldini, R Russo and E Fox 2007: Effects of mobile phone electromagnetic fields on an auditory order threshold task. - *Bioelectromagnetics*.

- Cook CM, AW Thomas and FS Prato 2002: Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: A review of recent studies. - *Bioelectromagnetics* 23, 144-157.
- COST Action 281 (Hrsg.) 2001: Scientific Comment on Individual Statements of Concern About Health Hazards of Weak EMF. S1-11.
- Croft RJ, JS Chandler, AP Burgess, RJ Barry, JD Williams and AR Clarke 2002: Acute mobile phone operation affects neural function in humans. – *Clinical Neurophysiology* 113, 1623-1632.
- Croft RJ, DL Hamblin, J Spong, AW Wood, RJ McKenzie and C Stough 2007: The effect of mobile phone electromagnetic fields on alpha rhythm of human electroencephalogram. – *Bioelectromagnetics* DOI 10.1002/bem.20352.
- Curcio G, M Ferrara, F Moroni, G D'Inzeo, M Bertini and L De Gennaro 2005: Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness. - *Neurosci Res* 53(3), 265-270.
- Curcio G, M Ferrara, L De Gennaro, R Cristiani, G D'Inzeo and M Bertini 2004: Time-course of electromagnetic field effects on human performance and tympanic temperature. - *Neuroreport* 15(1), 161-164.
- D'Andrea JA, CT Chou, S Johnson and ER Adair 2003b: Microwave effects on the nervous system. - *Bioelectromagnetics Suppl.* 6, S107-S147.
- D'Andrea JA, ER Adair and JO de Lorge 2003a: Behavioral and cognitive effects of microwave exposure. - *Bioelectromagnetics Suppl.* 6, S39-S62.
- Danker-Hopfe H and H Dorn 2005a: Biological effects of electromagnetic fields at mobile phone frequencies on sleep: current state of knowledge from laboratory studies. – *Somnologie* 9, 192-198.
- Danker-Hopfe H und H Dorn 2004a: Untersuchungen an Probanden unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen. Literaturstudie zum Einfluss von EMF auf das Zentrale Nervensystem erstellt im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz.
- Danker-Hopfe H, M Schäfer, H Dorn, P Anderer, B Saletu, G Gruber, J Zeitlhofer, D Kunz, MJ Barbanj, SL Himanen, B Kemp, T Penzel, J Röschke and G Dorffner 2005b: Percentile reference charts for selected sleep parameters from the SIESTA database. - *Somnologie* 9, 3-14.
- Danker-Hopfe H, S Kraemer, H Dorn, A Schmidt, I Ehlert and WM Hermann 2001: Time-of-day variations in different measures of sleepiness (MSLT, pupillography, and SSS) and their interrelations. - *Psychophysiology* 38, 828-835.

- Danker-Hopfe H und H Dorn 2004b: Biologische Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich auf den Schlaf: gegenwärtiger Kenntnisstand aus Laborstudien. – EMF Monitor 10, 1-6.
- Danker-Hopfe H, C Sauter, R Popp und die Arbeitsgruppe Vigilanz 2006: Ergebnisse einer Multicenterstudie – Normierungsstudie zum pupillographischen Schläfrigkeitstest. - Somnologie 10 (Suppl. 1), 10.
- DASY 1995: Referenzliste der installierten DASY-Systeme mit RX90 Robotern: Deutsche Telekom, Forschungs- und Technologiezentrum; Motorola Cellular - MRO; Motorola; Ericsson Mobile Communications AB; Nokia Mobile Phones LTD; IMST GmbH, 1995.
- DASY 4: Schmid & Partner Engineering AG: DASY4 Manual. March 2003.
- D'Costa H, G Trueman, L Tang, U Abdel-rahman, W Abdel-rahman, K Ong, I Cosic 2003: Human brain wave activity during exposure to radiofrequency field emissions from mobile phones. - Australas Phys Eng Sci Med 26(4), 162-167.
- De Gennaro L, Ferrara M, Bertini M 2000: Effect of slow-wave sleep deprivation on topographical distribution of spindles - Behav Brain Res 116,55-59.
- Delorme A and S Makeig 2004: EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. – J Neurosci Methods 143(1), 9-21.
- Edelstyn N and A Oldershaw 2002: The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention. – NeuroReport 13, 119-121.
- Eliyahu I, R Luria, R Hareuveny, M Margaliot, N Meiran and G Shani 2006: Effects of radiofrequency radiation emitted by cellular telephones on the cognitive functions of humans. - Bioelectromagnetics 27(2), 119-126.
- EN50361: European Standard EN 50361: Basic Standard for the Measurement of Specific Absorption Rate Related to Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones (300 MHz – 3 GHz), CENELEC, Brussels, July 2001.
- Eulitz C, P Ullsperger und G Freude 2002: Zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobiltelefonen auf die oszillatorische Hirnaktivität des Menschen. - In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp137-146.
- Eulitz C, P Ullsperger, G Freude and T Elbert 1998: Mobile phones modulate response patterns of human brain activity. – Neuroreport 8(14), 3229-3232.
- Ferreri F, G Curcio, P Pasqualetti, L De Gennaro, R Fini and PM Rossini 2006: Mobile phone emissions and human brain excitability. - Ann Neurol 60(2), 188-196.

- Finelli LA, P Achermann und AA Borbély 2001: Individual ‚fingerprints‘ in human sleep EEG topography. – *Neuropsychopharmacology* 25, Suppl. 5, S57-S62.
- Freude G, P Ullsperger, S Eggert und I Ruppe 1998: Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials. – *Bioelectromagnetics* 19, 384-387.
- Freude G, P Ullsperger, S Eggert und I Ruppe 2000: Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. – *European Journal of Applied Physiology* 81, 18-27.
- Freude G, P Ullsperger, S Eggert und I Ruppe 2002: Zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobiltelefonen auf langsame Hirnpotentiale. - In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp128-136.
- Freude G, P Ullsperger, U Erdmann 1999: Slow brain potentials in a visual monitoring task. - *Int J Psychophysiol* 33(3), 231-241.
- Fritzer G, L Friege, R Göder, G Pannier, J Wachter und J Aldenhoff 2000: Kurz- und Langzeitauswirkung elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf die Qualität des menschlichen Schlafes und der hieraus resultierenden Tagesempfindlichkeit. Studie der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Kiel, Schlafmedizinisches Labor. - zitiert aus Silny J 2000: Gesundheitliche Auswirkungen der Mikrowellen von Mobilfunkanlagen im D-Netz. – Gutachten im Auftrag von T-Mobil.
- Fritzer G, R Goder, L Friege, J Wachter, V Hansen, D Hinze-Selch and JB Aldenhoff 2007: Effects of short- and long-term pulsed radiofrequency electromagnetic fields on night sleep and cognitive functions in healthy subjects. - *Bioelectromagnetics* 28(4), 316-25.
- Gais S, Molle M, Helms K, Born J 2002: Learning-dependent increase in sleep spindle density - *J Neurosci* 22, 6830 – 6834.
- Gehlen W, JF Spittler und P Calabrese 1996: Biologisch-zerebrale Effekte in niederfrequent gepulsten Hochfrequenzfeldern. – *Forschungsgemeinschaft Funk, Edition Wissenschaft* 12, 3 –28.
- Gerloff C 2005: Ereignis-korrelierte Potentiale (EKP). - In: Stöhr M, Dichgans J, Buettner U, Hess C, Altenmüller E, (Hrsg.): *Evozierte Potentiale*. – Springer Medizin Verlag, Heidelberg, pp 499-538.
- Glaser R 2000: Darstellung und Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks in Relation zu bestehenden Empfehlungen und Normen. – Gutachten im Auftrag von T-Mobil.
- Graf T, R Huber, AA Borbély, N Kuster, J Schuderer und P Achermann 2002: Effects of EMF on sleep and the sleep EEG - Recent results from two studies carried out in Zurich. - In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 171-178.

- Haarala C, F Takio, T Rintee, M Laine, M Koivisto, A Revonsuo and H Hamalainen 2007: Pulsed and continuous wave mobile phone exposure over left versus right hemisphere: effects on human cognitive function. - *Bioelectromagnetics* 28(4), 289-295.
- Haarala C, L Björnberg, M Ek, M Laine, A Revonsuo, M Koivisto and H Hämäläinen 2003a: Effect of a 902 MHz electromagnetic field emitted by mobile phones on human cognitive function: A replication study. – *Bioelectromagnetics* 24, 283-288.
- Haarala C, M Ek, L Bjornberg, M Laine, A Revonsuo, M Koivisto and H Hamalainen 2004: 902 MHz mobile phone does not affect short term memory in humans. - *Bioelectromagnetics* 25(6), 452-456.
- Haarala C, S Aalto, H Hautzel, L Julkunen, JO Rinne, M Laine, B Krause and H Hämäläinen 2003b: Effects of a 902 MHz mobile phone on cerebral blood flow in humans: a PET study. – *Neuroreport* 14(16), 2019-2023.
- Hamblin DL and Wood AW 2002: Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables. - *Int J Radiat Biol.* 78, 659-669.
- Hamblin DL, AW Wood, RJ Croft and C Stough 2004: Examining the effects of electromagnetic fields emitted by GSM mobile phones on human event-related potentials and performance during an auditory task. – *Clin Neurophysiol* 115, 171-178.
- Hamblin DL, RJ Croft, AW Wood, C Stough and J Spong 2006: The sensitivity of human event-related potentials and reaction time to mobile phone emitted electromagnetic fields. - *Bioelectromagnetics* 27(4), 265-273.
- Health Council of the Netherlands 2000: GSM base stations. – The Hague: Health Council of the Netherlands; publication no. 2000/16E.
- Health Council of the Netherlands 2002: Mobile telephones; an evaluation of health effects. – The Hague: Health Council of the Netherlands; publication no. 2002/01E.
- Health Council of the Netherlands 2003: Health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Recommendations for research. – The Hague: Health Council of the Netherlands; publication no. 2003/03.
- Health Council of the Netherlands 2004: Electromagnetic fields: Annual update 2003. – The Hague: Health Council of the Netherlands; publication no. 2004/01.
- Hegerl U 1998: Ereigniskorrelierte Potentiale. – In: Hegerl U (Hrsg): *Neurophysiologische Untersuchungen in der Psychiatrie. EEG, EKP, Schlafpolygraphie, Motorik, autonome Funktionen.* – Springer, Wien, New York, pp 95-140.
- Hennies K., Neitzke H.-P. & Voigt H. 2000: Mobilfunk und Gesundheit. Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes. – Gutachten im Auftrag von T-Mobil.

- Hermann DM and KA Hossmann 1997: Neurological effects of microwave exposure related to mobile communication. - *Journal of the Neurological Sciences* 152, 1-14.
- Herrmann WM und E Schärer 1987: Pharmako-EEG. Grundlagen – Methodik – Anwendung. Einführung und Leitfaden für die Praxis. Landsberg/Lech: ecomed.
- Herrmann WM, S Kubicki, H Künkel, J Kugler, D Lehmann, K Maurer, P Rappelsberger und W Scheuler 1989: Empfehlungen der Deutschen EEG-Gesellschaft für das Mapping von EEG-Parametern. – *Z. EEG-EMG* 20, 125-132.
- Hietanen M, Kovala T, Hämäläinen AM, Velin R and P von Nandelstadh 1997: EEG activity of the human brain during exposure to cellular phones. – Abstract for the Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Bologna, Italy, 272-273.
- Hietanen M, T Kovala and AM Hämäläinen 2000: Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones. - *Scand J Work Environ Health* 26, 87-92.
- Hinrichs H 2002: Studies on interference of GSM high frequency electromagnetic fields and central nervous system: Electroencephalogram, sleep structure, evoked potentials, event related potentials event related desynchronisation / synchronisation. – In: BAuA (Hrsg) *Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen?* – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 86-109.
- Hinrichs H and HJ Heinze 2004: Effects of GSM electromagnetic field on the MEG during an encoding-retrieval task. - *Neuroreport* 15(7), 1191-1194.
- Hinrichs H and HJ Heinze 2006: High frequency GSM-1800 fields with various modulations and field strengths: No short term effect on human awake EEG. Publikation der FGF-Edition *Wissenschaft* 23, 4-11.
- Hinrichs H und HJ Heinze 1998: Neurophysiologisch messbare Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des GSM-1800-Netzes auf das Schlafverhalten gesunder Erwachsener. – *Kleinheubacher Berichte* 41, 105-110.
- Hinrichs H, HJ Heinze and M Rotte 2005: Human sleep under the influence of a GSM 1800 electromagnetic farfield. – *Somnologie* 9, 185-191.
- Hladky A, J Musil, Z Roth, P Urban and V Blazkova 1999: Acute effects of using a mobile phone on CNS functions. – *Cent Eur J Public Health* 7, 165-167.
- Hoffmann RM, T Müller, G Hajak und W Cassel 1997: Abend-Morgenprotokolle in Schlafforschung und Schlafmedizin – Ein Standardinstrument für den deutschsprachigen Raum. – *Somnologie* 3, 103-109.
- Horne JA and O Östberg 1976: A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. - *Int J Chronobiol* 4, 97-110.

- Hossmann KA and Hermann DM 2002: Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. Review of international research. – In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 62-85.
- Hossmann KA and Hermann DM 2003: Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. – *Bioelectromagnetics* 24, 49-62.
- Huber R, J Schuderer, T Graf, K Jütz, AA Borbély, N Kuster, and P Achermann 2003: Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: Estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate. – *Bioelectromagnetics* 24, 262-276.
- Huber R, T Graf, KA Cote, L Wittmann, E Gallmann, D Matter, J Schuderer, N Kuster, AA Borbély and P Achermann 2000: Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG. – *NeuroReport* 11, 3321-3325.
- Huber R, V Treyer, AA Borbély, J Schuderer, JM Gottselig HP Landolt, E Werth, T Berthold, N Kuster, A Buck and P Achermann 2002: Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional blood flow and sleep and waking EEG. – *J Sleep Res* 11, 289-295.
- Hung CS, C Anderson, JA Horne and P McEvoy 2007: Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset. - *Neurosci Lett* 421(1), 82 - 86.
- Hutter HP, H Moshhammer, P Wallner und M Kundi 2001: Zur Frage gesundheitlich relevanter Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern des Mobilfunkfs. – *Umweltmed Forsch Prax* 6, 309 – 320.
- Hyland G 2001: The physiological and environmental effects of non-ionizing electromagnetic radiation. - Working document for the STOA (Scientific and Technological Options Assessment) panel of the Directorate A (Division Industry, Research and Energy) of the Directorate General for Research of the European Commission (EP/IV/A/STOA/2000/07/03).
- ICNIRP Guidelines 1998: Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)- – *Health Physics* 74(4), 494 - 522.
- IEEE Std C95.1-1999: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. – Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Independent Expert Group on Mobile Phones (IEGMP) 2000: „Stewart Report“ Mobile Phones and Health. – Bericht erstellt im Auftrag der britischen Regierung.
- Institution of Electrical Engineers (IEE) 2002: The possible harmful biological effects of low level electromagnetic fields of frequencies up to 300 GHz. IEE Position Statement – May 2002.

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) 1998: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).
- Jahre K, K Matkey und HJ Meckelburg (CETECOM) 1996: Der Einfluß von gepulsten elektromagnetischen Feldern auf das Elektroenzephalogramm von Menschen. - Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 9.
- Jasper HH 1958: The ten-twenty electrode system of the international federation. – *Electroencephalography Clin Neurophysiol* 10, 371-375.
- Jech K, K Šonka, E Růžička, A Nebuželský, J Böhm, M Juklíčková and S Nevšimalová 2001: Electromagnetic field of mobile phones affects visual event related potentials in patients with narcolepsy. – *Bioelectromagnetics* 22, 519-528.
- Jensen FV 1996: *An Introduction to Bayesian Networks*. – London UCL Press.
- Jobert M, E Poiseau, P Jahmig, H Schulz and S Kubicki 1992a: Pattern recognition by matched filtering: an analysis of sleep spindle and K-complex density under the influence of lormetazepam and zopiclone - *Neuropsychobiology* 26,100-107.
- Jobert M, E Poiseau, P Jahmig, H Schulz and S Kubicki 1992b: Topographical analysis of sleep spindle activity - *Neuropsychobiology* 26, 210-217.
- Johns MW 1991: A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. – *Sleep* 14, 540-545.
- Keetley V, AW Wood, J Spong and C Stough 2006: Neuropsychological sequelae of digital mobile phone exposure in humans. - *Neuropsychologia* 44(10), 1843-1848.
- Kemp B, AH Zwinderman, B Tuk, HA Kamphuisen and JJ Oberye 2000: Analysis of sleep-dependent neuronal feedback loop: the slow wave microcontinuity of the EEG. – *IEEE Trans Biomed Eng* 47, 1185-1194.
- Kemp B, A Värrí A, AC Rosa, KD Nielsen, J Gade 1992: A simple format for exchange of digitized polygraphic recordings. - *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 88, 391-393.
- Klösch H, B Kemp, T Penzel, A Schlögl, P Rappelsberger, E Trenker, G Gruber, J Zeitlhofer, B Saletu, WM Herrmann, SL Himanen, D Kunz, MJ Barbanoj, J Röschke, A Värrí and G Dorffner 2001: The SIESTA project polygraphic and clinical database. – *IEEE Engineering in Medicine and Biology* 20, 51-57.
- Koivisto M, A Revonsuo, C Krause, C Haarala, L Sillanmäki, M Laine and H Hämäläinen 2000a: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. – *Neuroreport* 11(2), 413-415.
- Koivisto M, C Haarala, CM Krause A Revonsuo, M Laine and H Hämäläinen 2001: GSM phone signal does not produce subjective symptoms. – *Bioelectromagnetics* 22, 212-215.

- Koivisto M, CM Krause, A Revonsuo, M Laine and H Hämäläinen 2000b: The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory. – *Neuroreport* 11(8), 1641-1643.
- Kraemer S, H Danker-Hopfe, H Dorn, A Schmidt, I Ehlert, WM Herrmann 2000: Time-of-day variations of indicators of attention: performance, physiologic parameters, and self-assessment of sleepiness. – *Biol Psychiatry*, 1;48(11), 1069-80.
- Krafczyk S, K Bötzel, S Schulze, PE Haberhauer, N Mai, J Brix und O Scheel 1998: Messung des Einflusses gepulster Mikrowellen auf die Hirnstromaktivität des Menschen. - <http://www.umweltministerium.bayern.de/aktuell/download/leitfad/handy.pdf>
- Krafczyk S, PE Haberhauer, K Bötzel und J Brix 2002: Sind EMF - Effekte auf das Ruhe-EEG und evozierte Hirnpotentiale nachweisbar? - In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 147-162.
- Kramarenko AV and U Tan 2003: Effects of high-frequency electromagnetic fields on human EEG: A brain mapping study. – *Int J Neurosci* 113, 1007-1019.
- Krause CM, M Pesonen, C Haarala Bjornberg and H Hamalainen 2007: Effects of pulsed and continuous wave 902 MHz mobile phone exposure on brain oscillatory activity during cognitive processing. - *Bioelectromagnetics* 28(4), 296-308.
- Krause, CM, C Haarala, L Sillanmäki, M Koivisto, K Alanko, A Revonsuo, M Laine and H Hämäläinen 2004: Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during an auditory memory task: A double blind replication study. – *Bioelectromagnetics* 25, 33-40.
- Krause, CM, L Sillanmäki, M Koivisto, A Häggquist, C Saarela, A Revonsuo, M Laine and H Hämäläinen 2000b: Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the electroencephalogram during a visual working memory task. - *Int J Radiat Biol* 76, 1659-1667.
- Krause, CM, L Sillanmäki, M Koivisto, A Häggqvist, C Saarela, A Revonsuo, M Laine and H Hämäläinen 2000a: Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the EEG during a memory task. - *NeuroReport* 11, 761-764.
- Krause, CM, M Koivisto, L Sillanmäki, A Häggquist, C Saarela, C Haarala, A Revonsuo, M Laine and H Hämäläinen 2002: EMF - effects of mobile phones on human performance and EEG oscillatory activity. - In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 119-127.
- Kreuzer M, R Mathes, C Pölzl, W Weiss und G Ziegelberger 2003: Tagungsbericht: 2. Fachgespräch des Bundesamts für Strahlenschutz zum Thema: „Forschungsprojekte zur Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks“, Berlin, 25. September 2003 (www.deutsches-mobilfunk-forschungsprogramm.de).

- Kubicki S and HW Herrmann 1996: The future of computer-assisted investigation of the polysomnogram: sleep microstructure - *J Clin Neurophysiol*, 13, 285-294.
- Larsen LH and PN Prinz 1991: EKG artifacts suppression from the EEG. – *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 79, 241-244.
- Lebedeva NN, AV Sulimov, OP Sulimova, TO Korotkovskaya and T Gailus 2001: Investigation of brain potentials in sleeping humans exposed to the electromagnetic field of mobile phones. – *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 29, 125-133.
- Lebedeva NN, AV Sulimov, OP Sulimova, TO Kotrovskaya and T Gailus, 2000: Cellular phone electromagnetic field effects on bioelectric activity of human brain. – *Crit. Rev. Biomed Eng* 28, 323-337.
- Lebet JP, A Barbault, C Rossel, Z Tomic, M Reite, L Higgs, U Dafni, D Amato and B Pasche 1996: Electroencephalographic changes following low energy emission therapy. – *Ann Biomed Eng* 24, 424-429.
- Lee TMC, PK Lam, LTS Yee and CCH Chan 2003: The effect of the duration of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention. – *NeuroReport* 14, 1361-1364.
- Lee TMC, SMY Ho, LYH Tsang, SYC Yang, LSW Li and CCH Chan 2001: Effect on human attention of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones. – *NeuroReport* 12, 729-731.
- Lewis MB 2007. Mobile phones are good for you, $p < 0.36!$ Observations on Keetley, Wood, Spong and Stough (2006). - *Neuropsychologia*, 45(7), 1580-1581.
- Limoges E, L Mottron, C Bolduc, C Berthiaume and R Godbout 2005: Atypical sleep architecture and the autism phenotype - *Brain* 128, 1049-1061.
- Loughran SP, AW Wood, JM Barton, RJ Croft, B Thompson and C Stough 2005: The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep. - *Neuroreport* 16(17), 1973-1976.
- Lüdtke H, Wilhelm B, Adler M, Frank Schaeffel and Helmut Wilhelm 1998: Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves. - *Vision Research Volume* 38(19), 2889-2896.
- Maby E, B Jeannes Rle and G Faucon 2006: Scalp localization of human auditory cortical activity modified by GSM electromagnetic fields. - *Int J Radiat Biol* 82(7), 465-472.
- Maby E, R Le Bouquin Jeannes, G Faucon, C Liegeois-Chavel and R de Seze 2005: Effects of GSM Signals on Auditory Evoked Responses. – *Bioelectromagnetics* 26, 341-350.
- MacKay DJC 1995: Bayesian non-linear modelling for the energy prediction competition. – in: Heidbredder G (ed): *Maximum Entropy and Bayesian Methods*. – Santa Barbara Kluwer.
- Maier R 2001: Mobilfunk-Emissionen und Gedächtnisleistungen. - *Biomed Tech (Berl)* 46, 18-23.

- Maier R, SE Greter and N Maier 2004: Effects of pulsed electromagnetic fields on cognitive processes - a pilot study on pulsed field interference with cognitive regeneration. - *Acta Neurol Scand* 110(1), 46-52.
- Mann K und J Röschke 1996: Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. – *Neuropsychobiology* 33, 41-47.
- Mann K, J Röschke und P Wagner 2002: Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Schlaf-EEG des Menschen. - In: BAuA (Hrsg) Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen? – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 163-170.
- Mbonjo, H. Ndoumbè Mbonjo, J Streckert, A Bitz and V Hansen 2002: Features of a generic UMTS test signal for investigations of biological effects. COST281/EBEA Workshop "Emerging Technologies", Rom, Italy, May 2002.
- McCormick L, T Nielsen, A Nicolas, M Ptito and J Montplaisir 1997: Topographical distribution of spindles and K-complexes in normal subjects. – *Sleep* 20(1), 939-941.
- Michimori A, P Stone, A Aguirre and C Stampi 1994: Analysis of the Alpha Attenuation Test. - *Sleep Research* 23.
- National Radiological Protection Board 2003: Health effects from radiofrequency electromagnetic fields. – Oxfordshire.
- Neitzke H-P, J Osterhoff und H Voigt, 2003: Biologische Wirkungen schwacher HF-Felder und Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition durch Funksendeanlagen. ECOLOG Institut, 1 – 9.
- Niedersächsisches Landesgesundheitsamt 2002: Gesundheitliche Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die Bevölkerung Niedersachsens.
- Östberg O 1976: Zur Typologie der circadianen Phasenlage. Ansätze zur einen praktischen Chronohygiene. In Hildebrandt H (Hrsg.): *Biologische Rhythmen und Arbeit. Bausteine zur Chronobiologie und Chronohygiene der Arbeitsgestaltung*. Springer Verlag Wien, New York pp 117-137.
- Papageorgiou CC, ED Nanou, VG Tsiafakis, CN Capsalis and AD Rabavilas 2004: Gender related differences on the EEG during a simulated mobile phone signal. - *Neuroreport* 15(16), 2557-2560.
- Papageorgiou CC, ED Nanou, VG Tsiafakis, E Kapareliotis, KA Kontoangelos, CN Capsalis, AD Rabavilas and CR Soldatos 2006: Acute mobile phone effects on pre-attentive operation. - *Neurosci Lett* 397(1-2), 99-103.
- Parrino L, Terzano MG 1996: Polysomnographic effects of hypnotic drugs. A review - *Psychopharmacology (Berl)* 126, 1-16.

- Pasche B, M Erman, R Hayduk, MM Mitler, M Reite, L Higgs, N Kuster, C Rossel, U Dafni, D Amato, A Barbault and JP Lebet 1996: Effects of low energy emission therapy in chronic psychophysiological insomnia. – *Sleep* 19, 327-336.
- Penzel T, M Hirshkowitz, J Harsh, RD Chervin, N Butkov, M Kryger, B Malow, MV Vitiello, MH Silber, CA Kushida, and AL Chesson 2007: Digital analysis and technical specifications. – *J Clin Sleep Med* 3, 109-120.
- Posner M and R Rafal 1987: Cognitive theories of attention and the rehabilitation of attentional deficits. In *Neurophysiological Rehabilitation*. Meier M, Benton A, Diller L (editors). Churchill Livingstone, Edinburgh, pp 182–201.
- Preece AW 2002: EMF effects on cognitive functions in humans. - In: BAuA (Hrsg) *Beeinflussen elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen zentralnervöse Informationsverarbeitungsleistungen des Menschen?* – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin pp 110-118.
- Preece AW, G Iwi, A Davies-Smith, K Wesnes, S Butler, E Lim and A Varey, 1999: Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. – *Int J. Radiat Biol* 75 (4), 447-456.
- Rappelsberger P, E Trenker, C Rothmann, G Gruber, P Sykacek, S Roberts, G Klösch, J Zeitlhofer, P Anderer, B Saletu, A Schlögl, A Värri, B Kemp, T Penzel, WM Herrmann, J Hasan, MJ Barbanoj, J Röschke, D Kunz and G Dorffner 2001: Das SIESTA Projekt. – *Klin Neurophysiol* 32, 76-88.
- Rechtschaffen A and A Kales 1968: A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. – Los Angeles, University of California, Brain Information Service/Brain Research Institute.
- Regel SJ, JM Gottselig, J Schuderer, G Tinguely, JV Retey, N Kuster, HP Landolt and P Achermann 2007: Pulsed radio frequency radiation affects cognitive performance and the waking electroencephalogram. - *Neuroreport* 18(8), 803-807.
- Regel SJ, S Negovetic, M Rössli, V Berdinas, J Schuderer, A Huss, U Lott, N Kuster and P Achermann 2006: UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance. - *Environ Health Perspect* 114(8), 1270-1275.
- Reiser H, W Dimpfel and F Schober 1995: The influence of electromagnetic fields on human brain activity.- *Eur J Med Res* 16, 27-32.
- Reite M, L Higgs, JP Lebet, A Barbault, C Rossel, N Kuster, U Dafni, D Amato and B Pasche 1994: Sleep inducing effect of low energy emission therapy. – *Bioelectromagnetics* 15, 67-75.
- Repacholi MH 2001: Health risks from the use of mobile phones.- *Toxicology Letters* 120, 323-331.
- Repacholi MH 2002: Assessment of the health effects of EMF exposure. – *U.R.S.I. Radio Science Bulletin* 301, 14-24.

- Robert SJ 1998: Independent Component Analysis: Source Assessment & Separation, a Bayesian approach. IEE Proceedings – Vision, Image & Signal Processing 145, 149-154.
- Rodenbeck A, R Binder, P Geisler, H Danker-Hopfe, R Lund, F Raschke, HG Weeß and H Schulz 2006: A review of sleep EEG features. Part I: A compilation of amended rules for their visual analysis. – Somnology 10, 159-175.
- Röösli M und R. Rapp 2003: Hochfrequente Strahlung und Gesundheit - eine Literaturübersicht erstellt im Auftrag des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Röösli M, R. Rapp und C Braun-Fahrländer 2003: Hochfrequente Strahlung und Gesundheit - eine Literaturanalyse. - Gesundheitswesen 65, 378-392.
- Röschke J and Mann K 1997: No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. – Bioelectromagnetics 18, 172-176.
- Royal Society of Canada 1999: A review of the potential health risks of radiofrequency fields from wireless telecommunication devices. – An expert report prepared at the request of the Royal Society of Canada for Health Canada.
- Russo R, E Fox, C Cinel, A Boldini, MA Defeyter, D Mirshekar-Syahkal and A Mehta 2006. Does acute exposure to mobile phones affect human attention? - Bioelectromagnetics 27(3), 215-220.
- Sahul Z, J Black, B Widrow and C Guilleminault 1995: EKG artefact cancellation from sleep EEG using adaptive filtering. – Sleep Res 24A, 486.
- Schabus M, G Gruber, S Parapatics, C Sauter, G Klösch, P Anderer, W Klimesch, B Saletu and J Zeitlhofer 2004: Sleep spindles and their significance for declarative memory consolidation – Sleep 27, 1479-1485.
- Schabus M, K Hodlmoser, G Gruber, C Sauter, P Anderer, G Klösch, S Parapatics, B Saletu, W Klimesch and J Zeitlhofer 2006: Sleep spindle-related activity in the human EEG and its relation to general cognitive and learning abilities - Eur J Neurosci. 23,1738-46.
- Schaltenbrand N, R Lengelle and JP Macher 1993: Neural network model: Application to automatic analysis of human sleep. – Comput Biomed Res 26, 157-171.
- Schaltenbrand N, R Lengelle, M Toussaint, R Luthringer, G Carelli, A Jacmin, E Lainey, A Muzet and JP Macher 1996: Sleep stage scoring using the neural network model: Comparison between visual and automatic analysis in normal subjects and patients. – Sleep 19, 26-35.
- Schimicek P, J Zeitlhofer, P Anderer and B Saletu 1994: Automatic sleep-spindle detection procedure: aspects of reliability and validity. – Clin Electroencephalogr 25, 26-29.
- Schlögl A, B Kemp, T Penzel, D Kunz, SL Himanen, A Värrri, G Dorffner and G Pfurtscheller 1999: Quality control of polysomnographic sleep data by histogram and entropy analysis. – Clin Neurophysiol. 110, 2165-2170.

- Schmid G, C Sauter, R Stepansky, IS Lobentanz and J Zeitlhofer 2005: No influence on selected parameters of human visual perception of 1970 MHz UMTS-like exposure. - *Bioelectromagnetics* 26(4), 243-250.
- Schuhfried G. 1993: Wiener Testsystem Daueraufmerksamkeit, Version 3.00. Mödling, Ges.m.b.H
- Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment (CSTEE) 2001: Possible effects of electromagnetic fields (EMF), radio frequency fields (RF) and microwave radiation on human health. – 30 October 2001, C2/JCD/csteep/EMF/RFF30102001/D(01).
- Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment (CSTEE) 2002: Effects of electromagnetic fields on health. – 17 December 2002, C2/VR/csteep/EMF/17122002/D(02).
- Sievert U, S Eggert and HW Pau 2005: Can mobile phone emissions affect auditory functions of cochlea or brain stem? - *Otolaryngol Head Neck Surg* 132(3), 451-455.
- Silber MH, S Ancoli-Israel, MH Bonnet, S Chokroverty, MM Grigg-Dambrger, M Hirshkowitz, S Kapen, SA Keenan, MH Kryger, T Penzel, MR Pressmann and C Iber 2007: The visual scoring of sleep in adults. - *J Clin Sleep Med* 3, 121-131.
- Silny J 2000: Gesundheitliche Auswirkungen der Mikrowellen von Mobilfunkanlagen im D-Netz. – Gutachten im Auftrag von T-Mobil.
- Silny J 2002: Effekte und gesundheitsrelevante Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks und anderer neuerer Kommunikationssysteme. – März 2002, im Auftrag des VDE.
- Smythe JW and B Costall 2003: Mobile phone use facilitates memory in male, but not female subjects. – *NeuroReport* 10, 243-246.
- Spittler JF, P Calabrese und W Gehlen, 1997: Einfluß elektromagnetischer felder auf die menschliche Gehirntätigkeit. – *Medizintechnik* 117, 176-178.
- SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields 2003: Recent Research on Mobile Telephony and Cancer and other selected biological effects: First annual report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields, December 2003.
- Stampi C, P Stone and A Michimori 1993: The Alpha Attenuation Test: A new quantitative method for assessing sleepiness and its relationship to the MSLT. - *Sleep Research* 22, 117.
- Stampi C, A Michimori an A Aguirre 1995: Comparison between three versions of the Alpha Attenuation Test for the objective assessment of sleepiness. – *Sleep Research* 24, 499.
- Steriade M 2005: Brain electrical activity and sensory processing during waking and sleep states. In: Kryger MH, Roth T, Dement WC (eds.): *Principles and Practice of Sleep Medicine* 4th ed., Elsevier, Philadelphia, pp 101-119.

- Steriade M, L Domich, G Oakson and M Deschenes 1987: The deafferented reticular thalamic nucleus generates spindle rhythmicity - *Neurophysiol* 57, 260-273.
- Stöhr M, J Dichgans, U Buettner and C Hess (Hrsg.) 2005: *Evozierte Potentiale*. 4. Auflage, Springer Medizin Verlag, Heidelberg.
- Strahlenschutzkommission 2001: *Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern*.
- Terzano MG, L Parrino and GF Mennuni 1997: *Phasic Events and Microstructure of Sleep*, Lecce, Martano Editore.
- Thuroczy G, G Kubinyi, H Sinay, J Bakos, K Sipos, A Lenart, M Bodo and LD Szabo 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.
- Tillmann T und J Buschmann 2000: *Literaturstudie und Schlussfolgerungen zu möglichen Langzeitwirkungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder insbesondere des Mobilfunks (GSM)*. - FGF Newsletter 4, 14-22.
- Urban P, E Lukás and Z Roth 1998: Does acute exposure to the electromagnetic field emitted by a mobile phone influence visual evoked potentials? A pilot study. – *European Journal of Public Health* 4, 288-290.
- Vecchio F, C Babiloni, F Ferreri, G Curcio, R Fini, C Del Percio and PM Rossini 2007: Mobile phone emission modulates interhemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms. - *Eur J Neurosci* 25(6), 1908-1913.
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) 2002: *Positionspapier Mobilfunk und Gesundheit*. – März 2002.
- Von Klitzing I 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 L 1995: Low-frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. – *Physica Medica* XI, 2, 77-80.
- Wagner P, J. Röschke, K Mann, J Fell, W Hiller, C Frank and M Grözinger 2000: Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. – *Neuropsychobiology* 42, 207-212.
- Wagner P, J. Röschke, K Mann, W Hiller and C Frank 1998: Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions. – *Bioelectromagnetics* 19, 199-202.

- Walter WG, R Cooper, V Aldridge, WC McCallum and AL Winter 1964. Contingent Negative Variation: An Electric Sign of Sensorimotor Association and Expectancy in the Human Brain. - *Nature* 203, 380-384.
- Weeß HG, R Lund, C Gresele, W Böhning, C Sauter and R Steinberg 1998. Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schläfrigkeit. Die Messung müdigkeitsbezogener Prozesse bei Hypersomnien. – *Somnologie* 2, 32–41.
- Weeß H-G, C Sauter, P Geisler, W Böhning, B Wilhelm, M Rotte, C Gresele, C Schneider, H Schulz, R Lund, R Steinberg und Arbeitsgruppe Vigilanz der DGSM 2000: Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schläfrigkeit -Diagnostische Instrumentarien zur Messung müdigkeits- und schläfrigkeitsbezogener Prozesse und deren Gütekriterien. – *Somnologie* 4, 20-38.
- Wiedemann P, H Schütz und A Thalmann 2002: Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog. Mobilfunk und Gesundheit - Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog. Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik, S.1-111.
- Wilen J, A Johansson, N Kalezic, E Lyskov and M Sandstrom 2006. Psychophysiological tests and provocation of subjects with mobile phone related symptoms. - *Bioelectromagnetics* 27(3), 204-214.
- Wilhelm B 2007: Über die Spontanzillationen der Pupille und ihre Beziehung zum zentralnervösen Aktivierungsniveau. – Steinbeiss-Edition Stuttgart/Berlin.
- Wilhelm B, H Giedke, H Ludtke, E Bittner, A Hofmann, H Wilhelm 2001: Daytime variations in central nervous system activation measured by a pupillographic sleepiness test. – *J Sleep Res.* 10(1), 1-7.
- Wilhelm B, H Wilhelm, H Lüdtkke, M Adler and P Streicher 1996: Pupillographie zur objektiven Vigilanzprüfung. - *Ophthalmologie* 93, 446-450.
- Winterer G, M Ziller, H Dorn, K Frick, C Mulert, N Dahhan, WM Herrmann, R Coppola 1999: Cortical activation, signal-to-noise ratio and stochastic resonance during information processing in man. – *Clin Neurophysiol* 110(7), 1193-203.
- World Health Organisation 2002: Herstellen eines Dialogs über die Risiken elektromagnetischer Felder. – WHO Genf.
- Yamadori A 1971: Role of spindles in the onset of sleep. - *J Med Sci* 17: 97-111.
- Yuasa K, N Arai, S Okabe, Y Tarusawa, T Nojima, R Hanajima, Y Terao and Y Ugawa 2006: Effects of thirty minutes mobile phone use on the human sensory cortex. - *Clin Neurophysiol* 117(4):900-905.

- Zimmermann P and B Fimm 2002: A test battery for attentional performance. In: M. Leclercq & P. Zimmermann (eds.). Applied Neuropsychology of Attention. Theory, Diagnosis and Rehabilitation. pp 110-151.
- Zmirou Report 2001: Les téléphones mobiles, leurs stations de base et la santé. Rapport au Directeur Général de la Santé, 16 janvier 2001.
- Zschocke S 1995: Klinische Elektroenzephalographie. - Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Zulley J 2002: Schlafragebogen einer Schlafambulanz. (S. 154-166). In I Füller: Wenn der Schlaf gestört ist. Stiftung Warentest, Berlin.
- Zung WW 1965: A Self-Rating Depression Scale. - Arch Gen Psychiatry 12, 63-70.
- Zung WW 1971: A rating instrument for anxiety disorders. - Psychosomatics 12(6), 371-9.
- Zwamborn APM, SHJA Vossen, BJAM van Leersum, MA Ouwens and WN Mäkel 2003: TNO report: Effects of Global Communication systems radio-frequency fields on Well Being and Cognitive Functions of human subjects with and without subjective complaints. – TNO Physics and Electronics Laboratory, The Hague, The Netherlands.

Liste der Abkürzungen

A1, A2	Elektrodenposition Auriculum links, rechts
AAC	Alpha Attenuation Coefficient
AAT	Alpha Attenuation Test
AASM	American Academy of Sleep Medicine
ABR	Acoustic Evoked Brainstem Potentials
AEP	Akustisch evozierte Potentiale / Acoustic evoked potentials
AFSSE	Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale
AHI	Apnoe- Hypopnoe- Index
ANOVA	Analysis of Variance
ASF	Allgemeiner Schlaffragebogen
AVLT	Auditiv-verbaler Lerntest
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BP	Bereitschaftspotential
BSG	Blutkörperchensenkungsgeschwindigkeit
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
C3, C4, Cz	Elektrodenposition zentral links, rechts, Mitte
CETECOM	Certification and Testing in Communications GmbH
CF	Compact Flash
CIP	Compact Integrated Pupillograph
CK	Creatinkinase
CRP	Capsel-reaktive Protein
CNS	Central Nervous System
CNV	Contingent Negative Variation
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
CPT	Continuous Performance Test
CST	Stroop Color Word Test

CSTEE	Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment
cw	Continuous Wave
DAUF	Daueraufmerksamkeitstest
DC	Direct Current
DGSM	Deutsche Gesellschaft für Schlafmedizin und Schlafforschung
DLPFC	Dorsolateraler Präfrontaler Cortex
DMF	Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm
DSB	Digit Span Backwards
DSF	Digit Span Forwards
DUT	Device Under Test
ECOLOG	Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH
EDF	European Data Format
EEG	Elektroencephalogram / Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EKP	Ereigniskorrelierte Potentiale
ELF	Extremely Low Frequency
EMF	Electromagnetic Fields / elektromagnetische Felder
EMG	Electromyogramm
EOG	Elektrooculogramm
EP	Evoked Potentials / evozierte Potentiale
ERD/ERS	Event Related Desynchronisation / Synchronisation
ERP	Event Related Potentials
ESS	Epworth Sleepiness Scale
EU	European Union
F3, F7,	Elektrodenposition frontal, linkszentral, linkslateral
F4, F8, Fz	Elektrodenposition frontal rechtszentral, rechtslateral, Mitte
FEMU	Forschungszentrum für Elektromagnetische Umweltverträglichkeit
FFT	Fast Fourier Transformation
FGF	Forschungsgemeinschaft Funk

Fp1, Fp2, Fpz	Elektrodenposition frontopolar links, rechts, Mitte
ft3, ft4	Schilddrüsenhormone
GHz	Gigahertz
γGT	Gamma-Glutamyl-Transferase (Enzym)
GOT	Glutamat-Oxalazetat-Transaminase (Enzym der Leber)
GTP	Glutamat-Pyruvat-Transaminase (Enzym der Leber)
GSM	Global System for Mobile Communication
HF	Hochfrequenz
Hz	Hertz
ICA	Independent Component Analysis
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEE	Institution of Electrical Engineers
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
IEGMP	Independent Expert Group on Mobile Phones
IF	Intermediate Frequencies
IMST	Institut für Mobil- und Satellitentechnik
i.S.	im Serum
i.U.	im Urin
kHz	Kilohertz
LDA	lineare Diskriminanzanalyse
LEET	Low Energy Emission Therapy
LP	langsames Potential
lx	lux
M.	Musculus
M1, M2	Elektrodenposition Mastoid links, rechts
MAB	Morgen- Abendtyp- Bestimmung
MANOVA	multivariate analysis of variance
MD	Median
MET	Motorisch Evozierte Potentiale

MHz	Megahertz
MLR	Middle Latency Response
MP	Motor Potential
MP3	MPEG-1 Audio Layer 3
MPEG	Moving Picture Experts Group
MRCP	Movement Related Cortical Potentials
MUT	Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik
MW	Microwave, Mikrowellen; Mittelwert
N1, N2	evozierte Potentiale mit negativen Amplituden
N1P1	Amplitudendifferenz zwischen N1 und P1
N100	evoziertes Potential mit negativer Amplitude, deren Gipfel ca. 100, msec nach Reizdarbietung auftritt
NLGA	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
NREM	Non Rapid Eye Movement
NRPB	National Radiological Protection Board
NS´	Terminal Negative Slope
NSAR	Nichtsteroidale Antirheumatika
O1, O2, Oz	Elektrodenposition occipital links, rechts, Mitte
OS	Ordnungsschwelle
P1, P2, P3	evozierte Potentiale mit positiver Amplitude
P1N2	Amplitudendifferenz zwischen P1 und N2
P3, P4, Pz	Elektrodenposition parietal links, rechts, Mitte
P100, P200, P300	evoziertes Potential mit positiver Amplitude, deren Gipfel ca. 100, 200, 300 msec nach Reizdarbietung auftritt
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PLMAI	Index für Periodische Beinbewegungen mit Arousal
PLMS	Periodic Leg Movements
pm	Pulse Modulated
PSQI	Pittsburgh Sleep Quality Index
PUI	pupillary unrest index, Pupillenruheindex
RAI	Respiratory Arousal Index

rCBF	Regional Cerebral Blood Flow
REM	Rapid Eye Movement
RF	Radio Frequency
RFR	Radio Frequency Radiation
RP	Readiness Potential
SAR	Specific Absorption Rate
SART	Sustained Attention to Response Test
SAS	Selbstbeurteilungs- Angst- Skala
SD	standard deviation, Standardabweichung
SDMT	Symbol Digit Modalities Test
SDS	Selbstbeurteilungs- Depressions- Skala
SEI	Schlafeffizienzindex
SEP	Somatosensorisch Evozierte Potentiale
SOL	Sleep Onset Latency
SP	Slow Potential
SPT	Sleep Period Time
SSB	Spatial Span Backwards
SSF	Spatial Span Forwards
SSI	Statens Strålskyddinstitut
SSK	Strahlenschutzkommission
STAW	Stadienwechsel
STOA	Scientific and Technological Options Assessment Unit
SWS	Slow Wave Sleep
T3, T5	Elektrodenposition temporal links anterior, links posterior
T4, T6	Elektrodenposition temporal rechts anterior, rechts posterior
Tab	Tabelle
TAP	Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung
TIB	Time in Bed
TMT	Trail Making Test

TMTA	Subtest von TMT
TMTB	Subtest von TMT
TSH	Thyreoida-stimulierendes Hormon (Schilddrüsen-stimulierendes Hormon)
TST	Total Sleep Time
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik
VEP	Visual evoked potentials
VLPO	ventro-lateral preoptic area
VMT	Visual Monitoring Task
WASO	Wake after Sleep Onset
WHO	World Health Organisation
WLAN	Wireless Local Area Network
WMT	Working Memory Task
ZNS	Zentrales Nervensystem

Korrespondenzanschrift:

Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe
Interdisziplinäre Schlafforschung
der Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Campus Benjamin Franklin
der Freien Universität Berlin
Eschenallee 3
14050 Berlin
Tel.: 030 8445 8603
Fax: 030 8445 8393
E-Mail: heidi.danker-hopfe@charite.de