

Pulsmodulierte und ihre Wirku



Jiri Silny

Immer kurzweiliger wird die bei neuen Technologien zum Einsatz kommende Strahlung, digital löst analog ab, gepulste Signale ersetzen kontinuierliche. In der Bevölkerung aber bestehen Zweifel und sogar Ängste, dass diese Techniken möglicherweise die Gesundheit beeinträchtigen könnten. Um diese Frage zu klären, wurden daher verschiedene vorliegende, auch eigens angestellte Untersuchungen bezüglich gepulster hochfrequenter Wellen ausgewertet, die im folgenden Beitrag näher beschrieben sind.

1. Einleitung

Digitale Mobilfunksysteme, drahtlose digitale Telefone, digitale Rundfunk- und Fernsehsysteme sowie zahlreiche andere Einrichtungen, die gepulste Mikrowellen zur Kommunikation verwenden, verdrängen aufgrund ihrer offensichtlichen qualitativen Vorteile die alten analogen Techniken. Andererseits weckt dieser Übergang, aufgrund mutmaßlicher Wirkungen auf die Gesundheit, Skepsis und Vorbehalte in der Bevölkerung. Obwohl der Mensch seit Jahrzehnten mit technischen elektromagnetischen Feldern mit durchaus vergleichbarer Frequenz und Stärke exponiert wird, beruht die Ablehnung der neuen Technologien häufig auf dem pulsartigen Charakter der gesendeten Mikrowellen. Die negative Einschätzung der gesundheitlichen Relevanz von niederfrequent gepulsten Mikrowellen, insbesondere des Mobilfunks, wird unter anderem durch populistische Erläuterungen selbst ernannter „Experten“ geschürt. So werden z. B. gepulste Mikrowellen mit Nadelstichen im Organismus verglichen, auf die der Organismus stark reagieren soll.



Mikrowellen ngen auf den Menschen

Ähnlich unwissenschaftlich ist der gern zitierte Vergleich zwischen den „analog“ und „digital“ modulierten Mikrowellen auf der einen Seite und dem harmlosen Licht einer Glühbirne und dem Blitzgewitter eines Stroboskops, mit dem sogar epileptische Anfälle ausgelöst werden können, auf der anderen Seite.

Die Wissenschaft hat sich mit diesen Vorwürfen einer besonderen gesundheitlichen Beeinflussung durch die pulsmodulierten Mikrowellen in unterschiedlichen physikalischen wie auch medizinisch/biologischen Untersuchungen in vielfältiger Weise auseinandergesetzt. Dabei wurden bei Applikationen starker gepulster Mikrowellen in Experimenten durchaus spezifische Effekte beobachtet, die auf thermische Wirkung zurückgeführt werden können. Athermische Effekte von niederfrequent pulsmodulierten Mikrowellen in Zellmembranen der erregbaren Zellen werden wiederholt in die Diskussion gebracht. Dabei soll die gepulste Mikrowelle in der Zellmembran demoduliert werden und die niederfrequente Umhüllende (siehe Pkt. 3) die eigentliche Wirkung ausüben. Eine experimentelle Überprüfung dieser Hypothese in eigenen Untersuchungen ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Abhandlung.

Die Frage ist, ob athermische Effekte bei den relativ schwachen gepulsten Mikrowellen im Alltag beim gesunden oder kranken Menschen überhaupt auftreten und eine relevante Beeinträchtigung der Gesundheit verursachen können. Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine Recherche in der mehrere hundert Titel zählenden fachspezifischen Literatur durchgeführt. Hier werden nur die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Für eine detaillierte Recherche steht z. B. das kostenlose Internet-EMF-Portal (<http://www.emf-portal.de>) zur Verfügung.

Als Hinweis auf einen Effekt werden übereinstimmende Berichte unabhängiger Forschungsgruppen aus Provokationstests, epidemiologischen Studien, Untersuchungen mit Probanden, Tierexperimenten sowie aus Reagenzglasuntersuchungen gesucht. Für die Formulierung eines real existierenden gesundheitlichen Risikos für den Menschen in den pulsmodulierten Mikrowellen müssten darüber hinaus die Ergebnisse aller Untersuchungstypen komplementär sein.

2. Pulsmodierte Mikrowellen im Alltag

Bei digitaler Modulation werden kurze Mikrowellenpakete übertragen, wobei die übertragenen Informationen in der Länge und/oder im Abstand der Pakete kodiert sind. Der Grund für den Übergang von früheren analogen zu digitalen Systemen liegt vor allem in der besseren Qualität der Kommunikation, der höheren Sicherheit und in einer besseren Nutzung der begrenzten Frequenz-Ressourcen.

Inzwischen werden im Alltag sehr viele unterschiedliche Systeme betrieben, die sich der Vorteile der digitalen Informationsübertragung bedienen. Der heutige Standard-Mobilfunk mit den Systemkomponenten Handys und Basisstationen sendet im D-Netz (um 900 MHz) und E-Netz (um 1800 MHz); dies sind die am meisten verbreiteten Quellen pulsmodulierter Mikrowellen, die zu übertragende Information wird nach dem GSM (Global System for Mobile Communications) -Standard kodiert. Die Sendeleistungen variieren bei Basisstationen zwischen 5 W und 50 W, wogegen sie bei Handys im D-Netz maximal 2 W und im E-Netz maximal 1 W betragen können. Die Sendeleistung der Basisstationen wie auch der Handys ist regelbar und sie beträgt bei gutem Empfang nur einen Bruchteil der maximalen Leistung. Außerhalb Euro-

pas werden beim Mobilfunk auch andere, durchaus verwandte digitale Kodierungssysteme, wie z. B. NADC oder PHS, verwendet, die mit vergleichbaren Leistungen arbeiten.

Beim neuen UMTS-Mobilfunksystem findet eine spezielle digitale Modulation Anwendung, bei der zeitlich keine pulsmodulierten Mikrowellenpakete, sondern einem Rauschen ähnliche Signale gesendet werden. Erst durch das Regeln der Leistung der Handys in Abhängigkeit von der Qualität des Empfangs kann es zu einer gewissen Pulsmodulation der UMTS-Mikrowellen kommen. Die Sendeleistungen des UMTS-Mobilfunks sind mit dem Mobilfunk im E-Netz vergleichbar.

Andere häufig vorkommende Quellen der pulsmodulierten Mikrowellen sind das digitale schnurlose Telefon und die zugehörigen festen Stationen. Sie verwenden die so genannte DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications)-Kodierung. Feste wie auch tragbare Teile haben eine nicht regelbare Leistung von 100 mW.

Für den Nahbereich werden digitale Dienste wie WLAN (Wireless Local Area Network) oder Bluetooth angeboten. Die konstante Sendeleistung dieser Nahübertragungssysteme liegt zwischen 10 mW und 100 mW. Die digitale Kommunikation zwischen Rettungsdiensten wie Polizei oder Feuerwehr soll zukünftig das TETRA (Terrestrial Trunked Radio)-System gewährleisten. Ähnliche Systeme werden auch für Behördenfunknetze und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben wie auch Privatunternehmen aufgebaut. TETRA ist im Frequenzbereich um 450 MHz angesiedelt, die maximalen Sendeleistungen der tragbaren Einheiten liegen bei 8 W.

Pulsmodulierte Mikrowellen mit einem Frequenzspektrum um 850 MHz werden zunehmend auch zur drahtlosen Steuerung von Heizungssystemen oder zur drahtlosen Datenübermittlung von Strom-, Gas- und Wasserzählern verwendet. Die Sendeleistungen erreichen maximal wenige 100 mW.

Die Antikollisionssysteme zur Ermittlung des Abstandes zwischen Pkws, die in die Fahrzeuge der oberen Klasse bereits eingebaut werden, nutzen ebenfalls gepulste Mikrowellen im Bereich zwischen 24 GHz

und 77 GHz. Die Sendeleistung beträgt nach Angaben des Herstellers mehrere 100 mW.

Für die Immission des Menschen mit diesen pulsmodulierten Mikrowellen ist neben der gesendeten Leistung auch der Abstand zwischen der Quelle und dem Körper maßgeblich. Auch wenn die Leistung z. B. der Handys deutlich niedriger liegt als die Sendeleistung der Basisstationen, ist die Immission durch Handys wegen des geringen Abstands zum Kopf 100 bis 1000 mal stärker. Allerdings wird der Mensch ohne Wahlmöglichkeit mit den Feldern der Basisstation fast ständig exponiert, wogegen die Dauer der Exposition durch die Handyfelder weitgehend frei bestimmt werden kann.

3. Pulsmodulierte Mikrowellen im Körper

Trotz der wichtigen nachrichtentechnischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren der digitalen Kommunikation lassen sich die gesendeten Felder für die gesundheitliche Betrachtung mit einem Träger im Mikrowellenbereich, der nur in kurzen Intervallen gesendet wird, vereinfacht charakterisieren. Die gesendeten Schwingungspakete weisen, je nach Art der Modulation, unterschiedliche Breiten und Abstände auf. Der zeitliche Verlauf der Wellen-Maxima wird als Umhüllende des Signals bezeichnet, demnach ändert sich die Umhüllende der pulsmodulierten Mikrowellen zwischen 0 und einem Maximum, sie hat die Form von sich wiederholenden Rechteckpulsen. Die Umhüllende weist nur niederfrequente Anteile auf, wogegen der Träger im Mikrowellenbereich (400 MHz – 300 GHz) liegt. Durch die Pulsmodulation des Trägers kommt es zur Bildung eines Mikrowellen-Spektrums, das sich nah um die Trägerfrequenz ausbreitet, das Spektrum beinhaltet keine niederfrequenten Anteile.

Pulsmodulierte Mikrowellen dringen nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie eine kontinuierliche Mikrowelle in den Körper ein. In einem Fernfeld, z.B. einer Mobilfunkstation, nimmt die Eindringtiefe der Mikrowellen mit der Frequenz ab, die stärksten Anteile der Mikrowelle werden in den oberen Schichten des Körpers absorbiert. Ein Nahfeld, z. B. eines Handys, erzeugt im Körper eine ungleichmäßige Vertei-

lung, die neben der Frequenz des Trägers auch stark von der Geometrie der exponierten Körperteile abhängt.

Die in den Körper eindringenden pulsmodulierten Mikrowellen haben primär nur hochfrequente Spektralanteile, die eine Wirkung im Körper ausüben können. Dabei sind Kraftwirkungen auf unterschiedliche Ladungsträger durchaus denkbar (Adair 2002, Barsoum und Pickard, 1982). Da jedoch die Ladungsträger im Körper sehr träge sind, kommt es unter der Einwirkung von Mikrowellen zu Schwingungen der Ladungsträger, die über Reibung zur Wärmeerzeugung führen. Nichtthermische Kraftwirkungen der Mikrowellen auf biologische Reaktionen sind theoretisch nicht nachvollziehbar (Chiabrera et al. 2000, Fröhlich und Kremer 1983, Keilmann 1985, Pickard und Rosenbaum 1978), da die Reaktionen im Körper sehr langsam ablaufen. Auch experimentelle Untersuchungen in vitro konnten bisher keine konsistenten Hinweise auf

eine Beeinflussung biologischer Funktionen durch athermisch wirkende Mikrowellen aufzeigen (Adey et al. 1982, Blackman et al. 1980, Bolshakov et al. 2001, Czerska et al. 1992, Grundler et al. 1977, Konovalov und Serikov 2001, Penafiel et al. 1997, Repacholi et al. 1997 und Zwarborn et al. 2003 berichten über besondere Effekte gepulster Mikrowellen auf die kognitiven Funktionen).

Spekulativ werden immer wieder Behauptungen aufgestellt, wonach der Körper Gewebestrukturen aufweisen soll, die die pulsmodulierten Wellen demodulieren können. Auf diese Weise soll die niederfrequente Umhüllende zur Wirkung kommen.

Eine Gleichrichtung und Tiefpassfilterung niederfrequenter elektromagnetischer Wellen als die einfachste Art einer Demodulation ist experimentell in den Membranen der erregbaren Zellen, wie z. B. Nerven und Muskeln, belegt und physiologisch verstanden. Untersuchungen zur Gleichrichtung von Mikrowellen

Frequenz MHz	Wiederholungsrate s ⁻¹	Pulsbreite µs	Spitzenwert der Leistungsdichte mW/cm ²	Energiedichte pro Puls µJ/cm ²	Absorbierte Energiedichte pro Puls µJ/g	Referenzen
900 ^{1,2}	1 – 100	1 - 500	62 - 5800	1,5 - 47	6 - 180	Chou et al. 1975
3000 ¹	0,5	5	2200 - 2800	11 - 14	k.A.	Rissman et al. 1975
9000 ¹	1	32	14800 - 38800	472 - 1240	k.A.	Guy et al. 1975
Handy 900 MHz		217	576	0,6		

¹ Katze ² Guinea-Schwein

Tab. 1: Kennwerte pulsmodulierter Mikrowellen, die in Tierexperimenten über Messung akustischer Wellen im Kopf oder über Ableitung akustisch evozierter Potentiale im Kortex nachgewiesen wurden.

Frequenz MHz	Wiederholungsrate s ⁻¹	Pulsbreite µs	Spitzenwert der Leistungsdichte mW/cm ²	mittlere Leistungsdichte mW/cm ²	Referenzen
425	27	125 - 1000	229 - 271	1 - 7.1	Frey 1961, 1962
1245	50	10 - 70	90 - 370	0.19 - 0.32	Elder, Chou 2003
2450	3	1 - 32	1250 - 4000	0.1	Guy et al. 1975
GSM-Handy 900 MHz/ 1800 MHz	217	576	0.6	0.08	

Tab.2: Charakteristika der pulsmodulierten Mikrowellen, die in Untersuchungen mit Probanden zu akustischen Wahrnehmungen durch Applikationen pulsmodulierter Mikrowellen geführt haben.

werden in Abschnitt 5 vorgestellt. Zunächst werden in Abschnitt 4 die bekannten Effekte pulsmodulierter Mikrowellen kurz erläutert.

4. Nachgewiesene spezifische Wirkungen pulsmodulierter Mikrowellen auf den Menschen

Die allgemeine Frage ob pulsmodierte Mikrowellen im Vergleich mit einer kontinuierlichen Mikrowelle (CW) mit identischer Trägerfrequenz und Amplitude spezifische Effekte beim Menschen auslösen können und ob diese belegt sind, kann mit „ja“ beantwortet werden. Als nachgewiesen gelten:

- die durch Mikrowellen induzierte Hörwahrnehmung, das sog. Mikrowellen-Hören und
- Störbeeinflussungen elektronischer Implantate.

4.1 Mikrowellen-Hören

In starken pulsmodulierten Mikrowellen können beim Menschen wie auch beim Tier Hörwahrnehmungen wie Klopfen, Zischen oder Dröhnen entstehen. Die Existenz dieser Effekte wurde bereits in Tierexperimenten sowie bei Menschen eindeutig nachgewiesen (Frey 1961, 1962; Guy et al. 1975, Cain und Rissmann 1978, Chou et al. 1975, Elder und Chou 2003). In Abb. 1 ist die Entstehung von Hörwahrnehmungen in gepulsten Mikrowellen schematisch dargestellt. Starke pulsmodierte Mikrowellen verursachen eine lokale Überhöhung der elektrischen Feldstärke im Innern des Kopfes, die hier zu einer Erwärmung, den sog. „hot spots“, führt. Die primäre Folge der einzelnen oder zyklischen Erwärmungen ist die Entstehung einer thermoelastischen Dehnung des Gewebes, die eine akustische Druckwelle im Kopf zur Folge hat. Diese akustische Welle breitet sich über den Schädelknochen und die Körperflüssigkeiten bis zum Hörzentrum, der Cochlea mit den Haarzellen als Sinnesrezeptoren, aus. Die akustische Welle wird von den Haarzellen aufgenommen und über den Hörnerv zur Verarbeitung im akustischen Kortex weitergeleitet. Die Existenz dieser Effekte wurde in Tierexperimenten mit Meerschweinchen und Katzen unter Anwendung verschiedenartig modulierter Mikrowellen und unterschiedlicher Beweismethoden bestätigt (Tab. 1). Bei

den Charakteristika, die zur Erzeugung des Mikrowellenhörens in Tierexperimenten erforderlich sind, fällt insbesondere der hohe Spitzenwert der Leistungsdichte auf. Diese Spitzenwerte werden aber bei der stärksten Immission mit gepulsten Mikrowellen im Alltag, bei der Nutzung von Handys, nie erreicht.

Auch Untersuchungen mit Freiwilligen haben die Existenz des Mikrowellen-Hörens und die dabei zugrunde liegenden Mechanismen bestätigt (Tab. 2). Die Trägerfrequenz, bei der gepulste Mikrowellen noch akustisch wahrgenommen werden können, liegt niedriger als bei den getesteten Tieren, was auf den größeren Kopfumfang des Menschen zurückgeführt wird. Auch beim Menschen sind relativ hohe Spitzenwerte der Leistungsdichte erforderlich, damit die subjektiv beschriebenen akustischen Wahrnehmungen auftreten. Aus dem Vergleich der wichtigsten Feldparameter, der Spitzenwerte der Leistungsdichte bei Mikrowellen-Hören und Handynutzung, resultiert, dass das Mikrowellen-Hören in den relativ schwachen pulsmodulierten Feldern des heutigen Alltags sehr unwahrscheinlich ist. Diese Feststellung bezieht sich primär auf Handys als die stärkste Immissionsquelle pulsmodulierter Mikrowellen; für die Mobilfunkbasisstationen mit Feldern, die um einen Faktor 100 bis 1000 schwächer sind, ist das Auftreten derartiger Effekte gänzlich ausgeschlossen.

Insgesamt kann das Mikrowellen-Hören primär auf die bekannten thermischen Wirkungsmechanismen der Mikrowellen zurückgeführt werden. Die Tatsache, dass pulsmodierte und nicht kontinuierliche Mikrowellen akustisch wahrgenommen werden können, lässt sich mit der dynamischen Entstehung der akustischen Welle im Kopf und mit der frequenzselektiven Charakteristik des Hörsystems begründen.

4.2 Störung von elektronischen Implantaten durch pulsmodierte Mikrowellen

Elektronische Implantate stellen eine bewährte Therapie zur Verfügung, die in einigen Fällen, wie z. B. bei einem Herzschrittmacher oder einem Kardioverter Defibrillator, sogar eine lebenserhaltende Funktion ausüben. Eine denkbare Störung dieser Implantate durch elektromagnetische Wellen kann deshalb

sogar zu einer Gefährdung des Patienten führen. Auch Mikrowellen können Störungen in elektronischen Implantaten hervorrufen, wenn sie sich in die elektrischen Schaltkreise des Implantats einkoppeln (Silny 1998). Bei den heutigen meist metallisch gekapselten Aggregaten koppelt sich die Mikrowelle über den Körper und die hier geführten nicht abgeschirmten Elektroden in die Eingangskreise des Implantats ein. Die Elektronik dieser Aggregate ist zwar nicht zur Verarbeitung von Mikrowellen entworfen, sie ist trotzdem imstande, eine einfache Gleichrichtung und Tiefpassfilterung gepulster Mikrowellen vorzunehmen. Diese Vorgänge stellen die einfachste Art der Demodulation eines pulsmodulierten Mikrowellensignals dar.

Die Abb. 2 zeigt schematisch die Einkopplung eines Handyfeldes in den Herzschritt- macher-Eingang und die daraus resultierende Antwort hinter dem EKG-Verstärker.

Die Nichtlinearität und die Filtercharakteristik der Eingangsstufe bewirken, dass aus der pulsmodulierten Mikrowelle eine niederfrequente Umhüllende mit Betonung einiger niederfrequenter Anteile entsteht, die die gefährliche Inhibition des Implantats einleiten kann. Bei der Anwendung eines Handys nach dem GSM-Standard im D- oder E-Netz ergibt sich die ungünstigste Störsituation beim Aufbau eines Gesprächs und beim Zuhören während eines Gesprächs. In diesen Modi entsteht ein sägezahnähnliches Signal mit einer ungünstigen Frequenz von 2 Hz, das mit dem intrakardialen EKG verwechselt wird und dadurch der Herzschritt- macher ab einer bestimmten Amplitude inhibiert werden kann.

Neben der Stärke des eingekoppelten Feldes bilden die pulsmodulierten Mikrowellen dann eine Gefahr für Implantate mit Elektronik, wenn die Frequenz der Umhüllenden in den sensitiven Bereich des jeweiligen Implantats fällt. Für die Herzschritt- macher und Cardioverter Defibrillatoren liegt dieser Bereich bei einer Frequenz der Umhüllenden zwischen 1 Hz und 10 Hz. Bei anderen Aggregaten, wie z. B. Cochlear- Implantaten, wird die höchste Störfähigkeit bei der Frequenz der Umhüllenden im Bereich von einigen kHz erreicht.

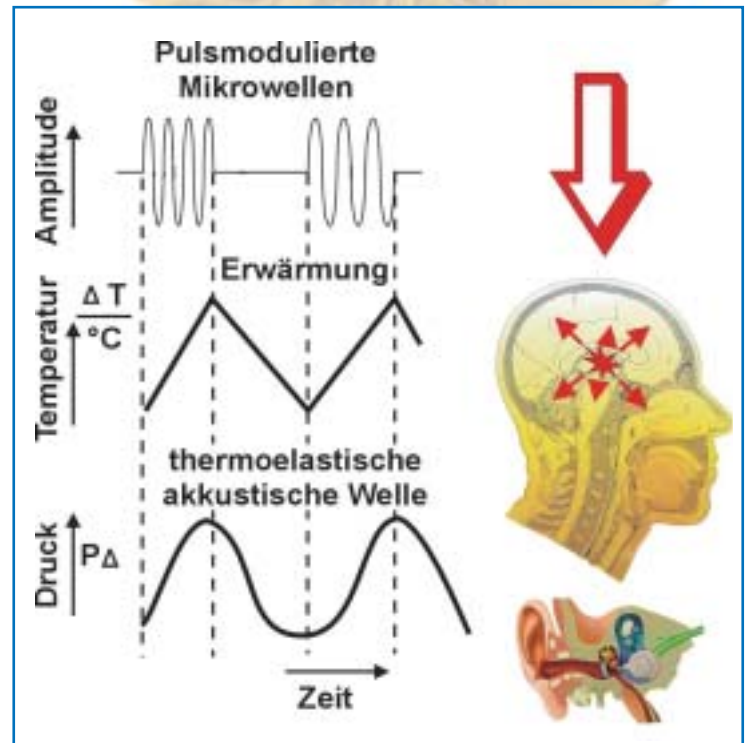
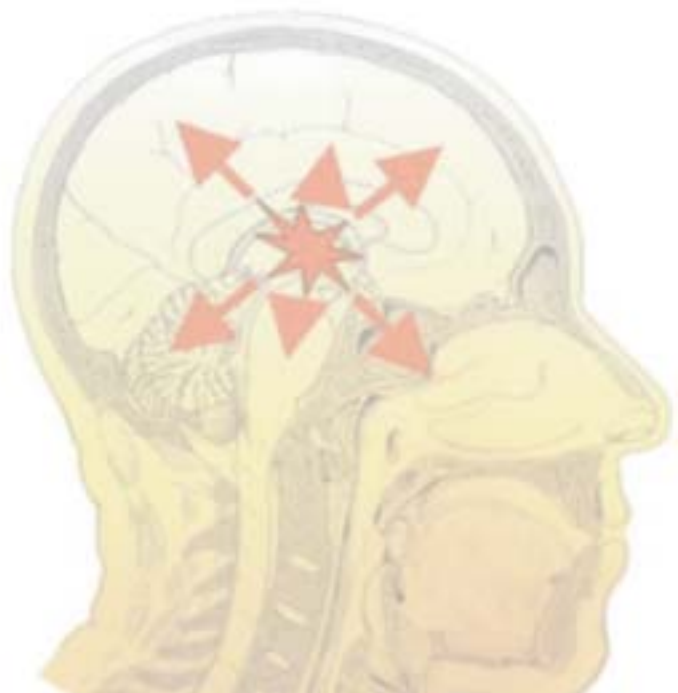


Abb. 1: Pulsmodulierte Mikrowellen verursachen eine lokale Erwärmung im Kopf, die zur Entstehung einer akustischen Welle führt. Diese akustische Welle wird von Haarzellen in der Cochlea aufgenommen und im akustischen Kortex verarbeitet.

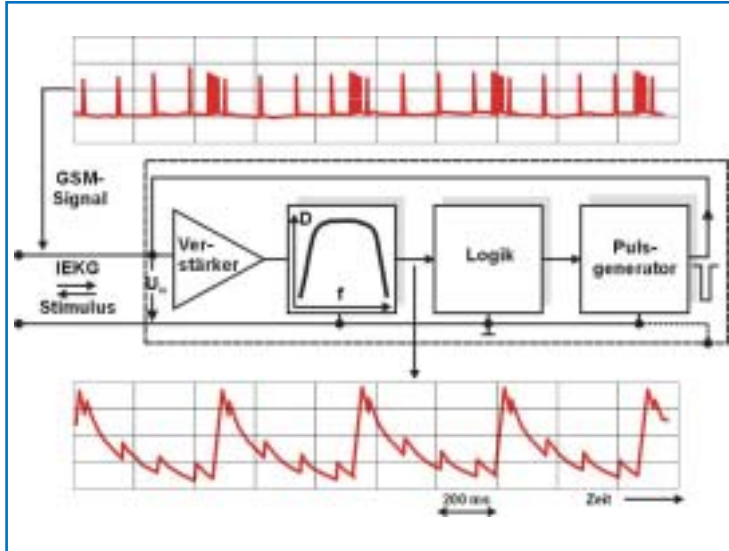


Abb. 2: In der Elektronik eines Herzschrittmachers wird die pulsmodierte Mikrowelle eines Handys im D-Netz gleichgerichtet und tiefpassgefiltert, womit aus dem gepulsten Mikrowellensignal hinter dem EKG-Verstärker eine niederfrequente Störung als Umhüllende der Welle entsteht. Beim Hören des Gesprächspartners dominiert nach der Demodulation die 2 Hz-Komponente, die zur Inhibition des Herzschrittmachers führen kann.

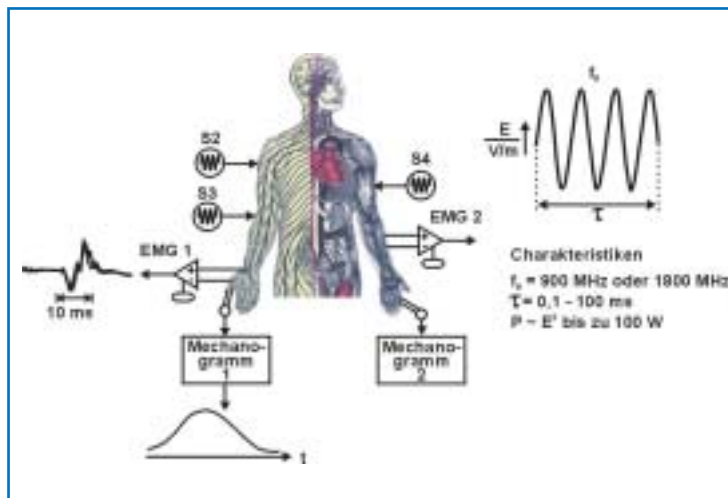


Abb. 3: Anordnung zur Überprüfung der Erregung peripherer Nerven und Skelettmuskeln mittels Mikrowellen mit angegebenen Charakteristika.

5. Wirkungen pulsmodulierter Mikrowellen in Zellmembranen

Zellmembranen erregbarer Zellen, wie z. B. der Neuronen, Nerven, Sinnesrezeptoren und Muskeln, besitzen komplexe Strukturen und Funktionen, die nachweislich für niederfrequente Ströme bis zu einer Frequenz von 10 MHz eine Nichtlinearität aufweisen (Montaigne und Pickard 1984). Sinusförmige Ströme werden in der Zellmembran gleichgerichtet und tiefpassgefiltert und können nicht nur die Ruhe-Membranspannung verringern, sondern auch eine überschwellige Erregung einleiten (Silny 1999). Dabei nimmt die Reizschwelle etwa direkt proportional mit der Frequenz zu, wogegen die Demodulation von Schwingungspaketen mit einer Länge bis zu 10 ms die Reizschwelle bis zu 50 % senken kann. Die Konsequenzen einer Erregung von Nerven, Muskeln und Sinnesorganen durch exogene Ströme reichen von harmlosen Wahrnehmungen über einzelne Muskelzuckungen oder sogar Muskelerstarrung bis zur Schmerzempfindung oder sogar Auslösung des lebensgefährlichen Herzkammerflimmerns.

In Anbetracht der möglichen Folgen stellt sich die Frage, ob gepulste Mikrowellen imstande sind, eine Erregung der Zellen ebenfalls einzuleiten oder überhaupt einen Beitrag zur Membranspannung zu liefern (Cain 1980).

Zur Überprüfung dieser Hypothesen wurden experimentelle Untersuchungen mit Probanden in zwei Schritten durchgeführt. Folgende Arbeitshypothesen wurden dabei aufgestellt:

1. Ein Mikrowellen-Paket mit Frequenzen von 900 MHz oder 1800 MHz, einer Breite bis zu 100 ms und einer Spitzenleistung bis zu 100 W kann eine überschwellige Erregung der peripheren Nerven oder der Skelettmuskeln einleiten.
2. Ein Mikrowellen-Paket mit der Trägerfrequenz von 900 MHz oder alternativ 1800 MHz mit einer Breite bis zu 100 ms und Spitzenleistungen bis zu 100 W kann den nachfolgenden submaximalen Stromstimulus der peripheren Nerven oder in den Skelettmuskeln konditionieren.

Die für die Überprüfung der ersten Hypothese verwendete Versuchsanordnung ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

Einzelne Stromstimuli oder Mikrowellen-Pakete werden über eine gemeinsame Koaxialelektrode von einer definierten Position oberhalb der Nerven oder des Muskels im Bereich der oberen Extremitäten appliziert. Eine dadurch eingeleitete überschwellige elektrische Erregung eines Nervs wird zum zugehörigen Muskel fortgeleitet und verursacht hier eine elektrische Erregung des Muskels, die nach ca. 50 ms zu einer mechanischen Kontraktion des Muskels führt. Bei einer direkten elektrischen Erregung des Muskels folgt ebenfalls nach ca. 50 ms eine mechanische Kontraktion. Die elektrische Antwort des Muskels wird mit dem Elektromyogramm (EMG) aufgenommen, die Registrierung der mechanischen Kontraktion des Muskels erfolgt über das Mechanogramm. Eine typische EMG-Antwort eines Muskels nach einer überschweligen Erregung des zugehörigen Nervs ist in Abb. 4 veranschaulicht.

Die punktuelle überschwellige Erregung des Nervs führt nach einer Verzögerung, die durch die Laufzeit der Erregung in Nerven und in der motorischen Endplatte gegeben ist, zur elektrischen Erregung des Muskels. Diese elektrische Aktivität lässt sich als EMG von der Hautoberfläche oberhalb des Muskels nichtinvasiv ableiten. Je nach Stärke des Stimulus kann die elektromyographische Antwort verschiedene Amplituden zwischen sehr klein (liminal) und einem Maximum (supramaximal) annehmen. In der Praxis wird grob zwischen einer liminalen, submaximalen und einer supramaximalen Erregung unterschieden. Bei der liminalen Erregung werden nur wenige Muskelfasern des Muskels erregt und an der Kontraktion beteiligt, bei der supramaximalen Antwort sind fast alle Muskelfasern eines Muskels elektrisch erregt und bei der Kontraktion in Aktion. Der Übergang zwischen einer liminalen und einer supramaximalen Erregung ergibt sich aus einer sehr geringen Erhöhung der Amplitude des Reizimpulses; die Methode weist in diesem Bereich eine sehr hohe Empfindlichkeit auf. Die Amplitude des Mechanogramms steigt etwa direkt proportional zur Amplitude des EMG und sie weist eine Latenz von mehr als 50 ms zur EMG-Antwort auf. In Probandenstudien wurde vor jeder Applikation von Mikrowellenpaketen die Richtigkeit der Position der

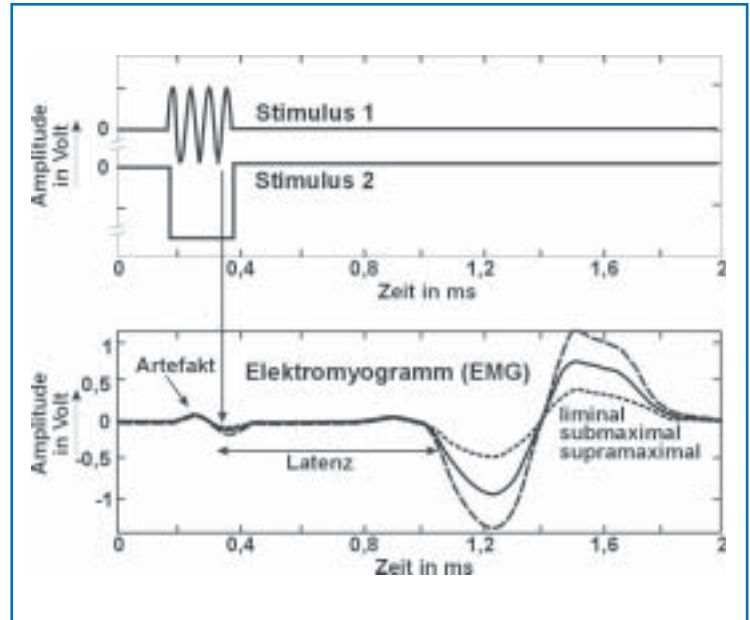


Abb. 4: Ein kathodischer Reiz (Stimulus 2) oder ein niederfrequentes Schwingungspaket (Stimulus 1) können eine überschwellige Erregung eines Nervs einleiten. Diese Erregung wird zum zugehörigen Muskel fortgeleitet und verursacht hier nach einer Latenz eine elektrische Erregung des Muskels (EMG). Das EMG kann, je nach Stärke des Reizes, die liminale, submaximale oder supramaximale Amplitude erreichen.

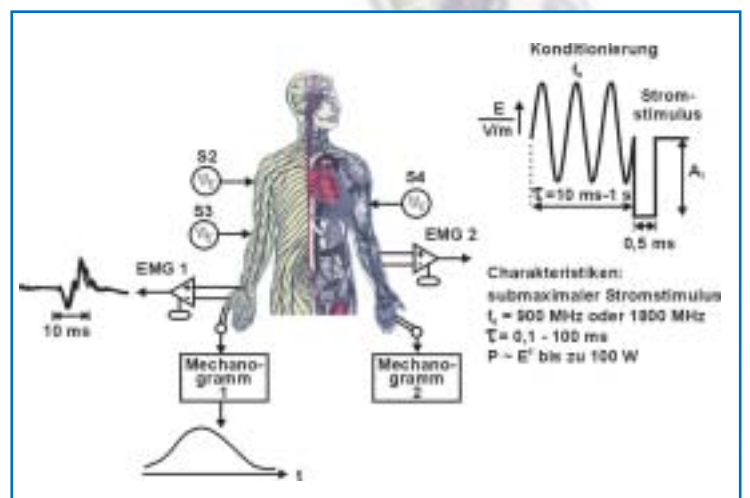


Abb. 5: Kathodischer submaximaler Reiz mit einer Konditionierung mittels eines Mikrowellenpakets mit unterschiedlichen Charakteristika.

Koaxialelektrode auf der Oberfläche des Oberarms mittels einer überschweligen Stimulation des Nervs oder Muskels mit einem Stromimpuls überprüft. Bei einer hohen Schwelle oder beim Ausbleiben eines Reizes wurde die Position der Koaxialelektrode verändert, bis typische Schwellen erreicht wurden. Erst danach erfolgte die Applikationen von Mikrowellen-Paketen mit unterschiedlichen Charakteristika.

In Untersuchungen mit 13 Probanden mit Applikationen der Mikrowellen in drei unterschiedlichen Muskeln und Nerven konnte in keinem Fall eine überschwellige Erregung von Nerven und Muskeln festgestellt werden. Aus diesem Ergebnis kann abgeleitet werden, dass Mikrowellen-Pakete mit den in Abb. 3 angegebenen Charakteristika keine überschwellige Erregung in peripheren Nerven und Skelettmuskeln der oberen Extremitäten einleiten können. Für die direkte Erregung von Muskel- und Nervenzellen müssten die Mikrowellen allerdings eine Herabsetzung der Membranspannung im Bereich von 40 mV bewirken. Ein Beitrag unter dieser Amplitude wird mit der vorgestellten Methode nicht angezeigt, da keine Reaktion im EMG oder Mechanogramm beobachtet werden kann.

Deshalb wurde in einem zweiten Schritt die Untersuchungsmethode modifiziert und verfeinert, indem neben einem Mikrowellen-Paket direkt nachfolgend ein submaximaler Stromstimulus die Erregung des jeweiligen Nervs oder Muskels einleitet (Abb. 5).

Bei dieser Methode wird die elektrische Ladung des Stromimpulses zur Einleitung der überschweligen submaximalen Erregung von Nerven und Muskeln verwendet, die vorangestellten Mikrowellenpakete können den Reiz und damit auch die EMG-Antwort nur stärken, schwächen oder unverändert lassen.

Als denkbare Einflüsse der Konditionierung durch Mikrowellen sind eine Veränderung der EMG-Amplitude oder eine Veränderung der Laufzeit zwischen dem Reiz und der EMG-Antwort zu erwarten. Mit dieser Konditionierungsmethode können auch kleine Beiträge der Mikrowellenpakete zur Membranspannung im Bereich von wenigen mV sicher erkannt werden.

Die Resultate des zweiten Untersuchungsabschnitts liefern keine Bestätigung der zweiten Arbeitshypothe-


se. Durch die Voranstellung der Mikrowellenpakete änderte sich weder die vorher mit dem Stromimpuls eingestellte submaximale Antwort des EMGs, noch konnten Änderungen in der Laufzeit zwischen dem Reiz und dem EMG ermittelt werden. Diese Ergebnisse können so gedeutet werden, dass die applizierten Mikrowellenpakete, falls überhaupt, nur einen Beitrag unter ca. 4 mV zur Membranspannung aufbauen können. Die auf der Körperoberfläche bei höheren Leistungen und längeren Einwirkzeiten gemessene Erwärmung bis zu 4°C hat keinen Einfluss auf die Leitgeschwindigkeit, da sie scheinbar das Innere des Arms nicht erreicht.

6. Zusammenfassung und Diskussion

Neue Kommunikationstechniken sowie Sicherheits- und Erkennungsdienste werden mit Vorteil gegenüber den herkömmlichen analogen Verfahren mit pulsmodulierten Mikrowellen realisiert. Die pulsmodulierten Mikrowellen werden in laienhaften Einschätzungen als besonders gesundheitsschädlich dargestellt. Das Ziel dieser Abhandlung ist die Prüfung, ob wissenschaftliche Erkenntnisse diese Einschätzung stützen. Gesucht wurden komplementäre Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen, die von unabhängigen Forschungsgruppen durchgeführt wurden und eine besondere Wirkung der pulsmodulierten Mikrowellen im Vergleich mit einer kontinuierlichen Welle auf den Menschen belegen. Als einzig gesicherte Wirkungsmechanismen der pulsmodulierten Mikrowellen direkt auf lebende Materie gelten, genauso wie für die kontinuierliche Welle, thermische Einflüsse. Entscheidend für diese Effekte ist es, dass die im Gewebe von Mikrowellen absorbierte Energie die thermische Energie des Gewebes deutlich übersteigt.

Athermische Wirkungsmechanismen der pulsmodulierten Mikrowellen wurden ebenfalls mehrfach aufgestellt, deren Existenz konnte aber in elementaren Experimenten nicht bestätigt werden.

Wenige Resultate der mehreren hundert bisherigen in vitro Untersuchungen zeigen eine besondere Wirksamkeit pulsmodulierter Mikrowellen. Die Replikationen dieser Untersuchungen in unabhängigen Überprüfungen haben allerdings keine Bestätigung ge-



bracht, bzw. die Effekte konnten auf der Grundlage von Tierexperimenten und Untersuchungen mit Probanden nicht auf den Menschen übertragen werden. Eine der häufig diskutierten Hypothesen ist, dass pulsmodierte Mikrowellen in den Zellmembranen erregbarer Zellen, wie z. B. Neuronen, Nerven, Muskeln oder Sinnesrezeptoren, demoduliert werden und die resultierende Umhüllende athermisch bestimmte Wirkungen im Organismus einleiten kann. Bisherige Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Zellmembranen durchaus als Nichtlinearität verhalten können, wenn die einwirkenden Wellen im Frequenzbereich bis zu ca. 10 MHz liegen. Dabei nimmt der Beitrag zur Reizschwelle der Zellen mit der Frequenz ab, die Reizschwelle steigt mit der Frequenz an. Sie kann auf der anderen Seite durch die Demodulation in der Zellmembran mit der Dauer der Welle bis zu etwa 10 ms schrittweise mit jeder Periode abgesenkt werden, bei längeren Paketen bleibt die Schwelle unverändert. Die Absenkung der Reizschwelle wird bei längeren Schwingungspaketen mit einer Dauer über 10 ms mit der Frequenz mehr und mehr ausgeprägt, und sie beträgt im Bereich von einigen MHz bis zu 50 % der Reizschwelle einer einzelnen Schwingungsperiode. In zugeschnittenen Untersuchungen wurde der Frage nachgegangen, inwieweit Mikrowellenpakete in den Zellmembranen von peripheren Nerven und Skelettmuskeln demoduliert werden, und auf diese Weise die Erregung einleiten oder zumindest beeinflussen können. Die als Reiz verwendeten Mikrowellen-Pakete wiesen eine Frequenz von 900 MHz bzw. 1800 MHz auf, die Dauer dieser Pakete betrug zwischen 0,1 und 100 ms, die applizierte Leistung wurde zwischen 0 und 100 W variiert. Diese Mikrowellenpakete wurden in die peripheren Nerven bzw. Skelettmuskeln von Probanden allein oder als Konditionierung eines submaximalen Stromstimulus appliziert. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Mikrowellenpakete weder eine überschwellige Reizung direkt einleiten, noch eine Beeinflussung der submaximalen EMG-Antwort verursachen können. Aufgrund dieser Ergebnisse ist es sehr unwahrscheinlich, dass die im Alltag wesentlich schwächeren pulsmodulierten Mikrowellen von Handys und noch schwächere Felder der Ba-

sisstationen eine Beeinflussung der Erregungsvorgänge im menschlichen Körper einleiten oder beeinflussen können.

Insgesamt betrachtet liefert die wissenschaftliche Literatur Hinweise auf zwei Situationen, in denen Gesunde oder Träger elektronischer Implantate in pulsmodulierten Mikrowellen eine spezifische Beeinträchtigung in niederfrequent pulsmodulierten Mikrowellen erfahren können.

In starken pulsmodulierten Mikrowellen mit Spitzenwerten der Leistungsdichte über 100 mW/cm² können harmlose akustische Wahrnehmungen auftreten. Diese Effekte beruhen auf lokalen Erwärmungen des Gewebes, die durch thermoelastische Dehnung zur Entstehung des „Mikrowellen-Hörens“ führen. Diese Effekte sind in Tierexperimenten sowie bei freiwilligen Probanden ausreichend belegt und auch physikalisch und physiologisch nachvollziehbar. Für den Alltag haben diese Effekte keine Bedeutung, da es unwahrscheinlich ist, dass sie auch in den wesentlich schwächeren pulsmodulierten Feldern des Alltags auftreten können.

Pulsmodierte Mikrowellen mit einer Frequenz der Umhüllenden im niederfrequenten Bereich können unterschiedliche Störungen elektronischer Implantate einleiten. Wegen der häufig lebenserhaltenden Funktion von Herzschrittmachern bzw. Kardioverter Defibrillatoren ist deren Störung durch pulsmodierte Mikrowellen mit einer Frequenz der Umhüllenden unter 10 Hz sehr kritisch. Diese Situation kann bei Nutzung eines Handys im D- oder E-Netz auftreten. Deshalb wird den betroffenen Patienten empfohlen, den gegenseitigen Abstand zwischen einem Handy und dem Aggregat von mindestens 15 cm einzuhalten.

Prof. Dr. Jiri Silny, Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu), Universitätsklinikum, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Internet: www.emf-portal.de

7. Literaturverzeichnis

- Adair RK (2002): Vibrational resonances in biological systems at microwave frequencies. *Biophys J* 82 (3): 1147 - 1152
- Adey WR, Bawin SM, Lawrence AF (1982): Effects of weak amplitude-modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex. *Bioelectromagnetics* 3 (3): 295 - 307
- Barsoum YH, Pickard WF (1982): Radio-frequency rectification in electrogenic and nonelectrogenic cells of Chara and Nitella. *J. Membrane Biol.* 65:81-87
- Blackman CF, Benane SG, Elder JA, House DE, Lampe JA, Faulk JM (1980): Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: effect of sample number and modulation frequency on the power-density window. *Bioelectromagnetics* 1 (1): 35 - 43
- Bolshakov MA, Kniazeva IR, Lindt TA, Evdokimov EV (2001): [Effect of low-frequency pulse-modulated 460 MHz electromagnetic irradiation on Drosophila embryos]. *Radiats Biol Radioecol* 41 (4): 399 - 402
- Cain CA (1980): A theoretical basis for MW and RF field effects on excitable cellular membranes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 28: 142
- Cain CA, Rissmann WJ (1978): Mammalian auditory responses to 3.0 GHz microwave pulses. *IEEE Trans Biomed Eng* 25 (3): 288 - 293
- Chiabrera A, Bianco B, Moggia E, Kaufman JJ (2000): Zeeman-Stark modeling of the RF EMF interaction with ligand binding. *Bioelectromagnetics* 21 (4): 312 - 324
- Chou C, Galambos R, Guy AW, Lovely RH (1975): Cochlear Microphonics Generated by Microwave Pulses. *J Microw Power* 10 (4): 361 - 367
- Czerska EM, Elson EC, Davis CC, Swicord ML, Czerski P (1992): Effects of continuous and pulsed 2450-MHz radiation on spontaneous lymphoblastoid transformation of human lymphocytes in vitro. *Bioelectromagnetics* 13 (4): 247 - 259
- Elder JA, Chou CK (2003): Auditory response to pulsed radiofrequency energy. *Bioelectromagnetics*: S162 - S173
- Frey AH (1962): Human auditory system response to modulated electromagnetic energy *J Appl Physiol* 17 (4): 689 - 692
- Frey AH (1961): Auditory System Response to Radio-Frequency Energy. *Aersp. Med.* 32: 1140-1142
- Fröhlich H, Kremer F (Hrsg.) (1983): *Coherent Excitations in Biological Systems*. Springer Verlag, Berlin
- Grundler W, Keilmann F, Froehlich H (1977): Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves. *Phys Letters* 62A: 463-466
- Guy AW, Chou CK, Lin JC, Christensen D (1975): Microwave-Induced Acoustic Effects in Mammalian Auditory Systems and Physical Materials. *Ann N Y Acad Sci* 247: 194 - 218
- Keilmann F (1985): Resonant Biological Effects of Microwaves. *Physik in unserer Zeit.* 16: 33-39
- Konovalov VF, Serikov IS (2001): Delayed effects of modulated and non-modulated electromagnetic field on epileptiform activity in rats. *Radiats. Biol. Radioecol.* 41: 207 - 209
- Montaigne K, Pickard WF (1984): Offset of the vacuolar potential of Characean cells in response to electromagnetic radiation over the range 250 Hz-250 kHz. *Bioelectromagnetics*, 5 (1): 31 - 38
- Penafiel LM, Litovitz T, Krause D, Desta A, Mullins JM (1997): Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics*, 18 (2): 132 - 141
- Pickard WF, Rosenbaum F (1978): Biological effects of MW at the membrane level: two possible athermal electrophysiological mechanisms and proposed experimental tests. *Math. Biosc.* 39: 235
- Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J, Harris AW (1997): Lymphomas in Eμ-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 147 (5): 631 - 640
- Rissmann WJ, Cain CA (1975): Microwave hearing in mammals. *Proc Natl Elec Cong* 30: 239-215
- Silny J (1999): Rectification of RF Sine Wave Packages in Excitable Cells, Tested in In Vivo Investigations. *Proc. IEEE* 15.1:211
- Silny J (1998): Interference of Cardiac Pacemakers in the Near Fields of Portable Digital Transmitters. In G.L. Carlo (Ed.). *Wireless phones and health*. Scientific Progress, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 305 - 315
- Zwarborn PM, Vossen SHJA, van Leersum BJAM, Noonan D, Finnie J, Harris AWI (2003): Effects of global communication system fields on well-being and cognitive function of human subjects with and without subjective complaints. TNO Report FEL-03-C148, Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague