

Gepulste Felder – eine besondere Gefahr für die Gesundheit?

Gepulste Felder – eine besondere Gefahr für die Gesundheit?

Impressum

Herausgeber:

BG Elektro Textil Feinmechanik
Gustav-Heinemann-Ufer 130
50968 Köln

Forschungsgemeinschaft Funk e.V.
Rathausgasse 11 a
53111 Bonn

Verantwortlich:

Dr.-Ing. Gerd Friedrich
Forschungsgemeinschaft
Funk e.V.

Dipl.-Ing. Markus Fischer
Berufsgenossenschaft
Elektro Textil Feinmechanik

Konzeption und Redaktion:

Dr.-Ing. Gerd Friedrich
Dr. Volker Bökelmann
Dr.-Ing. Fred-Jürgen Breit
Anette Kellendonk
Dipl.-Ing. Matthias Meier
Dipl.-Phys. Wolfgang Michaelis
Dipl.-Ing. Uwe Möbius
Dipl.-Ing. Reinhold Wehner
Daniela Wernze
Dipl.-Ing. Jürgen Zschernitz

Die Anhänge zu diesem Buch finden Sie
auf der beigefügten CD.
Gestaltung der CD: krassmann produktion

Alle Rechte vorbehalten

2. Auflage 2009

Hinweis:

Einige Artikel dieser Publikation enthalten Angaben von Links zu externen Webseiten. Bei Erscheinen waren diese externen Links unseres Wissens nach unbedenklich und aktuell. Da Webseiten im Internet veränderlich sind, können wir nicht ausschließen, dass Inhalte verändert oder deaktiviert werden. Die Verantwortung für Inhalt und Aktualität der genannten Webadressen liegt bei den rechtlich Verantwortlichen des jeweiligen Internetangebots. Die FGF bzw. BG Elektro Textil Feinmechanik übernimmt keine Haftung für Schäden materieller und ideeller Art, die durch die Nutzung der Links entstehen. Die Gewähr für Inhalt und Aktualität der externen Links auf Webseiten ist ausgeschlossen.

Inhalt

Editorial	6		
1 Einführung	7		
2 Grundlagen und Anwendungen der Nachrichtentechnik	8		
2.1 Erläuterung der Grundbegriffe	8		
2.1.1 Pulse – gepulste Felder	9		
2.1.2 Funk	12		
2.1.3 Modulation und Demodulation in der Nachrichtentechnik	14		
2.1.4 Digitalisierung als wesentlicher Fortschritt	20		
2.2 Wo werden gepulste Signale praktisch eingesetzt?	22		
2.2.1 Vergleich der digitalen Modulation des GSM-Mobilfunks mit den Synchronimpulsen von TV-Sendern	23		
2.2.2 Gepulste Hochfrequenz in der Radartechnik, Technisches Prinzip und Anwendungen	27		
2.2.3 Gepulste Felder außerhalb des RF-Frequenzbandes, erstes Beispiel: Laser	31		
2.2.4 Gepulste Felder außerhalb des RF-Frequenzbandes, zweites Beispiel: Das Stroboskop	37		
2.3 Vorsorglicher Personenschutz	38		
2.3.1 Schutz und Sicherheit	39		
2.3.2 Neue Technologien: Das Vorhaben miniWatt	41		
2.3.3 Personenschutzkonzept am Beispiel der Magnetresonanztomografie	45		
3 Biologische Hintergründe und Stand der Forschung	49		
3.1 Pulse in der Biologie – Wo treten sie auf und was könnten gepulste hochfrequente elektromagnetische Felder in der Biologie bewirken?	49		
3.1.1 Gepulste Vorgänge im menschlichen Körper Bieten sie Angriffspunkte für die Einwirkung gepulster elektromagnetischer Felder?	50		
3.1.2 Biophysikalische Primärreaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder	59		
3.1.3 Welche Demodulationsmechanismen hochfrequenter Felder in biologischen Systemen sind bekannt?	67		
3.1.4 Ist der Sehapparat des Menschen durch gepulste elektromagnetische Felder des Mobilfunks beeinflussbar?	70		
3.1.5 Erregungsleitung in Nerven – Angriffspunkt für elektromagnetische Felder?	80		
3.1.6 Einfluss von DECT-Telefonen auf den Menschen – Aktuelle Studien im Fokus	84		
3.1.7 Gepulste Hochfrequenz in der Radartechnik, Biologische Auswirkungen	87		
3.1.8 Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Anfallprovokation bei Personen mit Epilepsie	91		
3.2 Schnellschuss oder wissenschaftliche Qualität? Verwirrende Vielfalt der Forschungsaktivitäten	94		
3.2.1 Literaturanalyse zu experimentellen biomedizinischen Studien über Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder unter besonderer Berücksichtigung des Unterschieds zwischen „gepulsten“ und „ungepulsten“ Feldern	95		
3.2.2 Mechanismen der Einwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme, Zusammenfassung von Workshops und Seminaren	104		
3.3 Gezielte Nutzung gepulster Felder in der Biologie	106		
3.3.1 Gepulste Felder zur Therapie von Knochen und Gelenken – sind die derzeit verwendeten Geräte wirksam?	107		
4 Wie objektiv ist die öffentliche Wahrnehmung?	114		
4.1 Gepulste Gefahr? Die öffentliche Diskussion am Beispiel der DECT-Telefone	115		
4.2 Warum ist der Mobilfunk im Focus der Ängste?	116		
4.2.1 Angst vor steilen Flanken?	117		
4.2.2 Pulsung: Argumente mit dem Schlagbohrhammer	119		
4.2.3 Biologische Relevanz gepulster Signale in der öffentlichen Diskussion	123		
5 Forschungsergebnisse, Normung und Schutz, Perspektiven	127		
5.1 Aufgabe der nationalen und internationalen Normung	128		
5.2 Wie bewertet ICNIRP gepulste elektromagnetische Felder?	131		
5.3 Statements der Expertenkommissionen	135		
5.4 Statements einzelner Experten/Meinungsbildner	136		
6 Ist die Pulsung nun erkannt als die wahre Ursache schädlicher Effekte?	139		
6.1 Wirken gepulste Felder anders? Stand der Forschung, Konsequenzen, Perspektiven	140		
6.2 Was tun mit dem Restrisiko? Risikowahrnehmung und Risikokommunikation	143		
7 Glossar	148		
8 Autorenverzeichnis	156		

Leseanleitung

(auch) für den eiligen Leser
von Gerd Friedrich

Liebe Leserinnen und Leser,

Sie sollten diese Einleitung unbedingt lesen, nicht nur weil wir versuchen, Ihnen ein heiß diskutiertes Thema sachlich näher zu bringen, sondern auch um uns Gelegenheit zu geben, Ihr Verständnis dafür zu erbitten, dass beim besten Bemühen um Klarheit und strikt sachliche Erläuterungen unsere Möglichkeiten, allumfassend und in jeder Einzelheit zu berichten, dennoch limitiert sind.

Wir wissen um unsere beschränkten Möglichkeiten, da

- es eine hoch komplexe Thematik auch für den Fachmann darstellt,
- es sich um ein interdisziplinäres Fachgebiet handelt und es den Universalgelehrten schlechthin nicht gibt,
- es (leider) unterschiedliche Wissenschaftssprachen der einzelnen, beteiligten Fachdisziplinen mit anderen Wortbedeutungen und -inhalten gibt,
- das Wissensgebiet noch nicht abgeschlossen ist,
- es sich um ein weit ausuferndes Thema handelt und wir uns daher inhaltlich beschränken müssen,
- wir auch nur Menschen sind, die sich auch bei bestem Bemühen irren können.

Dieses Buch ist so konzipiert, dass es nicht von vorn nach hinten gelesen werden muss, auch die einzelnen Kapitel und Beiträge sind separat verständlich. Dabei kann es zu Wiederholungen von Darstellungen und Erläuterungen kommen, die aber dem besseren Verständnis der Ausführung dienen sollen. Im umfangreichen Glossar sind die wichtigsten Begriffe erläutert. Darüber hinaus sind gut verständliche Erläuterungen zu der Materie im Internet unter www.fgf.de und www.emf-portal.de erhältlich.

Dieses Buch ist von mehreren Autoren geschrieben worden. Bei allem Streben nach Vereinheitlichung der Beiträge lassen sich gewisse Eigenheiten der Wortwahl und des Satzbaues nicht vermeiden. Wir haben alle unsere Besonderheiten, und jeder Autor hat für seine Version gekämpft. Wo es uns angebracht zum Verständnis schien, haben wir Schemata und Abbildungen in verschiedenen Kapiteln wiederholt, um die Verständlichkeit des Beitrages zu erleichtern. Ein Teil der Beiträge ist auch schon vorab in gleicher oder ähnlicher Form im Newsletter der FGF erschienen, ihre Wiederholung ist aber für das Verständnis der Materie unerlässlich.

In eigener Sache möchten wir an dieser Stelle betonen, dass wir uns um höchste Objektivität in der Darstellung des Sachverhaltes bemüht haben und uns allein den technischen und wissenschaftlichen Fakten verpflichtet fühlen. Dies soll kein leeres Versprechen bleiben, es ist uns ernst damit.

Unser besonderer Dank gilt allen Autoren, die sich in vorbildlicher Weise in dieses Projekt eingebracht haben, der Berufsgenossenschaft Elektro Textil Feinmechanik, die uns bei der Drucklegung des Werkes unterstützt hat, und insbesondere allen, die darüber hinaus zur Realisierung des Vorhabens beigetragen haben.

Vorwort

des Staatssekretärs im Bundesministerium
für Wirtschaft und Technologie, Dr. Bernd Pfaffenbach

Sehr geehrte Damen und Herren,

wir alle sind von Funkwellen, d. h. von elektromagnetischen Feldern umgeben: Ein Teil stammt von natürlichen Quellen, der andere wird von „Menschenhand“ generiert, um uns beispielsweise das alltägliche Leben zu erleichtern oder die moderne Kommunikation zu ermöglichen.

Besonders mit dem Ausbau der Mobilfunk-Netze und dem Beginn der drahtlosen Massenkommunikation Anfang der neunziger Jahre sind diese Felder in die öffentliche Diskussion gekommen, sah man doch überall Sendemasten wie Pilze aus dem Boden sprießen. Die rasante Entwicklung der Mobilkommunikation mit immer mehr Sendern, immer mehr Empfängern, immer mehr und höheren Frequenzen überholte das allgemein verbreitete Wissen um die dahinterstehende Technik und begann so in Teilen der Bevölkerung auch Ängste hervorzurufen. Das Wort „Elektrosmog“ tauchte auf, ein Kunstwort aus „elektro-“ und dem englischen Wort „Smog“, und damit erste Bedenken über gesundheitliche Auswirkungen. Seitdem ist die Verträglichkeit elektromagnetischer Felder mit der Umwelt, kurz EMVU genannt, zu einem gesellschaftlichen Thema geworden.

Die Bundesregierung sah mit der Einführung dieser neuen Technik schon früh die besondere Verantwortung der Politik gegenüber dem einzelnen Bürger und hat von Anfang an reagiert. Das bereits 1989 als wissenschaftlich-technische Bundesbehörde eingerichtete Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) koordiniert heute im Rahmen des Mobilfunkforschungsprogramms Untersuchungen und Messungen. Die deutsche Strahlenschutzkommission gibt Grenzwertempfehlungen.

Ergänzend wurde 1992 die Forschungsgemeinschaft Funk e.V. (FGF) vom damaligen Bundesministerium für Post und Telekommunikation gemeinsam mit der beteiligten Wirtschaft gegründet. Der FGF gehören heute in Deutschland und dem benachbarten Ausland mehr als 50 Mitglieder von Rundfunkanstalten, Netzbetreibern, Herstellerfirmen, von Behörden und wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen an. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unterstützt die Ziele der FGF, Forschungsvorhaben zur Beurteilung der Wirkung elektromagnetischer Felder auf den Menschen zu fördern und die Ergebnisse im Rahmen einer aktiven Öffentlichkeitsarbeit darzustellen.

Ebenso seit 1992 gibt es das Standortverfahren für ortsfeste Funkanlagen. Darin legt die Bundesnetzagentur den Sicherheitsbereich um eine Funkanlage fest, der nicht betreten werden darf, um vor elektromagnetischen Feldern sicher geschützt zu werden. Die Daten sind im Internet veröffentlicht und werden von der Bundesnetzagentur kontinuierlich stichprobenweise überprüft. Seit kurzem kann sie auch mittels transportabler Messsysteme elektromagnetische Felder rund um die Uhr vermessen. Auch diese Daten sind öffentlich zugänglich.

Eine spezielle Fragestellung zur EMVU, die in den letzten zwei Jahren die Fachwelt und auch die Öffentlichkeit beschäftigt, betrifft die Wirkung so genannter „gepulster“ Felder. Die wissenschaftliche Fachwelt diskutiert uneinheitlich über den Einfluss gepulster Felder auf lebende Organismen, denn bisher ist darüber „seriös“ nur vereinzelt berichtet worden.

Ich begrüße es daher, dass die Berufsgenossenschaft Elektro Textil Feinmechanik das Thema zum Anlass genommen und mit Unterstützung der Forschungsgemeinschaft Funk diesen Sonderband herausgegeben hat. Darin werden erstmals die technischen Grundlagen elektromagnetischer Felder im Zusammenhang erläutert. Die biologischen Wirkungen und auch mögliche psychische Auswirkungen gepulster Signale werden diskutiert. Experten verschiedener Disziplinen kommen zu Wort und erlauben so einen umfassenden Einblick in „Gepulste Wellen und ihre Wirkung“.

Mögen alle diese Maßnahmen dazu beitragen, die Sorgen der Öffentlichkeit gegenüber den elektromagnetischen Feldern, ob nun gepulst oder ungepulst, weiter zu reduzieren. Verschweigen möchte ich aber nicht, dass neben dem unverzichtbaren Schutz der Bevölkerung auch ein prosperierender Markt vor Eingriffen zu schützen ist, die aus wissenschaftlicher Sicht unbegründet sind.

Ich wünsche dem Leser eine spannende Lektüre.

Dr. Bernd Pfaffenbach

Editorial

von Gerd Friedrich

Die Forschungsgemeinschaft Funk nimmt sich mit dem vorliegenden Buch dem heiß diskutierten Thema möglicher biologischer und gesundheitlicher Wirkungen gepulster elektromagnetischer Wellen an, wie sie in vielfältigen technischen Anwendungen, u.a. auch im Bereich des Mobilfunks heute verwendet werden.

Dieses Thema berührt uns alle, da die fortschreitende Einführung neuer Technologien wie auch die zunehmende persönliche Nutzung von Funkanwendungen in einem wachsenden Teil der Bevölkerung Beunruhigung über vermutete gesundheitliche Folgen auslöst. Die Behandlung dieser Fragen in den Medien ist dabei häufig gekennzeichnet von „Sensationsmeldungen“, deren Inhalt meist objektiver wissenschaftlicher Überprüfung nicht standhält. Die Möglichkeiten des Einzelnen zur objektiven Information über den Stand der Forschung sind angesichts einer fast unüberschaubaren Vielfalt internationaler Forschungsbemühungen und -ergebnisse sehr beschränkt.

Mit dem vorliegenden Werk soll der Versuch unternommen werden, uns diesem wichtigen und hochinteressanten Thema neutral und aus wissenschaftlicher Sicht zu nähern. Wer sich mit dem Thema „Pulsung“ näher beschäftigt, muss schnell erkennen, dass der Anspruch, ein umfassendes Dokument zu diesem Gebiet zu erstellen, der Quadratur des Kreises gleich kommt. Noch längst ist das wissenschaft-

liche Themengebiet nicht abgeschlossen, viele Fragen können derzeit noch nicht abschließend beantwortet werden, die Thematik ist hochkomplex und abstrakt und die laufende Forschung trägt mit ständig neuen Erkenntnissen zu einer andauernden Erweiterung unseres Wissens auf diesem Gebiet bei.

Leider macht uns der Umfang dieses wissenschaftlichen Fachgebietes eine allumfassende Darstellung unmöglich. Wir müssen uns auf die wichtigsten und interessantesten Themen konzentrieren, insbesondere werden wir uns daher auf die Behandlung von Hochfrequenz-Aspekten und die soziographische Situation in den deutschsprachigen Ländern beschränken.

Zur Behandlung der Themen haben wir Fachartikel verschiedener Autoren zusammengestellt. Neben hoher Fachkompetenz in jedem Einzelbeitrag werden damit auch eine Vielfalt in der individuellen Themenbehandlung und eine Auflockerung durch unterschiedliche Schreibstile erreicht.

Wir hoffen durch die leider notwendige Themenauswahl dennoch (auch) Ihren Interessen gerecht zu werden, viele Ihrer Fragen beantworten zu können und Ihnen einen aufschlussreichen (und unterhaltenden) Überblick über diesen vielfältigen, hochinteressanten Forschungsbereich geben zu können.

Wie bereits in der Leseanleitung angedeutet, ist das vorliegende Dokument nicht dazu gedacht, in einem Zug gelesen zu werden, es soll dem Leser vielmehr wissenschaftliches Nachschlagewerk und Lehrbuch zugleich sein und darüber hinaus vielfältige Informationen bereitstellen, die über das augenblickliche Interesse hinausgehen. Dabei erhebt es durchaus den Anspruch, sowohl für den mit dem Thema befassten Wissenschaftler als auch für den Laien interessante und neue Informationen zu vermitteln.

Dennoch wird es gerade für den Laien nicht leicht sein, den teilweise sehr wissenschaftlichen Artikeln folgen zu können. Unsere Bitte: Lassen Sie sich nicht abschrecken. Wir haben uns bemüht, das Verständnis der komplexen Sachverhalte durch technische Grundlagenartikel zu unterstützen. Als weitere Hilfen sind ein ausführliches Glossar sowie eine umfangreiche Adressliste zu weiterführenden Informationen im Internet beigefügt, ebenso wie eine Liste mit Adressen zahlreicher mit dem Thema befasster Stellen. Zusätzliche Informationen enthält die beiliegende CD.

Bei weitergehendem Interesse zu speziellen Aspekten helfen die Literaturangaben in den einzelnen Fachartikeln weiter.

1 Einführung

Um mit einem Stereotyp zu beginnen: „Elektrische, magnetische und elektromagnetische Wellen sind Bestandteil unseres Lebens“ und kommen natürlicherweise überall in unterschiedlichen Frequenzen und Stärken vor. In Form von Licht sind sie unverzichtbar für die Wahrnehmung unserer Umwelt, bei Gewittern nehmen wir auch ihre gefährlicheren Aspekte unmittelbar wahr. Gebräuchlich sind auch die Begriffe: „Strahlung“ und „Felder“ für die „Wellen“.

Wir wollen uns bei unserer Betrachtung auf den nicht-ionisierenden Teil der Strahlung und hier vor allem auf den Bereich der energiearmen Wellen von Funkanwendungen beschränken. An dieser Stelle noch ein ergänzender Hinweis: Wenn in den Ausführungen nicht speziell auf eine besondere Situation bei „gepulsten“ Signalen eingegangen wird, sind die Erläuterungen allgemein gültig und beinhalten sowohl sinusförmige als auch rechteckige oder sonstige spezielle Signalformen.

Als der Mensch die Eigenschaften von Wellen entdeckte, erforschte und sie auch künstlich herzustellen verstand, kam Skepsis auf, ob diese Wellen denn wohl für die Gesundheit unbedenklich seien. Anfangs beschränkten sich die Befürchtungen darauf, dass die Sendequellen und andere elektrische Bauteile explodieren könnten. Später kam die Angst vor den Strahlen selbst hinzu, da es erste Erfahrungen mit Röntgen- und Gammastrahlen gab, die die Gefahren energiereicher, ionisierender Strahlung aufzeigten. Aber erst mit Beginn der aktiven Verwendung im Hochfrequenzbereich, wie der Telegraphie und dann insbesondere mit dem Massenmarkt der Mobilfunk-D- und -E-Netze, wurden die Stimmen lauter, die mit den zunehmenden Anwendungen elektromagnetischer Wellen gesundheitliche Auswirkungen befürchteten.

Dennoch – der Vorwurf, dass neue Technologien ohne „Umweltverträglichkeits-

prüfungen“ auf die Menschheit losgelassen werden, stimmt nicht, da man, als die ersten Rundfunkanstalten ihren Betrieb aufnahmen und erste Meldungen über Beeinträchtigungen aufkamen und bekannt wurden, unverzüglich Schutzregeln und -maßnahmen einführte. Diese Erscheinungen wurden übrigens von den Technikern der Sendeanstalten als „Senderkrankheiten“ oder „Kurzwellenkater“ bezeichnet.

Später interessierten dann auch Fragen zu gegenseitiger Beeinflussung von technischen Geräten, der sogenannten „elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von technischen Systemen“. Solche technischen Probleme werden in dieser Ausarbeitung nicht berührt. Nur die vermuteten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (EMVU) sind Gegenstand dieses Buches.

Viele physikalische Vorgänge sind nicht einfach zu verstehen, und so ist es verständlich, dass leicht Ängste über diese unsichtbare, nicht mit menschlichen Sinnen ohne weiteres erfahrbare, aber dennoch überall vorhandene Strahlung entstehen konnten. Erstmalig gewann diese Problematik zum Ende des vergangenen Jahrtausends durch den Gebrauch der Mobiltelefone eine starke soziologisch-politische Relevanz, da millionenfach Bürger mit den kleinen HF-Sendern am Ohr unmittelbarer einer EMF-Exposition ausgesetzt waren.

Um eventuelle Gefährdungen oder Beeinträchtigungen einschätzen zu können, mussten viele Daten erhoben werden. Analysen wurden gefertigt, Messungen und Kalkulationen erstellt, um Anwendungen bestimmten Frequenzbereichen zuordnen und potenzielle Gefährdungen einschätzen zu können. Viele Forschungsvorhaben wurden initiiert sowie Tausende von Versuchen auf nationaler und internationaler Ebene durchgeführt und ausgewertet. Auf Basis der intensiven For-

schung wurden Schutz- und Grenzwerte für gesundheitlich unbedenkliche Strahlungsstärken festgelegt, die als Grundlage für die technische Anwendung herangezogen werden können.

Zwar ergaben sich in der seriösen, replizierbaren Forschung keinerlei Hinweise auf Beeinträchtigungen oder gar Schädigungen, wenn die oben erwähnten Grenzwerte nicht überschritten wurden, doch fanden Besorgte mit steigender Häufigkeit immer wieder neue Vermutungen über spezielle Gefährdungsursachen. Ein beliebtes Beispiel, das immer wieder genannt wird, sind die so bezeichneten „gefährlichen“ gepulsten Signale.

Hierbei werden Assoziationen aufgestellt, die die Wirkung von Pulsen mit der Wirkungsweise eines Schlagbohrhammers vergleichen, der auch eine dicke Betonwand durchdringen kann. Mittels des Zitates: „Steter Tropfen höhlt den Stein“ wird nahe gelegt, dass solche Signalformen besonders gefährlich seien.

Die Fragen aber lauten nun: „Ist diese Angst begründet?“, „Sind Pulse bzw. gepulste Signale von unserem Körper überhaupt wahrnehmbar?“, „Beeinflussen sie gar unsere Gesundheit?“. Diese Thematik hat uns beschäftigt und dazu inspiriert, ein Buch zum Thema „Pulse/Pulsung bei elektromagnetischen Feldern im Hochfrequenzbereich“ herauszugeben, in dem über neueste Forschungsergebnisse berichtet wird und Experten medizinischer, technischer und biologisch-physikalischer Fakultäten ihre Einschätzung und Stellungnahme abgeben. Und da die Zusammenhänge sehr komplex, die Materie vielfältig und die Antworten sehr wissenschaftlich sind, finden Sie am Ende dieser Publikation eine Schlussbetrachtung, die das Wesentliche noch einmal kurz und verständlich zusammenfasst.

2 Grundlagen und Anwendungen der Nachrichtentechnik

Das Kapitel 2 umfasst die wichtigsten Erläuterungen, die – unserer Meinung nach – für das Verständnis des behandelten Themas: „Sind gepulste Signale gegenüber Sinus-Signalen etwas Besonderes?“ aus technischer Sicht notwendig sind. Natürlich kann in diesem Rahmen nicht alles angesprochen werden, aber die zum Verständnis dieser Thematik wichtigsten Begriffe werden in Kapitel 2 behandelt, wie z.B. Funk, Pulsung, Modulation/Demodulation und Digitalisierung.

Daneben finden sich Anwendungsbeispiele aus der technischen Praxis, wo „gepulste“ Signale für das Funktionieren der Technik (Mobilfunk der 2. Generation, Radar, Laser, Magnetresonanztomografie) eine große Rolle spielen. Ein Unterkapitel ist dem Thema „Schutz- und Sicherheitskonzeption für Mensch und Umwelt“ gewidmet.

Am Ende des Kapitels 2 folgt mit dem Beitrag zum Vorhaben miniWatt noch ein Ausblick auf zukünftige technische Entwicklungen in der Anwendung von gepulsten elektromagnetischen Feldern.

2.1 Erläuterung der Grundbegriffe

Begriffe wie Funk, Strahlen, Pulsung und Digitalisierung treten in der EMVU-Diskussion immer wieder auf und werden bisweilen sogar in „politische Reizwörter“ umgewandelt wie „Strahlung“, „harte Taktung“, „knallharte Pulsung“, „steile Flanken“, „digitale Pulsung“ oder „digitale Modulation“ und werden damit nicht mehr sachorientiert benutzt.

Der Gebrauch der Technik ist Alltag, aber die Funktionsweise ist oft nicht vertraut. Da die Begriffe und deren Inhalte wesentlich für das Verständnis des ganzen vorliegenden Bandes sind, sollen sie eingangs erläutert werden.

Die Technik hat inzwischen eine hohe Komplexität erreicht. Zum besseren Verständnis sollen die Erklärungen möglichst anschaulich sein. Dies bedeutet einerseits, dass Vorgänge durch zahlreiche Zeichnungen visualisiert werden und dass andererseits einfacher Darstellung der Vorrang vor hoher Genauigkeit gegeben wird. Ziel ist es im Wesentlichen, einen Einblick in die Materie zu geben. Da die

behandelten technischen Prinzipien nicht isoliert vorkommen, können sie auch nicht völlig losgelöst von einander beschrieben werden. Ziel ist es also, dem interessierten Leser eine Brücke zu den technischen und wissenschaftlichen Artikeln des Buches zu bauen.

„Die Natur macht keine Sprünge“, besagt eine alte Weisheit. Die Technik kann es auch nicht. Alle Zustandsänderungen brauchen Zeit, deshalb können auch Pulsflanken nicht beliebig steil werden. Was unter **Pulsen** zu verstehen ist – dasselbe ist mit Taktung gemeint – und wie ihr Zeitverlauf mit ihrem Frequenzinhalt zusammenhängt, wird im ersten Abschnitt beschrieben. Als nächster Grundbegriff der Nachrichtentechnik kommt **Funk** an die Reihe. Vom Alltag her ist er jedem durch Radio und Fernsehen bestens bekannt, weniger aber die Physik, die dahinter steckt. Funk wiederum ist untrennbar mit den Verfahren der **Modulation** und **Demodulation** verbunden. Die **Digitalisierung** schließlich, die die moderne Technik längst beherrscht, rundet die

Übersicht ab. Geht es inhaltlich in jedem Abschnitt hauptsächlich darum, wie etwas funktioniert, so wird am Schluss der Abschnitte jeweils kurz zusammengefasst, warum man diese Verfahren anwendet bzw. welchen Nutzen sie bringen.

Nach diesen grundlegenden Begriffen wird der Schritt zu bekannten Anwendungen getan. Es beginnt mit **Pulsanteilen bei Mobilfunk und Fernsehen**, geht über **Radar** zu **Laser** und endet schließlich beim **Stroboskop**.

Dass aber auch der Schutz von Personen nicht außer Acht gelassen wird, zeigen die abschließenden Artikel des Kapitels Technik. Zuerst geht es um Schutz und Sicherheit durch **Grenzwerte**, dann um die Verringerung von Sendepiegeln im Projekt **miniWatt**. Schließlich wird am Beispiel der **Magnetresonanztomografie** gezeigt, wie man ein Konzept entwickelt (hat), das für Sicherheit vor Schäden durch die Technik sorgt. Gleiches gilt natürlich für die elektromagnetischen Felder des Alltags.

2.1.1 Pulse – gepulste Felder

Fred-Jürgen Breit

Unter Pulsen versteht man gemeinhin das plötzliche und wiederholte Einsetzen und Abbrechen eines Signals. In der Nachrichtentechnik wird es seit langem angewendet, weil man für die Übertragung von Information auf einer Leitung oder über Funk keinen kontinuierlichen Wellenzug braucht, sondern mit regelmäßigen Stücken davon auskommt. Die zeitlichen Lücken können für weitere Übertragungen genutzt werden. So gelingt es, durch zeitliche Schachtelung von Informationen (Zeitmultiplex) die knappe Ressource Frequenz vielfach auszunutzen.

Einleitung

Sucht man in Lehrbüchern oder großen Lexika Aufklärung über Pulse oder gepulste Felder, dann bleibt die Suche fast erfolglos. Zwar finden sich Hinweise und Erläuterungen zu Impuls (rein mechanisch), zum Puls (medizinisch) oder zu Pulsaren (astrophysikalisch). Aber das, worauf sich die EMV-Diskussion beim digitalen Mobilfunk seit beinahe anderthalb Jahrzehnten bezieht, taucht nur als magere Definition auf: „(Elektrotechnik/ Technik) periodische Folge von Impulsen; der Augenblickswert des periodischen Vorgangs nimmt innerhalb einer Periodendauer nur während eines Zeitabschnitts von null verschiedene Werte an“ [1]. Lediglich beim Arbeitsschutz in der Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ hat man sich diesem Aspekt systematisch genähert [2]. Am Ende dieses Abschnitts wird darauf zurückgekommen. (Anzumerken ist noch, dass die Wörter Impuls und Puls in diesem Zusammenhang weitgehend synonym verwendet werden.)

Einfache Pulsformen

Die Natur von Pulsen (= Stößen) lässt sich anhand von Spannungsstößen veranschaulichen. Sie werden erzeugt, indem eine Gleichspannung regelmäßig ein- und ausgeschaltet wird oder ihre Polarität wechselt. Als Verlauf der elektrischen Spannung erhält man dann Rechteckpulse über und unter der Zeitachse (**Abb. 1**).

Bei Pulsen muss es sich der Form nach nicht um Rechtecke handeln, es können auch gleichseitige Dreiecke oder ungleichseitige („Sägezahn“) wie auch Trapeze, Ausschnitte von e-Funktionen, Sinusbögen usw. sein (**Abb. 2**). Die gängigsten Pulsformen können mit handelsüblichen Pulsenerzeugern erzeugt werden.

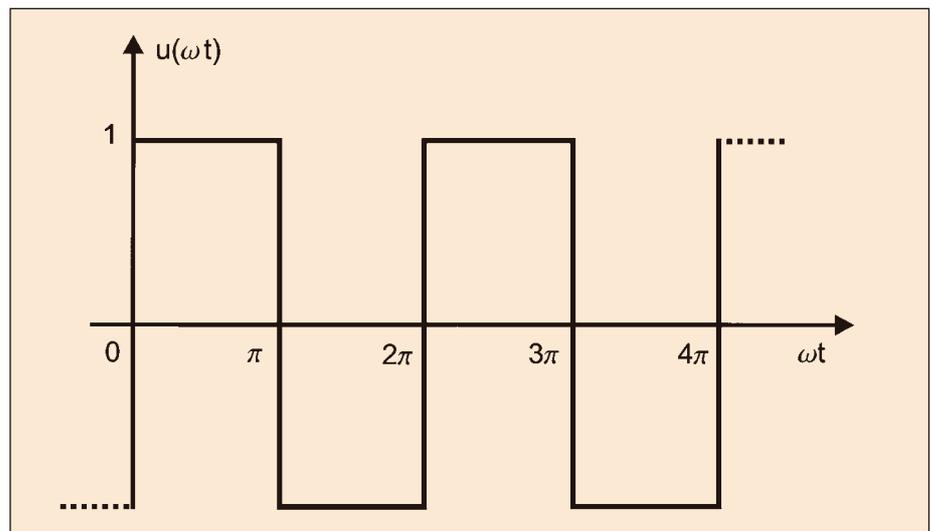


Abb. 1: Schwingung bestehend aus Rechteckpulsen mit wechselnder Polarität

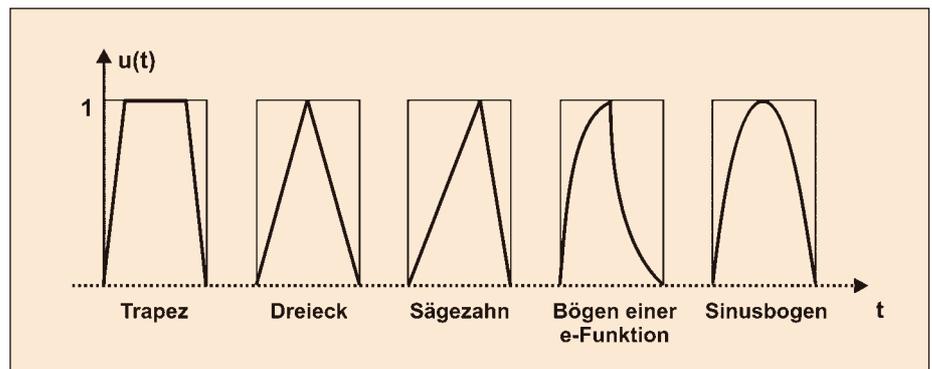


Abb. 2: Andere Beispiele für Pulsformen, die man z.B. mit einem Pulsenerzeuger erzeugen kann

Die Pulse, die durch ein jedem bekanntes Elektrokardiogramm (EKG) aufgezeichnet werden, sind viel weniger regelmäßig.

Schaltet man jetzt eine Wechselspannung ein und aus, dann erhält man als einhüllende Kurve der Sinusschwingung über der Zeitachse wieder in erster Näherung Rechteckpulse. Bei hinreichend hoher Frequenz der Wechselspannung (ab ~20 kHz) ist es möglich, auf eine Leitung zu verzichten, denn Spannung und Strom

können sich über die nun verketteten elektrischen und magnetischen Felder (elektromagnetischen Felder) ausbreiten. Das ist das Wesen des Funkes.

Ersetzt man den Ein- und Ausschalter durch eine Vorrichtung, die die Amplitude der Sinuswelle beeinflusst, ihr z. B. eine niederfrequente Welle aufprägt, so spricht man von Modulation. Man nutzt sie als Amplitudenmodulation im Lang-, Mittel- und Kurzwellenrundfunk (kHz bis MHz)

aus. Ändert man systematisch Frequenz (oder Phase), dann hat man das Prinzip der Frequenzmodulation beim UKW (88-108 MHz). Die Hochfrequenz nennt man jetzt Träger, sie trägt die aufmodulierten Informationen, z. B. niederfrequenten Schall oder die Toninformation „durch den Äther“.

Man hat frühzeitig erkannt, dass man den Träger und das Informationssignal gar nicht permanent übertragen muss. Geschieht es nur oft genug, dann kann man ein Signal wiederherstellen, wenn es nur in kurzen Zeitschlitzes gesendet wird. Diese Zeitschlitzes entsprechen Pulsen, die mit einer modulierten Hochfrequenz gefüllt sind. Die frei gewordene Zeit wird für andere gleichartige Übertragungen verwendet. Das eben beschriebene Verfahren bietet die Möglichkeit, durch Zeitmultiplex die Ressourcen Frequenz und Zeit mehrfach zu nutzen, und wird heutzutage sehr häufig angewandt. Diese Anwendung wird ausführlicher im Abschnitt 2.1.4 beschrieben.

Die Beziehung zwischen Kurvenform und Frequenzspektrum

Mit der Kurvenform in Abhängigkeit von der Zeit ist nur eine Dimension erfasst, eine zweite ist die Darstellung in der Frequenzebene. Beide hängen untrennbar zusammen und lassen sich ineinander überführen (Fourier-Transformation). Mit der entsprechenden Messtechnik lassen sich sowohl der Zeitverlauf als auch die Frequenzanteile darstellen.

Kurvenformen haben ganz charakteristische Frequenzspektren; je steiler und abrupter sie einsetzen und enden und je kürzer sie sind, desto breiter sind die Frequenzanteile mit großer Amplitude verteilt und umgekehrt. Das folgt aus dem Zusammenhang (der „Reziprozität“) von Frequenz und Zeit: $f \sim 1/t$. Bei periodischen Vorgängen wie Pulsfolgen kommen nur bestimmte Oberschwingungen (Vielfache der Grundschwingung) vor. Im einfachsten Fall der gleichförmigen Sinusschwingung $\sin(\omega t)$ ist es nur eine einzige Frequenz f , wobei $f = \omega/2\pi$ ist. (Genau genommen gilt dies lediglich für eine Ausdehnung auf der Zeitachse von $-\infty$ bis $+\infty$, aber hinreichend bereits für eine lange Pulsfolge, wie sie in der Nachrichtentechnik vorkommt.)

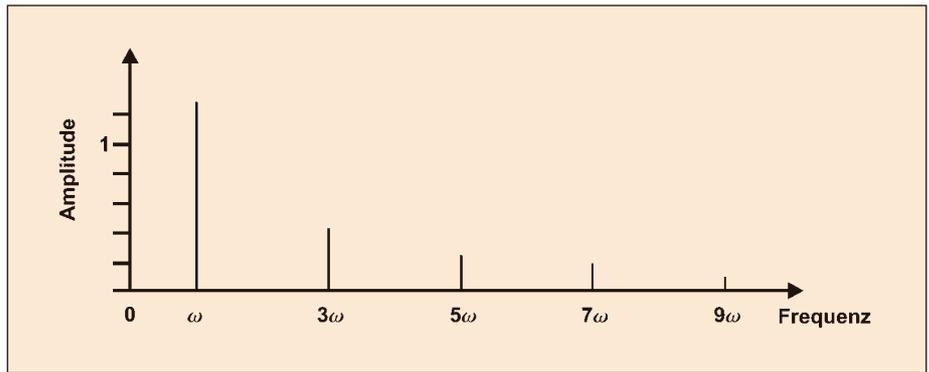


Abb. 3: Zerlegung einer Rechteckschwingung in Grund- und Oberschwingungen des Sinus (Fourieranalyse); es kommen unendlich viele ungeradzahlige Oberschwingungen vor.

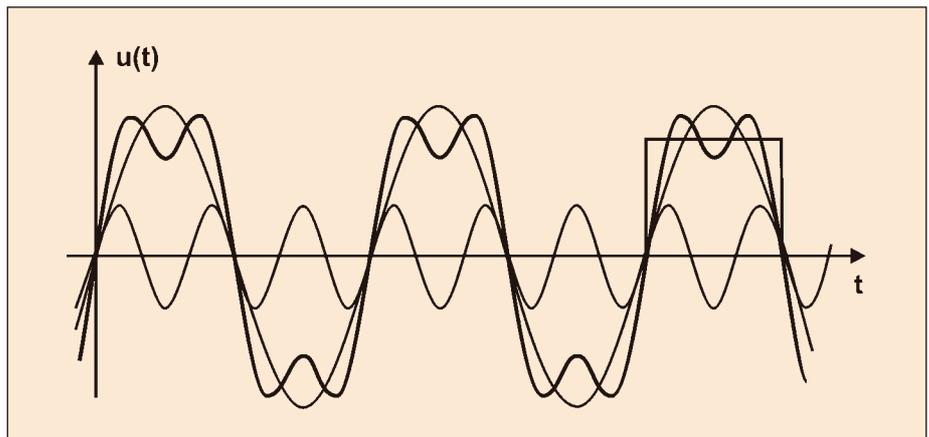


Abb. 4: Näherung einer Rechteckschwingung durch Fouriersynthese aus Sinusschwingungen: Als einfache Näherung in der Zeitebene wird zur Grundschwingung die 3. Oberschwingung (flache Kurve) addiert, es entsteht die Summenkurve (Höckerkurve). Wie dadurch eine stärkere Annäherung an die Rechteckschwingung erreicht wird, ist rechts zu erkennen.

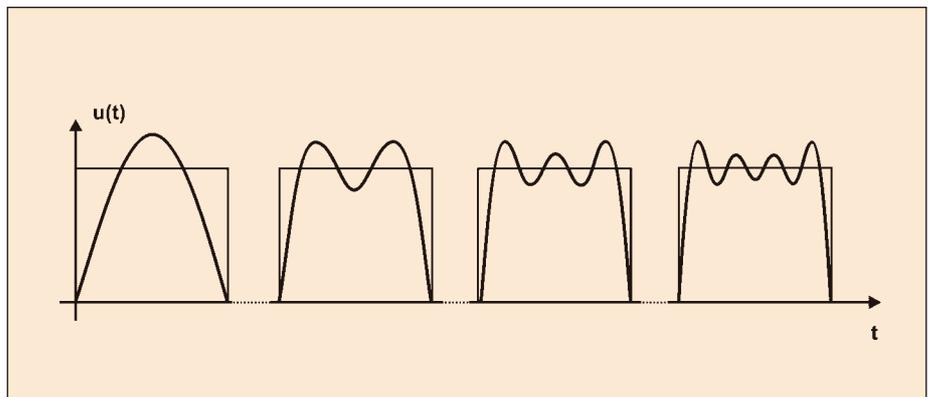


Abb. 5: Näherung einer Rechteckschwingung durch Fouriersynthese aus 1-4 Schwingungen: nur die Grundschwingung ω , Summe $\omega+3\omega$, Summe $\omega+3\omega+5\omega$ und Summe $\omega+3\omega+5\omega+7\omega$

Gleichmäßige Rechteckpulse können durch eine Summe von Sinuswellen mit ungeradzahligem Vielfachen dargestellt werden, ihr Anteil an höheren Frequenzen klingt stark ab (Abb. 3). Dasselbe gilt für Trapez- und Dreieckpulse, wobei hier die Amplituden zu höheren Frequenzen hin noch stärker zurückgehen. Während eine exakte Nachbildung der Kurvenformen nur mit unendlich vielen Sinusschwingun-

gen zu erhalten ist, reichen schon wenige für eine gute Näherung aus (Abb. 4 und 5). Je niedriger die enthaltenen Frequenzen, desto flacher der Anstieg und runder die „Ecken“.

Das mathematische Verfahren für die Zerlegung in Oberschwingungen ist die Fourieranalyse. Man kann sich die Zerlegung entsprechend Abb. 3 oder eine kon-

tinuierliche Verteilung auf einem Frequenzanalysator ansehen. Eine ausführliche Darstellung mit Beispielen findet man z. B. in [3] und [4].

Steilheit der Flanken

Die Anstiegs- und Abfallzeiten (s. Abb. 5) werden in den entsprechenden Normen mit Toleranzen festgelegt (siehe Kap. 2.2.1). Das lässt der technischen Realisierung einigen Spielraum, und man kann sich die maximalen Steigungen ansehen. Schon durch die (str)enge Begrenzung der Frequenzbänder für die einzelnen Nutzungen wird die Steilheit begrenzt (s. Abb. 5), so werden Störungen und Beeinflussungen anderer Anwendungen niedrig gehalten. Dies hat auch seinen Niederschlag im europäischen und deutschen Recht zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) gefunden.

In der Diskussion um die biologische Relevanz wird dennoch immer wieder die „Steilheit der Mobilfunk-Pulse“ angeführt. Bei einem Vergleich der Signalformen des GSM-Mobilfunk-Standards mit denen des terrestrischen analogen Fernsehens hat Prof. Liesenkötter (siehe Abschnitt 2.2.1) gezeigt, dass Pulse im Mobilfunk weder steilere Flanken haben, noch dass sie im Mobilfunk neu sind; beim Fernsehen sind sie im Bild- und Zeilensprung in ähnlicher Form seit langem diskussionslos akzeptiert.

Wesentlich komplizierter und unübersichtlicher wird das Bild bei modernen digitalen Modulationen. Hier gibt es viele Träger und eine breitbandige Frequenzbelegung, die den Charakter eines Rauschens hat.

Was ist ein gepulstes Feld?

Es gibt keine präzise Definition für ein gepulstes Feld. In der „Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Unfallverhütungsvorschrift“ (UVV) [2] bestehen „gepulste Felder aus einer zeitlichen Abfolge von sinus-, trapez-, dreieckförmigen oder exponentiellen Einfach- oder Mehrfachpulsen und Pausen oder Gleichfeldanteilen“. Dies ist für die Fachleute, an die sich diese UVV wendet, eine praktische und anschauliche Beschreibung. Für die vielen inzwischen realisierten technischen Anwendungen hingegen ist sie nicht mehr umfassend genug.

Bei den modernen Modulationsverfahren sind die Verhältnisse längst nicht mehr so einfach, wie in Abb. 1 oder 2 dargestellt; oft sind in der Kurvenform (Hüllkurve) die Pulse nicht mehr zu erkennen. Deswegen hat man den Begriff „Pulshaltigkeit“ gebildet. Im Projekt „miniWatt II“ wurde die Pulshaltigkeit verallgemeinert als „Leistung des niederfrequenten Spektralanteils eines Signals bezogen auf seine Gesamtleistung“ definiert [5]; damit ist der Begriff aber leider auch sehr abstrakt geworden, umfasst alle modulierten Signale und sein Wert ist nur mathematisch bestimmbar.

Gepulste elektromagnetische Felder moderner Funkdienste kann man sich auf der Zeitachse als viele aneinander gereihete Pulse vorstellen, die mit modulierter Hochfrequenz gefüllt sind. Bei der Form der Pulse, sofern man sie wegen der dichten Aneinanderreihung im „Zeitmultiplex“ oder des angewandten Modulationsverfahrens überhaupt als solche erkennen kann, handelt es sich schon aus Gründen der Frequenzbandbegrenzung eher um Trapez- als um Rechteckpulse, wobei die Stärke der Eckenabrundung von der enthaltenen Hochfrequenz bestimmt wird („verschliffene Signale“).

Natürlich gibt es gepulste Felder seit Urzeiten auch in der Natur. In den Sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts suchten Astrophysiker mit sehr großem Antennen- und Messtechnikaufwand den Himmel nach schwachen Radioquellen ab. Die Entdeckung von schnell gepulsten Signalen rief 1967/68 großes Aufsehen hervor, weil man anfangs einen technischen Ursprung für möglich hielt. Die Objekte erhielten den Namen Pulsare. Der Effekt wurde wenig später mit den Magnetfeldern von schnell rotierenden Neutronensternen erklärt. Antony Hewish (GB) erhielt für die Entdeckung und die Erklärung der Pulsare 1974 den Nobelpreis für Physik.

Warum Pulse bzw. gepulste Felder in der Nachrichtentechnik?

Durch Pulse kann eine Übertragung auf das zeitlich notwendige Maß reduziert werden, was Lücken für weitere Übertragungen frei macht. Damit nutzt man die knappen Ressourcen Zeit und Frequenz vielfach aus.

Literatur

- [1] Brockhaus Enzyklopädie, Band 22, 2006, S. 274
- [2] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift – BGV B11, Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, 01.06.2001
- [3] Bruno Klingen, Fouriertransformation für Ingenieur- und Naturwissenschaften, Springer Berlin Heidelberg New York, 2001
- [4] Bronstein-Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch Zürich & Frankfurt
- [5] Projekt „miniWatt II“, Abschlussbericht, Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit; in Veröffentlichung

2.1.2 Funk

Fred-Jürgen Breit

Elektromagnetische Wellen können sich entlang von Leitern (Leitungen), aber auch über den freien Raum ausbreiten. Ist es im ersten Fall erforderlich, zur Übertragung zwischen zwei oder mehr Orten Leitungen zu legen, so geht es mit Funk ohne sie. Beim Funk lassen sich mit einer Rundstrahlcharakteristik Informationen über eine große umliegende Fläche verteilen und damit eine hohe Anzahl von Empfängern versorgen; diese müssen nicht einmal ortsfest sein, sondern können sich bewegen. So gelang es im vorigen Jahrhundert, einerseits schnell eine Rundfunk- und Fernsehversorgung aufzubauen, andererseits später die Mobilität für das Telefonieren einzuführen. Der Funk wird dadurch zum immer universelleren Informationsträger.

Kontinuierliche Schwingungen

Funkwellen breiten sich räumlich aus. Man kann sie sich aber vereinfacht wie eine Oberflächenwelle auf einem Teich vorstellen, in den ein Stein geworfen wurde. Beschränkt man sich gedanklich auf eine Ausbreitungsdimension, so kommt man zur einfachsten Welle, einer simplen Schwingung. Auf diese Weise lässt sich alles Hörbare als mehr oder weniger gleichmäßige Schwingung darstellen und diese auch mechanisch auf einer Walze oder Schallplatte konservieren. Die Schwingung in der Rille einer Schallplatte ist mit der Lupe zu erkennen. Sie entspricht im Zeitverlauf der Dichteschwankung der Luft und lässt sich mit einer Plattenspielnadel abtasten und über Verstärker und Lautsprecher wieder in Schall zurückverwandeln.

Elektromagnetische Wellen sind Wechselwirkungen zwischen dem elektrischen und mit ihm verbundenen magnetischen Feld, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und sehr weit reichen, ohne dass sie die Lebensfunktionen der Lebewesen stören. Daher sind sie gut als Informationsträger geeignet, wobei Information ein Oberbegriff ist auch für Musik und Unterhaltung jeglicher Art. Diese Information – das eigentliche Signal – muss ihnen aufgeprägt werden, dafür gibt es zahlreiche sehr unterschiedliche Modulationsverfahren (siehe Abschnitt 2.1.3). Durch die Entwicklungen im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik können elektromagnetische Wellen erzeugt, praktisch beliebig verändert und genutzt werden; dieses Gebiet nennt sich Funktechnik.

Neue Verteilnetze

Funkwellen breiten sich im freien Raum aus und gelangen praktisch überall hin; es ist nicht erforderlich, Kabel zum Nutzer zu verlegen. Dies wurde ausgenutzt, als es in den 50er Jahren galt, für das Fernsehen ein flächendeckendes Verteilnetz aufzubauen. Es konnte schnell und preiswert mit Sendern realisiert werden, die große Flächen „ausleuchteten“, und mit Richtfunk, der die Programmsignale vom Studio zu den Sendern transportierte. Mit einer entsprechenden (Dach-) Antenne stand dem Fernsehzuschauer im Versorgungsgebiet dann in der Regel ein ausreichender Empfangspegel zur Verfügung. Der Ausbau für das „Kabelfernsehen“ in den 80er Jahren hingegen war sehr aufwändig und teuer, deshalb beschränkte er sich auf die Ballungsgebiete. Allerdings konnten damit mehr Programme in guter Qualität angeboten werden. Beiden Empfangswegen gemeinsam war die ortsfeste Funknutzung zu Hause.

Antennen

Zum Funk gehören Antennen. Ihr Anblick auf den Häusern ist seit Einführung des Fernsehens jedem vertraut. Viele kennen seither auch die antennenbestückten Fernmeldetürme in den großen Städten oder auf Bergen. Antennen werden für den Empfang genauso wie für das Senden benötigt; ohne sie geht es nicht. Technisch gesehen haben sie die Aufgabe, einerseits die hochfrequenten Ströme und Spannungen auf der Zuleitung in ein ausbreitungsfähiges elektromagnetisches Feld umzuwandeln (Sendeseite) und andererseits „durch die Luft“ ankommende elektromagnetische Felder in Ströme und Spannungen umzuwandeln, die sich auf Leitungen ausbreiten (Empfangsseite). Es macht

dabei keinen Unterschied, ob diese Felder analoge oder digitale Signale beinhalten. Je nach Anwendung können ihre Formen stark variieren. Antennen bilden in der Hochfrequenztechnik ein umfangreiches und komplexes Spezialgebiet. Bei Bedarf kann man mehr darüber in Fachbüchern nachlesen, z. B. in [1] und [2].

Der Rundfunk wird mobil

Funkwellen sind praktisch überall präsent. In rund hundert Jahren hat die Funktechnik einen unglaublichen Siegeszug gehalten und über die Wohnung hinaus weitgehend alle Lebensbereiche erobert. Die Entwicklung des Transistorradios war der erste Schritt in Richtung Mobilität des Funkempfangs. Dies wurde durch den Entwicklungsweg von Elektronenröhren zu Halbleitern möglich, der die Verkleinerung der Geräte und eine Reduzierung des Energieverbrauchs zur Folge hatte.

Die große Verbreitung des Autos hat zu einer noch vor hundert Jahren kaum vorstellbaren Mobilität der Menschen geführt. Nun ist auch der Funk mobil geworden, begleitet den Menschen und bietet ihm Musik und Informationen, praktisch wo er will. Die Mobilität, die das Auto gebracht hat, lässt sich nun auch auf die Kommunikation übertragen.

Auch das Fernsehen befreit sich von der Wohnung

Viele Programme waren bisher nur über Kabel- und Satellitenfernsehen zu empfangen. Inzwischen hat in den meisten Ballungsgebieten in Deutschland das digitale „Überallfernsehen“ (Digital Video Broadcasting – Terrestrial (DVB-T)) zu einer Renaissance des terrestrischen Fernsehfunks geführt. Mit einer kleinen An-

tenne auf dem Gerät (das auch ein Laptop sein kann) ermöglicht die digitale Aufbereitung praktisch überall im Versorgungsbereich den Empfang von mittlerweile über 20 Fernsehprogrammen. Der Empfang ist sogar im fahrenden Auto möglich. Das gelingt nur deshalb, weil auch diese Funkwellen überall in ausreichender Intensität vorhanden sind, sofern sie nicht z. B. durch dicke Mauern abgeschirmt werden. Damit ist das Fernsehen auch in seiner Programmvelfalt mobil geworden.

Nutzer werden zu „Funkern“

Bis in die 80er Jahre war das Telefon leitungsgebunden und ortsfest. Es gab zwar bereits seit 1958 in Deutschland das Autotelefon, aber die Geräte waren unhandlich und sehr teuer, so dass die Zahl der Nutzer so gering blieb, dass sie im Vergleich zum Festnetz-Telefon deutlich unter einem Promille blieb. Inzwischen ist der Mobilfunk auf dem Wege, das Festnetz zu verdrängen. Waren es früher nur wenige Funkamateure oder CB-Funker, die mit ihren Geräten nicht nur empfangen, sondern auch sendeten, so ist heute fast jeder „Handy-Funker“. Aus den „passiven Funkern“ an den Empfängern wurden „aktive Funker“ mit ihren eigenen Sendungen. Funk und Mobilität haben sich für alle verbunden zu einem nützlichen und erschwinglichen Medium. Funk ist der Schlüssel zu hoher Mobilität mit kommunikativer Verbindung von jedem Ort nach überall.

Die Komplexität und die sichtbare Massierung dieser Technik haben jedoch dazu geführt, dass sie nicht mehr nur selbstverständlich angenommen, sondern auch von einem Teil der Bevölkerung kritisch hinterfragt wird.

Erste Pulsanteile

Seit über hundert Jahren kennt man die Anwendung, die sich Rundfunk oder Radio nennt. Im einfachsten Fall prägte man einer gleichmäßigen elektromagnetischen Schwingung von hoher Frequenz den zeitlich veränderlichen Verlauf einer akustischen Schwingung mit niedrigerer Frequenz auf. Das führte zum Tonrundfunk im Lang-, Mittel-, Kurz- und Ultrakurzwellenbereich. Für das Fernsehen mussten gleichzeitig noch die Bildinformationen übertragen und in einem geeigneten Gerät wieder zurückgewonnen werden. War es anfangs nur die Hell-Dunkel-Information (Schwarz-Weiß-Fernsehen, in Deutschland regelmäßig seit über 50 Jahren ausgestrahlt), so kam ab 1967 die Farbinformation hinzu. Allen diesen Anwendungen war gemeinsam, dass der gesamte Verlauf des Signalinhalts kontinuierlich (von Anfang bis Ende, also ohne Unterbrechung) übertragen wurde. Lediglich beim Fernsehen gab es schon Impulselemente, um den Anfang eines Bildes oder einer Bildzeile zu identifizieren (Synchronimpuls).

Warum also Funk?

Mit Funkdiensten lassen sich am schnellsten, flexibelsten und mit verhältnismäßig wenig Aufwand flächendeckende Netze für Individualverkehr oder Rundfunkversorgung aufbauen. Außerdem kann man praktisch überall nutzen – Funk unterstützt die Mobilität.

Literatur

- [1] Zinke, Brunswig; Lehrbuch der Hochfrequenz-Technik, Band 1, S. 373ff, 4. Auflage 1990, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York
- [2] Rothammels Antennenbuch, 12. Auflage 2001, DARC Verlag Baunatal

2.1.3 Modulation und Demodulation in der Nachrichtentechnik

Frank Gollnick, Lutz Haberland, Wolfgang Michaelis

In diesem Artikel werden der technische Hintergrund der Funkanwendungen sowie das Prinzip der Modulations- und Demodulationsverfahren betrachtet. Mittels hochfrequenter elektromagnetischer Wellen können Informationen übertragen werden, indem die abgestrahlten Wellen (Trägersignal) so beeinflusst („moduliert“) werden, dass die kodierte Information zusammen mit dem Trägersignal übertragen wird. Neben der Ermöglichung der Übertragung über weite Entfernungen werden weitere Vorteile erreicht: Verschiebung in unbelegte und ungestörte Frequenzbereiche, bessere Signalqualität, Zusammenfassung mehrerer Nachrichtenkanäle (Multiplex). Die Rückgewinnung des ursprünglichen Signals im Empfänger wird als Demodulation bezeichnet. Mit der Weiterentwicklung der Technik wurden auch die Modulationsverfahren komplizierter, immer mit dem Ziel einer höheren Frequenzökonomie und besseren Übertragungsqualität. Dieser technische Fortschritt zeigt sich insbesondere am Beispiel des Mobilfunks. Auf dessen Signale, ihre Modulationscharakteristiken und ihre Impulshaltigkeit wird abschließend näher eingegangen.

Von Morsezeichen zur drahtlosen Nachrichtenübertragung

Seit 1895 werden zur drahtlosen technischen Nachrichtenübertragung modulierte Funkwellen verwendet. Der Beginn der technischen Nutzung bestand in der Übertragung von Morsezeichen über Funkstrecken (z. B. Experimente von Marconi, Einführung der „drahtlosen Telegraphie“).

Seit diesen ersten Anfängen im vorletzten Jahrhundert sind vielfältige technische Anwendungen hinzugekommen, und noch heute hält die stürmische Entwicklung bei den Funkanwendungen ungebremst an.

Vor dem Hintergrund der fortdauernden Diskussion um die biologische Wirksamkeit elektromagnetischer Wellen und insbesondere der Auswirkungen unterschiedlicher Modulationsformen sollen der technische Hintergrund der Funkanwendungen sowie Begriffe und Nutzung von Modulations- und Demodulationsverfahren etwas genauer betrachtet werden.

Für die Übertragung von Nachrichten über größere Entfernungen werden ein Sender (im übertragenen Sinn, z. B. Absender eines Briefes), ein Empfänger, ein Übertragungsmedium (z. B. Postdienst) und eine Darstellungsform (Kodierung) der Nachricht benötigt (in unserem Beispiel ein geschriebener Brief, der über das Medium Post transportiert wird). Um bei einfachen Beispielen zu bleiben, lässt auch eine zugerufene oder per Trommeln übertragene Nachricht diese Merkmale erkennen. Als „Träger“-Medium wird in

diesen Fällen die Übertragung akustischer Wellen durch die Atmosphäre verwendet, denen die Nachricht in Form eines akustischen Signals (Stimme oder Trommelsignal) mitgegeben ist.

In der Technik wird ein analoger Vorgang, bei dem ein oder mehrere Merkmale eines „Trägers“ entsprechend dem Verlauf einer „modulierenden“ Schwingung (im vorigen Beispiel der Stimmbänder oder des Trommelfelles) verändert werden, als **Modulation** bezeichnet. Die Rückgewinnung der Information, also des zur Modulation verwendeten ursprünglichen Signals aus dem modulierten Signal nach der Übertragung wird als **Demodulation** bezeichnet. Der Sender prägt die zu übertragende Information dem Medium auf (Modulation), während sie der Empfänger nach der erfolgreichen Übertragung wieder extrahiert (Demodulation).

Modulation

Bei der drahtlosen Nachrichtenübertragung mittels hochfrequenter elektromagnetischer Wellen (z. B. Radio, Fernsehen, aber auch Mobilfunk) werden Informationen übertragen, indem der von einem Sender abgestrahlte elektromagnetische Wellenzug (das unmodulierte Grundsignal, bezeichnet als Trägersignal) so beeinflusst („moduliert“) wird, dass die kodierte Information zusammen mit dem Trägersignal übertragen werden kann.

Das niederfrequente Nachrichtensignal kann nicht drahtlos übermittelt werden. Es wird durch den Vorgang der Modulation in einen höheren Frequenzbereich

verschoben, um so eine Übertragung möglich zu machen. Tonsignale liegen z. B. im Bereich 20 Hz bis 20 kHz, während Funkübertragungen erst ab etwa 100 kHz möglich sind. Tonsignale können durch die Modulation auf einer Trägerfrequenz z. B. im UKW-Radiobereich (87,5-108 MHz) übertragen werden.

Weitere Ziele, die durch die Modulation eines hochfrequenten Trägers erreicht werden können, sind:

- Anpassung an das Störspektrum, also Verschiebung des Nutzsignals in Frequenzbereiche, in denen äußere Störungen eine untergeordnete Rolle spielen,
- Vergrößerung des Signalrauschabstandes und damit Erzielung besserer Signalqualität durch geeignete Modulationsformen,
- Zusammenfassung von mehreren Nachrichtenkanälen und gemeinsame Übertragung auf einem gemeinsamen Träger (Multiplexverfahren). Die Trennung der Kanäle muss empfängerseitig erfolgen. Ein Beispiel ist die Übertragung von 8 GSM-Mobilfunkkanälen auf einem gemeinsamen Träger im Zeitmultiplex.

Schaltungen zur Modulation werden **Modulator**, Schaltungen zur Demodulation **Demodulator** genannt.

Um verschiedene Übertragungen parallel betreiben zu können, ohne dass gegenseitige Störungen auftreten, werden für die Übertragungs„kanäle“ meist Trägerwellen unterschiedlicher Frequenzen verwendet. Die Nutzung eines Frequenz-

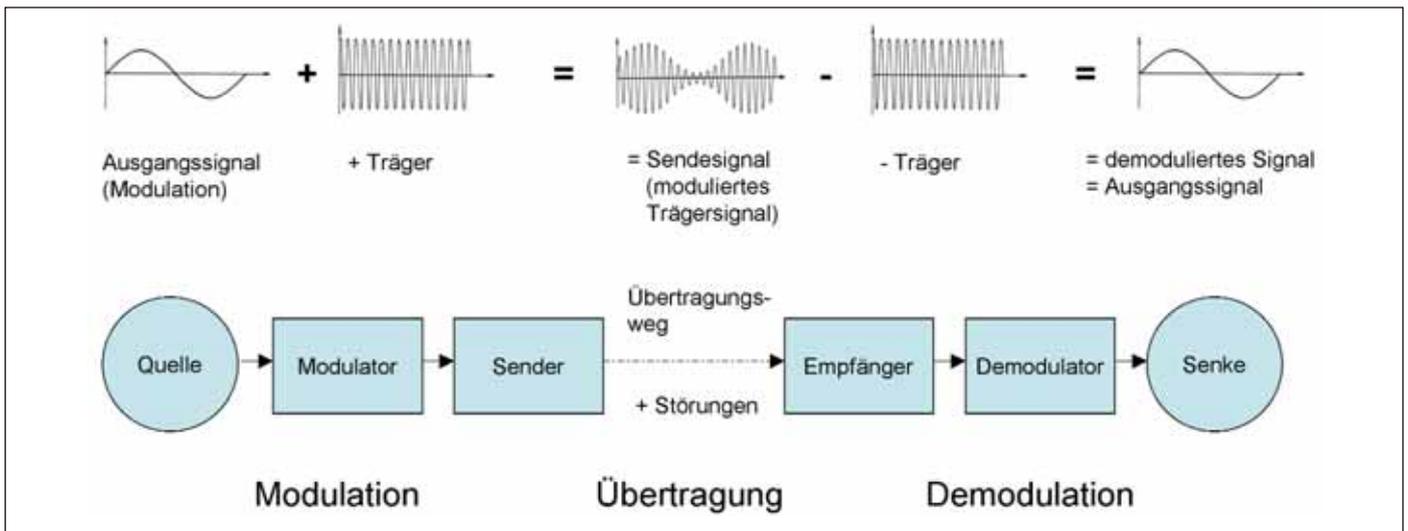


Abb. 1: Prinzip der Nachrichtenübertragung über Funkstrecken

bereichs für eine Funkanwendung schließt damit i. a. in einem bestimmten geografischen Umkreis, der durch die Signalreichweite bestimmt ist, eine weitere Nutzung für andere Funkdienste aus.

Zur technischen Sprach-, Bild- und Datenübertragung genutzte Frequenzbänder liegen in einem Bereich des elektromagnetischen Spektrums, in dem die technische Erzeugung mit vertretbarem Aufwand möglich ist und günstige atmosphärische Ausbreitungs- und Dämpfungsbedingungen vorliegen.

Da das zur Verfügung stehende Spektrum für Funkfrequenzen begrenzt ist und die Mehrfachverwendung von Frequenzen wegen der Notwendigkeit zur Verhinderung gegenseitiger Störungen nur sehr begrenzt möglich ist, werden für neue Funkdienste zunehmend Frequenzen in höheren Bereichen des elektromagnetischen Spektrums erschlossen. Neue, aufwändigere Modulationsverfahren erlauben zudem die effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Frequenzbänder bei der Einführung neuer Funkdienste.

Modulationsarten

Die Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen, die zu ihrer Modulation verändert werden können, sind **Amplitude**, **Frequenz** und **Phase** der Trägerwellen. Modulationsformen, die diese Parameter beeinflussen, während die übrigen konstant bleiben, werden demzufolge als **Amplituden-, Frequenz- und Phasenmodulation** (Abkürzungen: AM, FM, PM) bezeichnet. Bei der **Amplitudenmodulation (AM)**

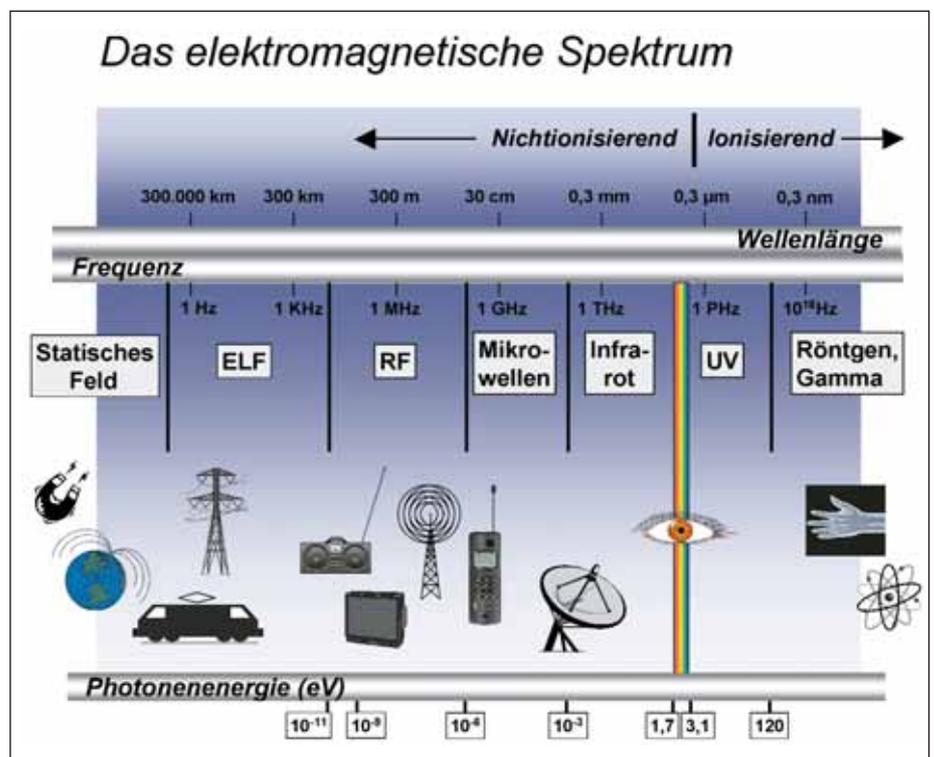


Abb. 2: Bereich der Funkfrequenzen im elektromagnetischen Spektrum

wird die Stärke (die Amplitude) des hochfrequenten, sinusförmigen Trägersignals variiert, d. h. ein niederfrequentes Feld, das die zu übertragende Information enthält, wird mit dem hochfrequenten Feld zusammengeführt. Dabei bleibt die Frequenz des Trägersignals konstant. Ein Spezialfall der AM ist die **Pulsmodulation (PM)**, hier wird das hochfrequente Feld immer wieder ein- und ausgeschaltet, was zu einem Rechtecksignal führt. Bei der **Frequenzmodulation (FM)** bleibt die Amplitude des Feldes konstant bzw. schwankt nur wenig, dafür ändert sich

jedoch die Frequenz entsprechend der Amplitude des aufmodulierten Signals. Als letzte grundsätzliche Modulationsart sei noch die **Phasenmodulation** erwähnt. Frequenz- und Phasenmodulation sind eng verwandt, sie werden zusammengefasst unter dem Begriff **Winkelmodulation**. Charakteristisch für die Winkelmodulation ist eine konstante Amplitude der modulierten Schwingungen. Die Zeitverläufe von PM und FM sind bei Modulation mit Sinussignalen bis auf eine Phasenverschiebung gleich. Speziell für digitale Verschlüsselungen gibt es bei der Pulsmodu-

lation **Shift-Keying-Verfahren (SK)**. Dabei wird einer der drei Parameter Amplitude (ASK), Frequenz (FSK) oder Phase (PSK) entsprechend dem Digitalsignal umgeschaltet. Nutzt man z. B. beim PSK Phasenverschiebungen um 90° , 180° und 270° und 360° , so lassen sich vier verschiedene Zustände übertragen (Quadratur-PSK, QPSK). Die grundlegenden Modulationsformen sind in **Abb. 3** dargestellt.

Die konkreten Modulationen der heutigen Kommunikationssysteme sind meist eine Mischung aus mehreren dieser Grundmodulationen. Z. B. wird neben der in **Abb. 3** dargestellten Zweiseitenband-Amplitudenmodulation mit Träger, die im Rundfunk Anwendung findet, auch eine Form der Amplitudenmodulation mit unterdrücktem Träger und reduzierter Kanalbandbreite (Einseitenband-Amplitudenmodulation ohne Träger) z. B. im Seefunk genutzt. Auch Kombinationen der verschiedenen Modulationsformen werden technisch eingesetzt (zu speziellen analogen sowie zu digitalen Modulationsformen wird auf die Quellen im Literaturverzeichnis verwiesen).

Der Vorgang der Modulation soll kurz am Beispiel einer amplitudenmodulierten Trägerwelle veranschaulicht werden:

Im einfachsten Fall besteht ein AM-Modulator aus den Quellen für eine (sinusförmige) Hochfrequenz und dem Modulationssignal sowie einem **nichtlinearen** elektronischen Element, z. B. einer Diode mit **nichtlinearer Kennlinie**, die für eine Verzerrung des Eingangssignals sorgt, und einem Lastwiderstand. Als Kennlinie wird die Beschreibung einer Eigenschaft eines technischen Gerätes in Abhängigkeit von genau einem Parameter bezeichnet, die Darstellung erfolgt häufig in Form eines (Kennlinien-) Diagramms.

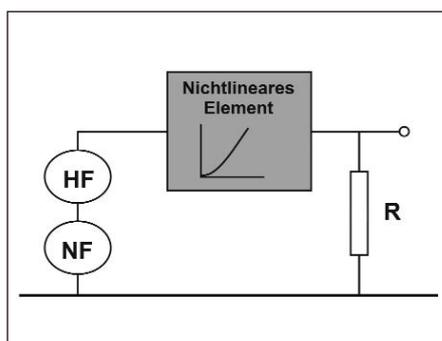


Abb. 4: Prinzip eines AM-Modulators

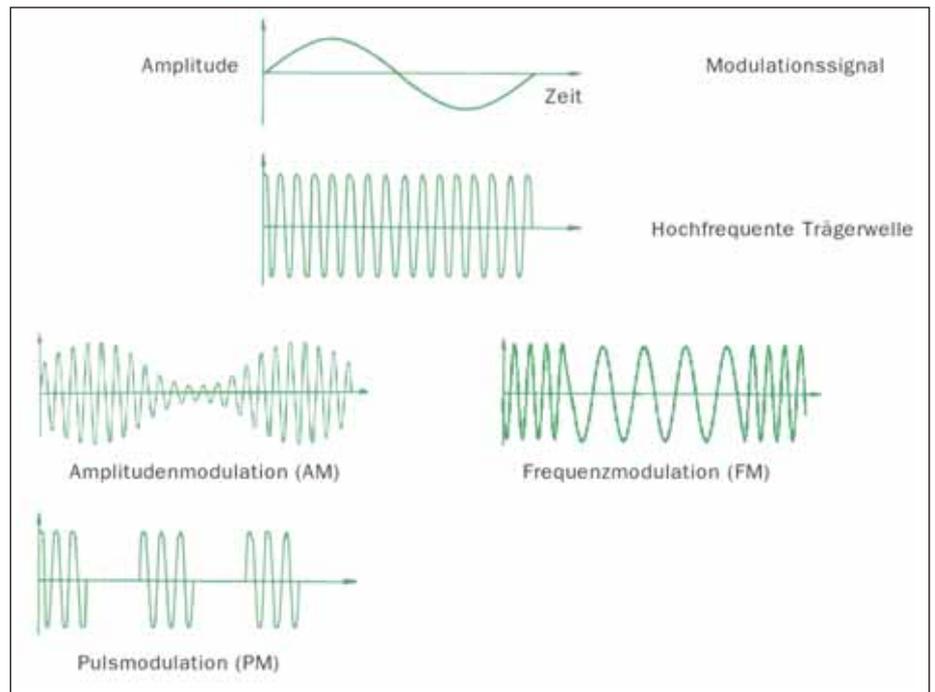


Abb. 3: Grundlegende Modulationsarten (Amplituden-, Frequenz- und Pulsmodulation)

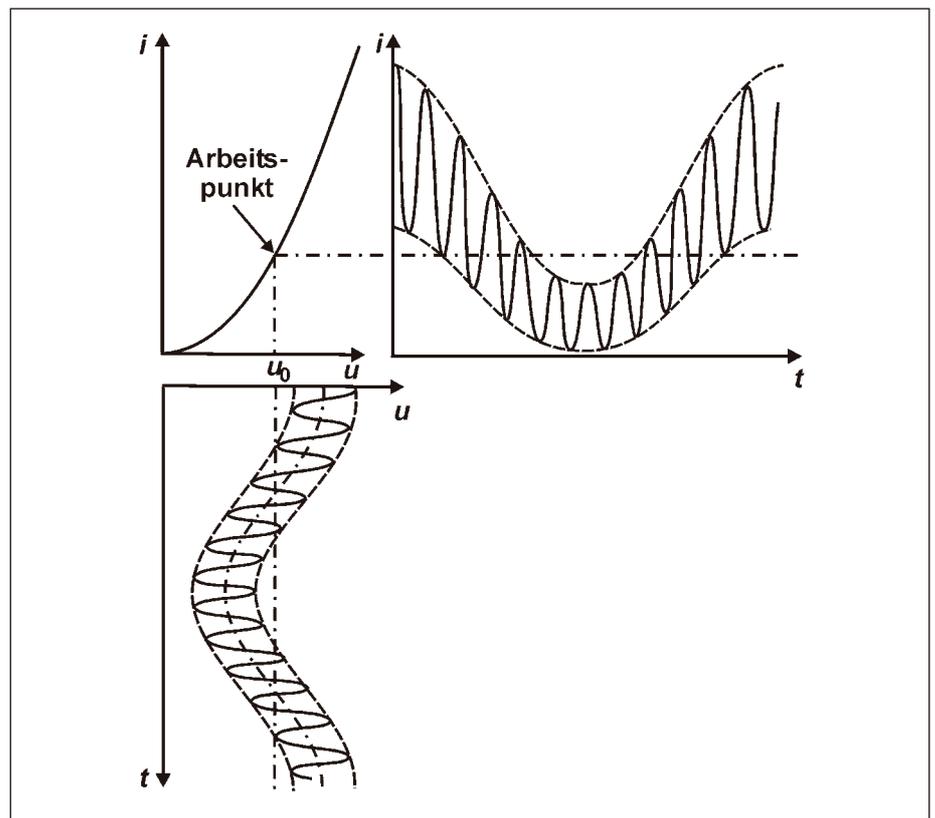


Abb. 5: Modulation an einer nichtlinearen Kennlinie [1]

An der nichtlinearen Kennlinie des Modulators werden die beiden unterschiedlichen Signale nicht ausschließlich addiert, sondern der Arbeitspunkt der zugeführten Hochfrequenzspannung verlagert sich auch im Takt der Modulationsfrequenz, so dass die Amplitude des HF-Signals am Lastwiderstand im Rhythmus der Modu-

lationsspannung schwankt (siehe **Abb. 5**). Die Information des niederfrequenten Modulationssignals ist so auf die Amplitude der Trägerfrequenz übertragen worden. Die Information befindet sich nun in der Umhüllenden der hochfrequenten Signalamplitude.

Im Ausgangssignal sind nach diesem Modulationsvorgang außer der Trägerfrequenz auch Mischfrequenzen enthalten. Zur Übertragung werden nur die ersten Seitenbänder verwendet (bei Verwendung eines sinusförmigen Modulationssignals ω bestehen diese aus der Trägerfrequenz Ω plus Signalfrequenz ω und Trägerfrequenz Ω minus Signalfrequenz ω , bei einem Frequenzgemisch entstehen breitere Frequenzbänder, siehe **Abb. 6**), alle weiteren (störenden) Modulationsprodukte werden ausgefiltert. Wenn man die verbliebenen Modulationsprodukte (die Seitenbänder) auch noch wegfiltern würde, würde nur die reine Trägerfrequenz übrig bleiben, die aber keine Nutzinformation enthält, mindestens eines der Seitenbänder muss also mit übertragen werden um die Information rekonstruieren zu können.

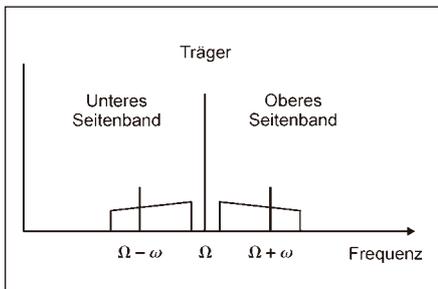


Abb. 6: Spektrum des amplitudenmodulierten Ausgangssignals

Bemerkenswert ist, dass die niederfrequente Modulationsfrequenz im Ausgangssignal **nicht selbst** enthalten ist, sie ist nur als (gedachte) Umhüllende der HF-Signalamplitude erkennbar. Das Ausgangssignal des Modulators besteht also nur aus hochfrequenten Anteilen (Trägerwelle und Seitenbänder), deshalb kann es auf dem Funkweg übertragen werden. Die niederfrequente Nutzinformation in diesem Signal muss dann auf der Empfängerseite durch Demodulation wiedergewonnen werden.

Demodulation

Wie kann nun aus der modulierten Trägerwelle, die ja nach dem Modulationsvorgang ausschließlich aus hochfrequenten Anteilen besteht, das niederfrequente Nutzsignal zurückgewonnen werden, das die eigentliche Information trägt? Die hochfrequente Trägerwelle selbst wird nach dem Empfang nicht mehr benötigt, da sie nur zur Erhöhung der Frequenz zur Ermöglichung der Übertragung auf dem Funkweg gedient hat. Sie muss also von

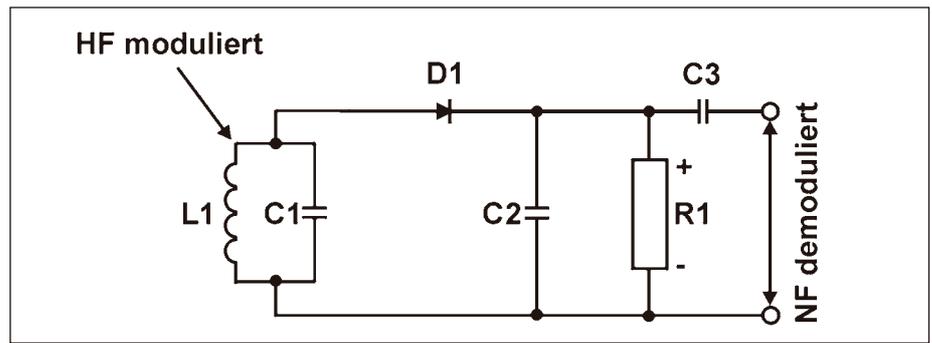


Abb. 7: Demodulatorschaltung für Amplitudenmodulation (Hüllkurvendetektor) [1]

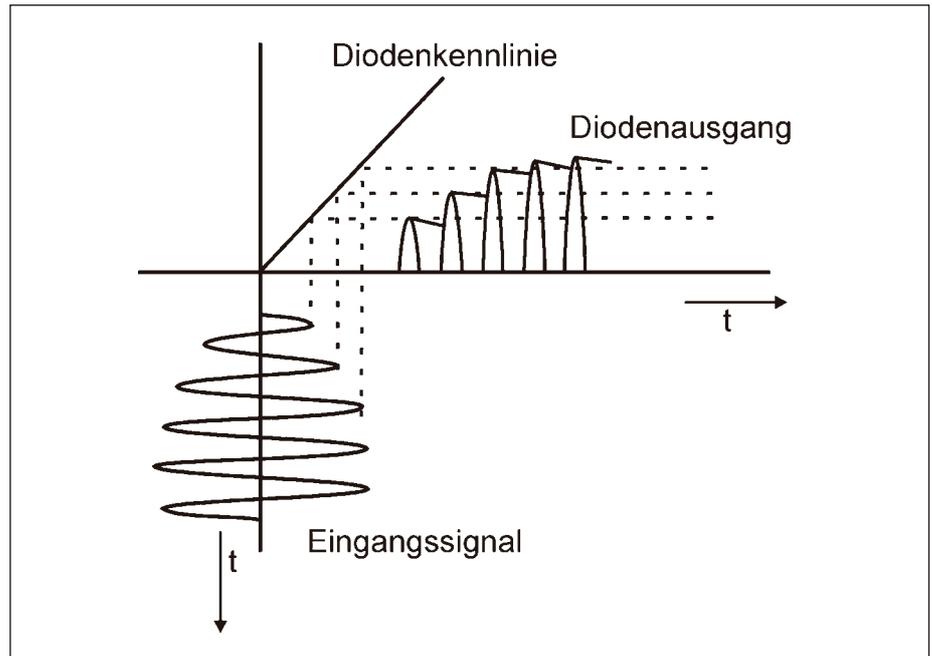


Abb. 8: Demodulation an einer Diodenkennlinie als Beispiel für eine nichtlineare Kennlinie [1]

der aufmodulierten Information wieder abgetrennt werden.

Diese Demodulation der eigentlichen Information aus der modulierten Trägerwelle soll im Folgenden wiederum am Beispiel der Amplitudenmodulation näher betrachtet werden.

Für die Demodulation wird wie für die Modulation wieder ein Element mit einer **nichtlinearen Kennlinie** benötigt. Bauelemente mit linearen Kennlinien beeinflussen die Kurvenform einer Schwingung nicht sondern nur ihre Amplitude, führen also nur zu einer Verstärkung oder Dämpfung des Signals und erlauben daher nicht die Trennung von Trägerfrequenz und Modulation. Die Amplitudenmodulation kann also nicht durch ein Filter demoduliert werden.

Zur elektrischen Demodulation kann bei amplitudenmodulierten Signalen z. B. eine

Gleichrichterdiode verwendet werden („Knickkennlinie“). Die Nichtlinearität besteht in diesem Fall in der Gleichrichterwirkung, es wird nur eine Polarität der amplitudenmodulierten Welle durchgelassen, also jeweils eine Halbwellen des amplitudenmodulierten Hochfrequenz-Signals (HF-Signal) unterdrückt.

Die Information des Modulationssignals liegt nach der Gleichrichtung in der Umhüllenden der Hochfrequenz-Halbwellen. In AM-Demodulatorschaltungen werden der Diode weitere elektronische Elemente nachgeschaltet, die die Halbwellen der Hochfrequenzschwingung aufsummieren und glätten sowie die hochfrequenten Reste aus dem resultierenden Signal ausfiltern (Tiefpass). Als Ergebnis wird das reine niederfrequente Modulationssignal zurückgewonnen.

Anmerkung: Die dargestellten Impuls- und Wellenformen sind zur Verdeutli-

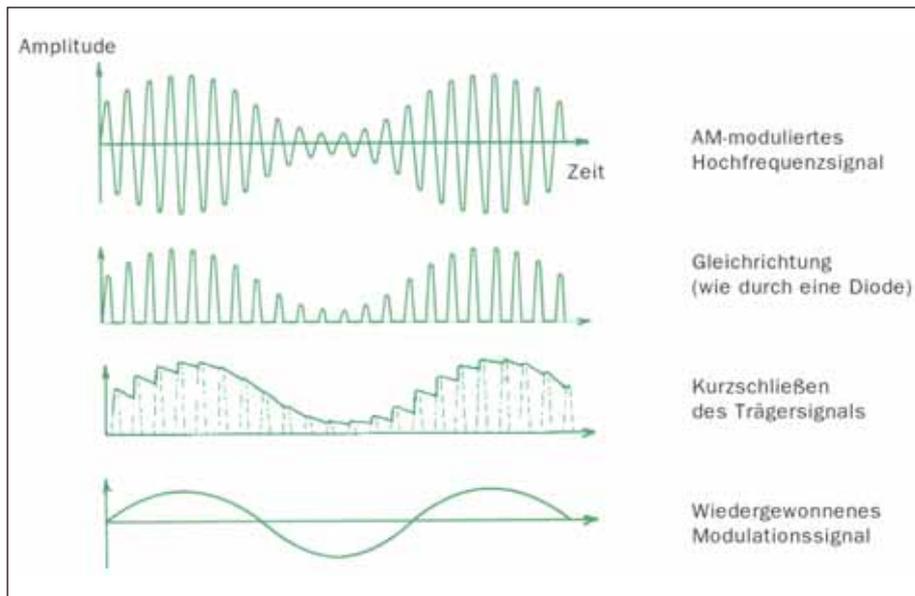


Abb. 9: modulierte Trägerwelle, Modulationssignal

chung des Prinzips idealisiert, in der Realität werden die dargestellten Signale durch die Eigenschaften des Übertragungsweges sowie die begrenzten Geschwindigkeiten der eingesetzten Verstärker, Sender und Empfänger beeinflusst. Unter anderem werden dadurch die Steilheit von Anstiegsflanken verringert und die Signale „verschliffen“.

Mobilfunk-Signale

Beim Mobilfunk liegen die Trägerfrequenzen im GHz-Bereich und sind für die Sprach- und Datenübertragung im weitesten Sinne „analog“ frequenzmoduliert nach dem sogenannten GMSK-Verfahren (Gaussian Minimum Shift Keying, dem Gaußschen Modulationsverfahren im GSM). Am bekanntesten ist die durch die „Amplitudentastung“ entstehende Modulationskomponente von 217 Hz in den bei ungefähr 900 MHz oder 1800 MHz liegenden Trägersignalen, mit denen bei uns zur Zeit noch die meisten „Handys“ nach dem GSM-Standard betrieben werden. Es gibt in der Amplitude (Signalstärke) der ausgesendeten hochfrequenten Mobilfunk-signale aber noch eine Reihe anderer Modulationsfrequenzen, zum Beispiel 2,08 Hz, 8,33 Hz oder 1733 Hz, die zum Teil zum zuverlässigen Funktionieren der Mobiltelefone im Zusammenspiel mit den Basisstationen beitragen (z. B. bei der automatischen Leistungsregelung) bzw. zwangsläufig aufgrund der Signalstruktur entstehen. Die Sprache oder sonstige Information (z. B. SMS) wird in Form von „Datenbits“ nur mit dem hochfrequenten Trägersignal in Teilabschnitten der so-

genannten „Sendebursts“ übertragen, das sind kurzzeitige, nur einige hundert μ s (Mikrosekunden = Millionstel Sekunden) lange Sende-„Schübe“, in denen zum Beispiel bei einem Handy theoretisch sehr kurzfristig mit einer Spitzensendeleistung von maximal etwa 2 W gesendet werden kann. Typischerweise wird im Gebrauch durchschnittlich aber nur mit Spitzenwerten von ungefähr 0,2 W bis 0,3 W gesendet [9] [10].

Die Modulation (also die kurze Ein- bzw. Abschaltung) des Sprachsignals eines Mobiltelefons erfolgt dabei – genau beschrieben – im 4,615 ms-Rhythmus mit Sendephasen („Sendebursts“), die eine Pulsdauer von 577 Mikrosekunden haben. In der entstehenden Pause von 4,038 Millisekunden zwischen den „Bursts“ können sieben andere Teilnehmer unabhängig voneinander mit ihren Handys in den restlichen sieben „Zeitschlitzten“ über dieselbe Basisstation auf demselben Funkkanal telefonieren. Diese insgesamt acht „Zeitschlitzte“ für maximal acht verschiedene Teilnehmer ergeben einen sogenannten „TDMA-Rahmen“ von 4,615 Millisekunden Länge, der ständig wiederholt wird (TDMA = Time Division Multiple Access = Zeitmultiplex-Verfahren, siehe **Abb. 10**). Das somit im 4,615 Millisekunden Rhythmus „zerhackte“ Sprachsignal jedes Teilnehmers wird beim Empfänger wieder richtig zusammengesetzt, wovon man während des Telefonierens natürlich nichts merkt. Die mehr oder weniger langen – und allesamt sehr verzahnt ineinander greifenden – periodischen „Abschaltungen“ des Trägersignals zwischen den Sendebursts erfolgen nun nicht etwa zu jeweils 100 %, sondern die Signalstärke wird in den „Lücken“ nur auf ein sehr viel schwächeres Niveau abgesenkt.

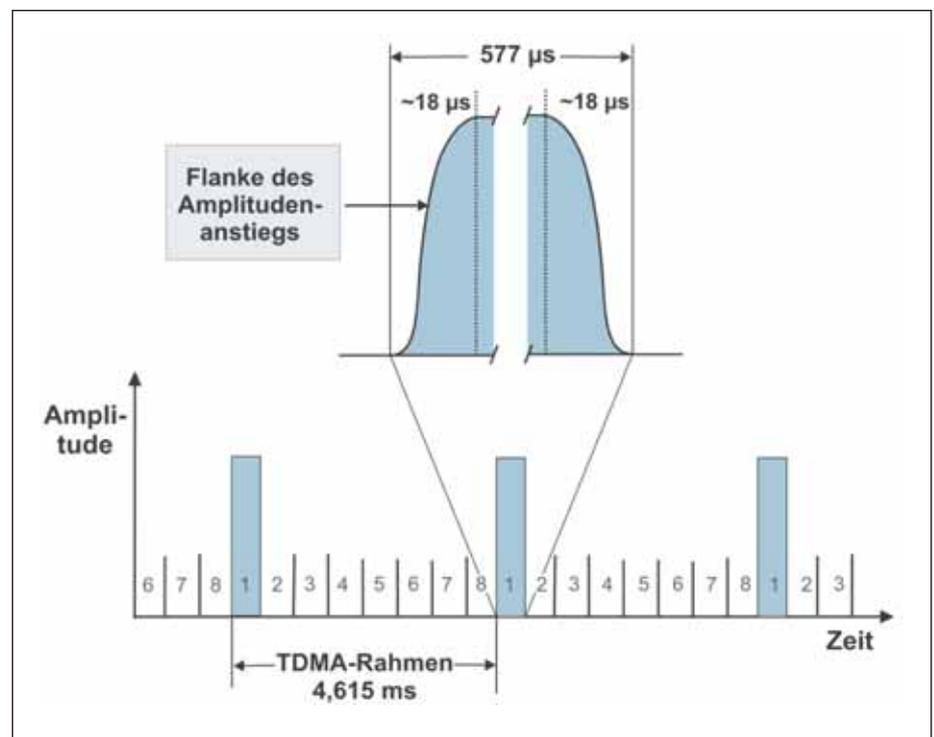


Abb. 10: Darstellung von „Sendebursts“ in der zeitlichen Abfolge, wenn beim Telefonieren nach dem GSM-Standard nur ein Zeitschlitz eines Sendekanals belegt ist, also nur einer von acht möglichen Teilnehmern auf ihm telefoniert. Die Vergrößerung oben zeigt einen „Burst“ zeitlich etwa 30-fach gestreckt, um den Signalverlauf in der Anstiegsphase und der abfallenden Phase („Flanken“) deutlich zu machen. Der gesamte Mittelteil, in dem die Amplitude eine konstante Größe hat, wurde aus grafischen Gründen herausgenommen. (nach [8])

„Schwach“ heißt hier genau gesagt: der Sender darf in diesen „Pulspausen“ nach dem Standard ETS 300 577 des „European Telecommunications Standards Institute“ (ETSI) [11] im Falle eines GSM 900 Signals nur noch mit maximal $0,25 \mu\text{W}$ und im Falle eines GSM 1800 Signals mit maximal $0,016 \mu\text{W}$ senden.

Rechtecksignale im Wellenverlauf

Die Funkwellen reißen aber – entgegen manchmal geäußerter Vorstellungen – in diesem Sinne nicht jedes Mal vollständig ab. Es handelt sich im Grunde genommen um ein permanentes Hochfrequenzsignal mit starken periodischen Einbrüchen. Immerhin entstehen dadurch steile Flanken, Stufen mit fast rechteckigen Verläufen („Rechtecksignal“) in dem durchgehenden Wellenverlauf des hochfrequenten Mobilfunksignals. Aber auch diese Flanken sind nicht absolut senkrecht, das wäre technisch überhaupt nicht möglich. Bei genügend hoher zeitlicher Vergrößerung („Auflösung“) weist jede dieser Rechteckkanten eine gewisse Schräge auf („Flankensteilheit“ oder „Amplitudensteilheit“, siehe **Abb. 10**). Man kann dies auf dem Bildschirm eines Oszilloskops sichtbar machen, wenn man die Signalkante zeitlich genügend „dehnt“. Anstieg und Abfall des Funksignals dauern üblicherweise etwa 18 Mikrosekunden. Trotzdem werden auch die vermeintlich „besonders steilen Flanken“ bisweilen für die behauptete schädliche Wirkung gepulster Signale verantwortlich gemacht. Jedoch auch andere analog modulierte Funksignale, zum Beispiel die von Fernsehsendern, weisen stufenförmige Verläufe mit einem deutlichen „Pulsmuster“ auf. Dennoch haben sie, bezogen auf gesundheitliche Auswirkungen, wegen der zumindest bisher fehlenden „digitalen Pulsung“ einen besseren Ruf. Die Impulsflankensteilheit ist hier aber in der Regel sogar 20 bis 70 mal größer (also deutlich steiler, Anstieg und Abfall dauern hier nur etwa $0,3$ Mikrosekunden) als bei digitalen Funksignalen. Darauf wird im Abschnitt 2.2.1 genauer eingegangen.

Literatur

- [1] Eberhard Herter, Walter Röcker (1976): Nachrichtentechnik – Übertragung und Verarbeitung, Carl Hanser Verlag, München Wien
- [2] Erich Stadler (1993): Modulationsverfahren, Vogel Buchverlag, Würzburg
- [3] Eckart Moltrecht (1997): Amateurfunk-Lehrgang Funktechnik, Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden
- [4] Fachkunde Radio-, Fernseh- und Funk-elektronik (1996), Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten
- [5] Ulrich Freyer (2000): Nachrichten-Übertragungstechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien
- [6] Eberhard Herter, Wolfgang Lörcher (2000): Nachrichtentechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien
- [7] Hans Lobensommer (1995): Handbuch der modernen Funktechnik – Prinzipien, Technik, Systeme und praktische Anwendungen, Franzis-Verlag, Poing
- [8] Liesenkötter, B.: Vergleich der digitalen Modulation des GSM-Mobilfunks mit den Synchronimpulsen von TV-Sendern. Newsletter 2/2004, 34-39, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., www.fgf.de, 2004
- [9] Wiart, J., Dale, Ch., Bosisio, A.V., Le Cornee, A.: Analysis of the influence of power control and discontinuous transmission on rf exposure with GSM mobile phones. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 42, No. 4, November 2000
- [10] Vecchia, P., Ardoino, L., Bowman, J.D., Cardis, E., Mann, S., Wiart, J.: Radio-frequency exposure of mobile phone users – the activity of the INTERPHONE study group. In: Proceedings of the 5th International Congress of the European BioElectromagnetic Association (EBEA), Helsinki, ISBN 951-802-440-5, 6th – 8th September 2001
- [11] European Telecommunication Standard ETS 300 577, 15th Edition: Digital cellular telecommunications system (Phase 2); Radio transmission and reception (GSM 05.05 version 4.23.1), ETSI, 1999

2.1.4 Digitalisierung als wesentlicher Fortschritt

Fred-Jürgen Breit

Digitalisierung ist die Umwandlung einer kontinuierlichen veränderlichen (Mess-) Größe in eine Folge von diskreten Proben, die in Zahlen kodiert werden. Diese lassen sich mit schnellen Prozessoren (Rechnern) bearbeiten und gegen Verfälschung bei der Übertragung sichern. In der Praxis führt das zu einer enormen Qualitätssteigerung bei der Übertragung und einer Erhöhung der übertragenen Datenmenge für immer vielfältigere Anwendungen bei gleichzeitig sehr effizienter Nutzung der Ressource Frequenz.

Übergang zur nicht gleichmäßigen (diskontinuierlichen) Übertragung

Bei einer analogen Ton- oder Bildübertragung wird ein kontinuierlicher elektrischer Spannungsverlauf, der dem Schalldruck bzw. den Farb- und Helligkeitswerten proportional ist, auf einer ebenfalls kontinuierlichen hochfrequenten Trägerwelle über eine Leitung oder über Funk übertragen. Charakteristisch ist also, dass es keine Unterbrechungen gibt und auch das eigentliche Signal in voller zeitlicher Ausdehnung erhalten bleibt. Allerdings ist dieses Verfahren anfällig gegen Störungen auf dem Übertragungsweg.

Es war bekannt, dass die kontinuierliche, vollständige Übertragung eines Wellenzuges gar nicht notwendig ist. Um das Ursprungssignal wiederherstellen zu können, reichen regelmäßige „Proben“ aus (**Abb. 1**). In einem weiteren Schritt quantisiert man die Größe der entnommenen Probe und verschlüsselt sie mit einer Zahl; diesen Vorgang nennt man digitalisieren. Das Verfahren wurde bereits seit den 60er Jahren bei Telefonkanälen im Übertragungsnetz angewandt, man fasste so gleich 30 Kanäle zusammen. Die Erfindung von A. H. Reeves (USA) stammte schon aus dem Jahr 1938 (Patent 2272070, 1942-2), aber zur Realisierung standen damals die nötigen Bauelemente noch nicht zur Verfügung.

Dieses Verfahren hat sich von der analogen Übertragung eines Signals verabschiedet und überträgt nur diskrete Zustände. Und selbst die werden nicht mehr in der gewohnten Form z. B. als Spannungswert übertragen, sondern als eine Zahl, die nicht dazu proportional sein muss. Man geht sogar noch einen Schritt weiter und nimmt nicht die uns vertrauten Dezimalzahlen, die aus den Ziffern 0-9

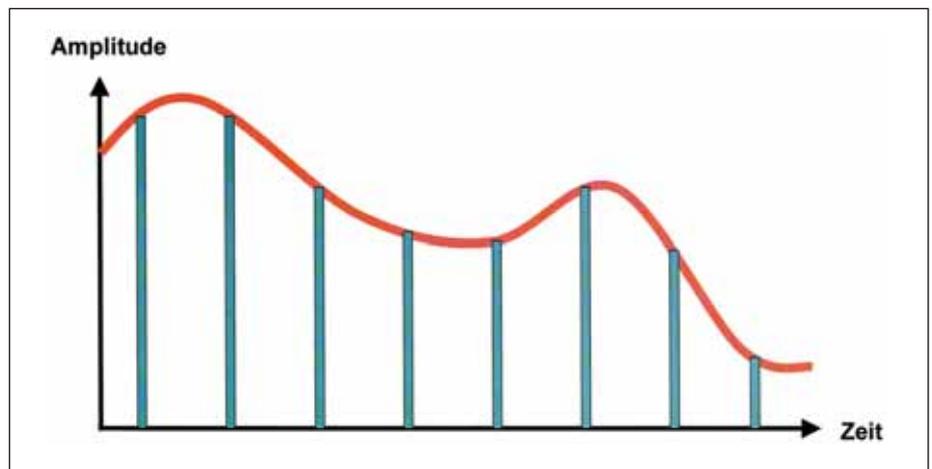


Abb. 1: Abtastung eines kontinuierlichen Signals in diskreten Abständen

bestehen, sondern Dualzahlen, die nur die Ziffern 0 und 1 haben (Ziffer = digit, daher Digitalisierung). Bei ihnen sind die Rechenoperationen besonders einfach, und sie lassen sich sehr gut und schnell durch Rechenmaschinen (Prozessoren) erledigen. Als Folge werden zur Darstellung in der Übertragungstechnik auch nur zwei Zustände benötigt (z. B. niedrige oder hohe Spannung), für die man Phasensprünge anwendet.

Ressourcen und Qualität

Worin liegen nun die Vorteile dieses aufwändigen und auf den ersten Blick unverständlichen Verfahrens? Zum einen ist auf der Zeitachse Platz entstanden, um weitere solcher Signale abwechselnd unterzubringen. Der praktische Gewinn ist folgender: 8 Kanäle auf einer Frequenz im Mobilfunk (GSM), 4 Kanäle statt eines beim Fernsehen (DVB-T), 30 bei Telefonkanälen (PCM30).

Da außerdem nur noch verschlüsselte Zahlen übertragen werden, können gestörte Anteile des Signals mit Hilfe von Fehlerkorrekturverfahren repariert

werden, weil man einen Code mit viel Redundanz (eigentlich „überflüssige“ Ziffern) benutzt und eine geschickte Verwürfelung der Ziffern anwendet. Das führt zu einer deutlich höheren Übertragungsqualität, aber auch zu einer besseren Abhörsicherheit. Von der enormen Verbesserung der Übertragungsqualität kann man sich überzeugen, wenn man den analogen Telefonanschluss mit ISDN vergleicht, beim Mobilfunk den Schritt von B- und C-Netz zu den D- und E-Netzen oder beim Fernsehen die sehr unterschiedliche Qualität der über Antenne empfangenen analogen Sender mit der gleichmäßig hohen Qualität der digitalen Übertragung.

Da schließlich eine gleich bleibend gute Übertragungsqualität wegen der Fehlerkorrektur nur eine Mindestempfangsfeldstärke bis an den Versorgungsrand mit dementsprechender Mindestsendeleistung benötigt, können beide Größen – als weiterer Vorteil – auf dieses Niveau abgesenkt werden.

Weitere Meilensteine des Fortschritts

Auf den ersten Blick erkennt man vielleicht nicht, welcher Umfang an Know-how in dem heutigen Stand der Technik steckt. Die analoge Funktechnik konnte noch mit relativ einfachen Bauteilen realisiert werden, daher reichen ihre Anfänge über hundert Jahre zurück. Auch spielte sich vieles bei verhältnismäßig niedrigen Frequenzen ab, wofür man nur mäßig schnelle elektronische Schaltungen benötigte. Die Digitalisierung ermöglicht den Einsatz von Prozessoren (Rechnern), die mit zunehmenden Aufgaben in derselben Zeit eine viel größere Zahl an Verarbeitungsschritten bewältigen müssen, damit die Verarbeitung inkl. der Korrektur nicht störend auffällt, was z. B. beim Abspielen einer CD oder DVD sowie beim Empfang im fahrenden Auto unmittelbar einleuchtet. Dass die Rechenzeiten dennoch nicht bei Null liegen und dies zu einem ständigen Zeitversatz zwischen Sender und Empfänger führt, stört grundsätzlich nicht, wird aber z. B. beim digitalen Fernsehen erkennbar, wenn vor den Nachrichten die Uhr eingeblendet wird. Vergleicht man mit (s)einer Funkuhr, sieht man einen Zeitversatz von rund 3 Sekunden!

Miniaturisierung und Preis

Während z. B. im Mobilfunknetz C der 80er und 90er Jahre noch Mikroprozessoren der Typen 8085 und 8086 aus der Frühzeit der Prozessortechnik eingesetzt wurden, eröffnen erst die heutigen Prozessoren aufgrund ihrer millionenfach höheren Rechengeschwindigkeit Anwendungen in höheren Frequenzbereichen und erlauben komplizierteste Verarbeitungsschritte zur Signalverbesserung. Enorme Fortschritte in Miniaturisierung und Hochintegration bringen den quantitativen und qualitativen Fortschritt im Multimediabereich und ermöglichen das Zusammenwachsen mit der Informationstechnik. Handys übernehmen Aufgaben, die vorher dem Radio, Fernsehapparat oder Rechner vorbehalten waren. Da hochintegrierte digitale Schaltungen einfacher zu realisieren sind als analoge und damit Großserien möglich wurden, sind die Preise so weit gesunken, dass Funkanwendungen zu einem Massenmarkt werden konnten.

Funkanwendungen für jeden durch zellulare Netze

Das Mobilfunknetz B (1972-1994) hatte mit 157 Basisstationen im damaligen Westdeutschland nur rund 27.000 Teilnehmer. Mehr konnten aus Frequenzgründen (Wiederholbarkeit der 76 Kanalpaare) nicht bedient werden. Das Nachfolgenetz C (1985-2000), das mit Großzellen im ersten Schritt wie das Netz B aufgebaut war, kam mit 222 Kanälen zunächst auf 100.000 Teilnehmer, beim Übergang zu Kleinzellen und mit einer Frequenzbanderweiterung auf 287 Kanalpaare schließlich auf über 800.000. Es war schon als zellulares Netz konzipiert, in dem der sich bewegende Nutzer beim Wechsel von der einen Zelle zur nächsten automatisch und unterbrechungsfrei mit der nächsten Basisstation verbunden wurde. Aber jeder Funkkanal entsprach noch einer Verbindung. (Funk-Funk-Gespräche, die zwei Kanäle benötigen, machten damals nur 3 % aus!). Erst die Digitalisierung und die 8-fach-Nutzung eines Kanals (zusammen mit der Qualitätssteigerung und sehr niedrigen Preisen u.a. durch 4 konkurrierende Netze) führten zu wesentlich höheren Netzkapazitäten und zur millionenfachen Anwendung. Das eröffnete den Durchbruch zum Massenmarkt. Damit einher ging die Verkleinerung des „tragbaren Funktelefoneräts“ von unförmiger Brikettgröße auf Hemdtaschenformat („Handy“).

Durch Qualitätssteigerung und schnelle Leistungsregelung lässt sich die Nutzfeldstärke nahe am Versorgungsminimum halten, wozu auch die höhere Empfangsempfindlichkeit der Geräte beiträgt. Das hat nicht nur Auswirkungen auf Strahlungsleistung und Energieverbrauch, sondern ist auch für die Netzökonomie von großem Interesse, denn alle Funkausstrahlungen werden außerhalb ihrer Zelle zu Störfeldern, die es zu minimieren gilt.

Wiederholte flächendeckende Messungen der Bundesnetzagentur (früher Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post „RegTP“) zeigen: Der Beitrag des Mobilfunks zu den insgesamt in der Umwelt vorhandenen elektromagnetischen Feldern bleibt trotz oder gerade wegen der hohen Anzahl der Sender gering; denn viele Sender in vielen kleinen Zellen senden jeweils nur mit geringen Leistungen.

Flexible Funktionalität durch Software

Die Möglichkeit, digitale Signale in Töne und Bilder intern per Software umzuwandeln und zu bearbeiten, führt zu einer großen Flexibilität bei technischen Anwendungen. Die Funktionalität eines Geräts hängt immer stärker von der enthaltenen Software ab, die sich leicht ersetzen oder ergänzen lässt, sogar über Funk! Die Software bietet über den Funkweg und das Internet inzwischen Zugang zum dort erreichbaren digitalen Wissen der Welt und auch zur verfügbaren Unterhaltung. Jeder, der einen modernen Computer oder ein multifunktionales Handy benutzt, weiß dies inzwischen.

Warum Digitalisierung?

Sie bietet gleich mehrere Vorteile: Verkleinerung und Verbilligung der Bauteile, dadurch wird die Nutzung für jedermann erschwinglich; Einsatz von Prozessoren zur parallelen Signalverarbeitung und -verbesserung, hohe Flexibilität durch Realisierung von Funktionen mit Software; Zusammenwachsen von Kommunikations- und Informationstechnik; Qualitätssteigerung bei geringerer Feldstärke.

2.2 Wo werden gepulste Signale praktisch eingesetzt?

Wurden in den vorangegangenen Abschnitten die technische Wirkungsweise gepulster Felder sowie die Begriffe Digitalisierung und (De-) Modulation erläutert, so soll im Folgenden der Fokus auf einige technische Anwendungsmöglichkeiten gelegt werden.

Im ersten Teil wird die digitale Modulation von GSM mit den Impulsanteilen des Fernsehens in Bezug auf die Steilheit der Flanken verglichen, gefolgt von einer Beschreibung des Radars als typische gepulste Anwendung.

Im zweiten Teil werden spezielle Techniken im optischen Bereich außerhalb des Hochfrequenzspektrums vorgestellt, nämlich Laser (ausführlich) und Stroboskop (knapp). Sie arbeiten ebenfalls in typischer Weise gepulst und finden in der Diskussion um mögliche Auswirkungen der Pulsung des Öfteren Erwähnung.

Die reinen technischen Beschreibungen von Funkdiensten wie GSM, UMTS, TETRA usw. sind als Anhänge aufgenommen worden. Zu UMTS, dem neuen Mobilfunksystem der 3. Generation, ist noch anzu-

merken, dass die derzeit in Deutschland eingesetzte Variante Frequenz- und Codemultiplex, (aber nicht Zeitmultiplex) nutzt.

2.2.1 Vergleich der digitalen Modulation des GSM-Mobilfunks mit den Synchronimpulsen von TV-Sendern

Bernhard Liesenkötter

In der Diskussion um die Schädlichkeit von Mobilfunkstrahlen wird betont, dass vor allem die impulsförmig modulierte Hochfrequenz des GSM-Standards biologisch wirksam sein soll. Die bekanntlich relativ hohen Feldstärken von Rundfunk und Fernsehen seien dagegen nicht so relevant. In diesem Beitrag werden die Impulsflankensteilheiten der GSM-Signale mit denen der Fernsehsignale verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass die meisten Spektralanteile der GSM-Impulse auch im Spektrum der Fernseh-Synchronimpulse enthalten sind, letztere weisen jedoch eine um ein Vielfaches höhere Impulsflankensteilheit auf. Eine Berücksichtigung der landesweit herrschenden Strahlungsintensitäten von Mobilfunk und Fernsehen kann zur Aussage führen, dass die seit über 50 Jahren weltweit eingeführte Fernseh-Technik die Behauptung der biologischen Schädlichkeit der Impulsflankensteilheit digital modulierter Hochfrequenz widerlegt.

Häufig behauptete Beeinträchtigung der Gesundheit durch steiflankige Impulse

In vielen deutschsprachigen Aufsätzen und in im Internet verbreiteten Ansichten wird eine mögliche Gesundheitsgefahr durch Mobilfunk begründet unter anderem mit Berichten über messbare Effekte, nach denen eine Mobilfunk-Exposition beispielsweise das EEG des Menschen deutlich beeinflusst. Die gesundheitliche Relevanz solcher Effekte ist jedoch noch unklar, auch konnte bisher noch keine Schädlichkeit des vermuteten Einflusses zweifelsfrei ermittelt werden. Auf eine immer wieder betonte Schlüsselaussage in diesen Aufsätzen, dass vor allem die digitale, pulsartige Modulation der Mobilfunkstrahlung die Gesundheitsgefährdung ausmache, soll in diesem Beitrag genauer eingegangen werden.

Eine vor allem von Mobilfunkgegnern häufig zitierte Aussage von [1] betont, dass nicht die Intensität unmodulierter oder herkömmlicher überwiegend analog modulierter Hochfrequenzaussendungen (im VHF-Bereich und darüber) die biologischen Abläufe im lebenden Körper beeinflusst, sondern die Steilheit der Impulsflanken von digital modulierten Signalen, wie sie in den Mobilfunkgeräten nach GSM-Standard verwendet werden. Zitat aus [1]: „Es muss festgehalten werden, dass das biologische System auf die Änderung pro Zeit reagiert und die Periodizität dieser Signaländerung eine biologische Relevanz besitzt“. Der dort gebrachte Hinweis auf die vergleichsweise Harmlosigkeit von TV-Signalen bringt bei der nun folgenden genaueren Betrachtung etwas mehr – für viele vielleicht verblüffende – Klarheit in die Diskussion um die mög-

liche Schädlichkeit der Mobilfunk-Aussendungen.

Technische Grundlagen und Vergleich zwischen Fernseh- und Mobilfunk-Aussendungen

Es werden im Folgenden die bei Fernseh-sendern und bei GSM-Mobilfunkgeräten vorkommenden Flankensteilheiten in der Modulation der Hochfrequenzsignale untersucht und dargestellt. Die Signalinhalte von Sendungen werden durch verschiedenartige Modulationen auf hochfrequente Träger aufgeprägt. Die üblicherweise als analog bezeichnete Modulation der TV-Sender ist eine Kombination aus analoger Amplitudenmodulation (Bildinhalt) und Frequenzmodulation (Toninhalt) sowie einer Impulsübertragung zur Bildsynchronisation. Die im Folgenden genauer beschriebene digitale Modulation der Mobilfunkgeräte ist kombiniert aus einer kontinuierlichen Phasenmodulation und einer Amplitudentastung (Ein-Aus-Schalten). Die Synchron-Impulse des TV-Signals können daher mit den Impulsen der amplitudengetasteten Mobilfunkstrahlung gut verglichen werden.

Analyse der Mobilfunkstrahlung

Wenn im Folgenden von „Pulsung“ gesprochen wird, so ist damit eine periodische Amplitudentastung (= eine digitale Form der Modulation) gemeint. Die für den Benutzer stärkste und wegen der streng periodischen Pulsung diskussionswürdige Feldstärke bzw. Strahlungsintensität im Mobilfunkbereich ist die der Mobilstationen (Mobilfunkendgerät, „Handy“). Die Basisstationen dagegen senden meist mehrere Signale in verschiedenen sogenannten Zeitschlitzen

aus, so dass die resultierende Strahlung dort keine so deutliche gleichmäßige, periodische Pulsung beinhaltet; obendrein ist die Strahlungsintensität im öffentlich zugänglichen Bereich um die Basisstationen um Größenordnungen niedriger als die der Mobilstationen beim Telefonieren und in dessen näherer Umgebung (Begleitung, Sitznachbar im öffentlichen Verkehrsmittel usw.). In dem weiter unten vorgenommenen Vergleich wird der bezüglich der Pulsung bei einer Basisstation als ungünstig anzusehende Fall nur eines aktiven Zeitschlitzes angenommen, die Signalform entspricht dann der Aussendung einer Mobilstation.

Struktur der in einem Zeitschlitz gesendeten Signale

Eine Mobilstation sendet gemäß dem GSM-Standard sowohl den Sprachinhalt als auch zusätzliche Informationen zum Verbindungsaufbau und Betrieb als digital modulierte Trägerfrequenz, z. B. bei ca. 900 MHz. Die Modulation erfolgt in einem 4,615-ms-Rhythmus als Pulsfolgen (auch Bursts genannt) mit der Pulsdauer von je 0,577 ms. In der Pause von 4,038 ms zwischen den eigenen Bursts können sieben weitere Mobilstationen auf der gleichen Trägerfrequenz mit der gleichen Basisstation kommunizieren, so dass die Gesamtperiode in 8 Zeitschlitze unterteilt ist. **Abb. 1** zeigt die Bursts einer Mobilstation und den Aufbau eines typischen Burst. Allen – teilweise unterschiedlich aufgebauten – Bursts gemeinsam sind die drei „Tailbits“ an Anfang und Ende, die einen Teil der Flankensteilheit des Bursts bestimmen.

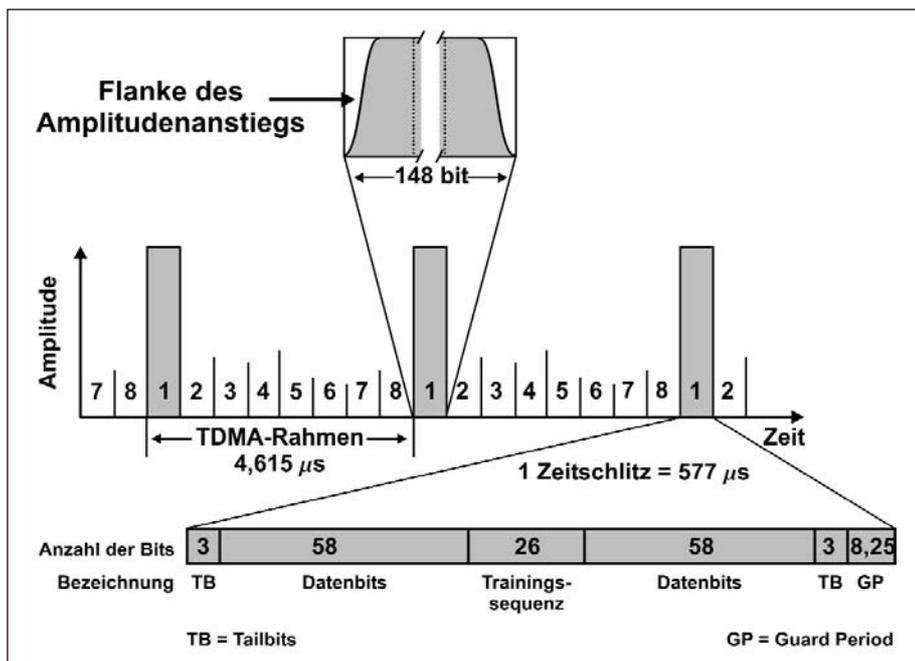


Abb. 1: Struktur eines „normal burst“ mit Darstellung der Amplitudensteilheit (nach [2])

Die Struktur eines typischen Bursts ist durch eine spezielle Phasenmodulation gekennzeichnet, die Gauss-Minimum-Shift-Keying (GMSK) genannt wird. In dieser Modulation bleibt die Amplitude während der Bitfolge konstant. Zu Beginn der Bitfolge entsteht eine kontinuierliche Amplitudenänderung von 0 auf Maximum und am Ende der Bitfolge von Maximum auf 0. Diese Amplitudenänderung kann (nach [2]) im Zeitrahmen der genannten 3 Teilbits (das entspricht 11 µs) erfolgen. Nach der offiziellen Spezifikation ist eine Zeitmaske von max. 28 µs vorgesehen, die Industrie stellt einen Mittelwert von ca. 18 µs ein.

Resultierendes Signal-Spektrum der Mobilstation

Aus der Pulsmodulation im 4,6-ms-Takt und einem Tastverhältnis von 1:8 kann die spektrale Verteilung des mit der Trägerwelle übertragenen Signals ermittelt

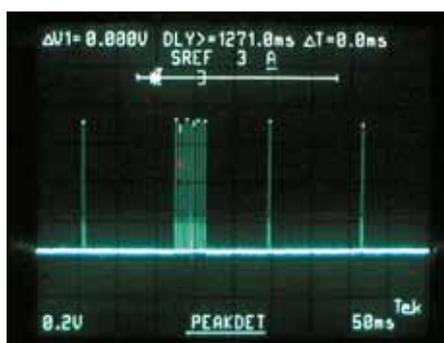


Abb. 2: Eine gemessene Pulsform der Handy-Abstrahlung beim Zuhören (DTX-Modus, 12 Bursts in einer Gesamt-Periode von 480 ms)

werden (Fourieranalyse). Dabei ergibt sich, dass natürlich nicht nur die häufig zitierte 217-Hz-Schwingung, sondern – nur wenig schwächer – auch bei 434 Hz und 651 Hz Schwingungen auftreten, und dass ebenso noch weitere Spektrallinien vorhanden sind, deren Amplituden erst oberhalb von 1 KHz deutlich unter 50 % der 217-Hz-Amplitude absinken.

Seit einiger Zeit wird von besorgter Seite auch auf eine 8,33-Hz-Pulsung hingewiesen, die dann auftritt, wenn an der Mobilstation dem Gesprächspartner nur zugehört wird (im DTX-Mode). Dieser Effekt beruht darauf, dass keine eigene Sprach-Information übertragen werden muss und die Mobilstation alle 120 ms einige Messwerte überträgt. Dieser sogenannte SACCH-Kanal der Mobilstation erscheint nur einmal im sogenannten „26-Multirahmen“, der insgesamt 120 ms Dauer aufweist. Die darauf beruhende Modulation besteht daher aus nur einem Burst pro 120 ms. Der gleichmäßige Rhythmus wird jedoch durch die Aussendung weiterer Informationen (je ein Burst in 8 aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen, alle 480 ms wiederholt) deutlich verändert. Abb. 2 zeigt eine solche gemessene typische Aussendung eines Handys beim Nur-Zuhören.

Das Tastverhältnis von 1 : 240 des SACCH verursacht ein extrem breitbandiges Spektrum, in dem die 8,33-Hz-Schwingung genauso wie ihre Vielfachen bis zum Kilohertz-Bereich in praktisch gleicher (sehr

geringer) Höhe erscheinen. Dieses theoretisch gleichmäßige Spektrum wird jedoch durch die Übertragung der Burst-Gruppe im 480-ms-Rhythmus dahingehend in seiner Struktur verändert, dass auch eine 2,08-Hz-Schwingung mit ihren Vielfachen (4,17 Hz, 6,25 Hz usw.) in sehr schwacher und wechselnder Intensität auftritt. Abb. 3 zeigt die untersten Frequenzen der aus dem Signal von Abb. 2 errechneten Spektralanteile (Annahme eines über 20 Sekunden unveränderten Signalinhalts).

Es ist zu beachten, dass die Impulshöhe zu 1 V angenommen wurde, die verschiedenen im Signalgemisch vorhandenen harmonischen Schwingungen zeigen also jeweils nur eine Amplitude von ca. 0,8 % (auch die maximale Spektrallinie, die 217-Hz-Schwingung, erscheint nur mit 1,15 %). Ein eventuell frequenzselektiv anregbares Medium kann also bei diesen untersten Signalfrequenzen nur mit $6,4 \cdot 10^{-5}$ (also 0,064 Promille) der Pulsspitzenleistung angeregt werden.

Bei der Überlegung, ob einige dieser Schwingungen eventuell lebende Organismen störend beeinflussen könnten – die Eigenfrequenzen des Resonators Erdkugel – Ionosphäre (7,5 Hz und erste Vielfache davon) sind alle irdischen Lebewesen gewohnt – sollte also einerseits immer beachtet werden, mit welcher minimalen Leistungsanteil diese Frequenzen im Informationssignal des Mobilteils enthalten sind und andererseits, dass dieses niederfrequente Informationssignal der hochfrequenten Trägerschwingung erst über eine nichtlineare Funktion der Körperzellen durch Demodulation gewonnen werden müsste. Diese Nichtlinearität scheint jedoch bei den höheren Frequenzen noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen worden zu sein (siehe z. B. [3]).

Analyse der Fernsehsignale

Die relativ komplexen Signale der Fernsehsender sind überwiegend analog moduliert (Bildinhalt und Toninhalt), die Synchronisation des Empfängers zur richtigen Bildwiedergabe wird jedoch durch einen Synchronisationspuls ermöglicht, der deshalb mit der digitalen Modulation des Mobilfunks verglichen werden kann.

Die TV-Signale zeigen im Bereich des etwa 4,7 µs langen Synchronisationsimpulses die in Abb. 4 spezifizierten Flankenform mit

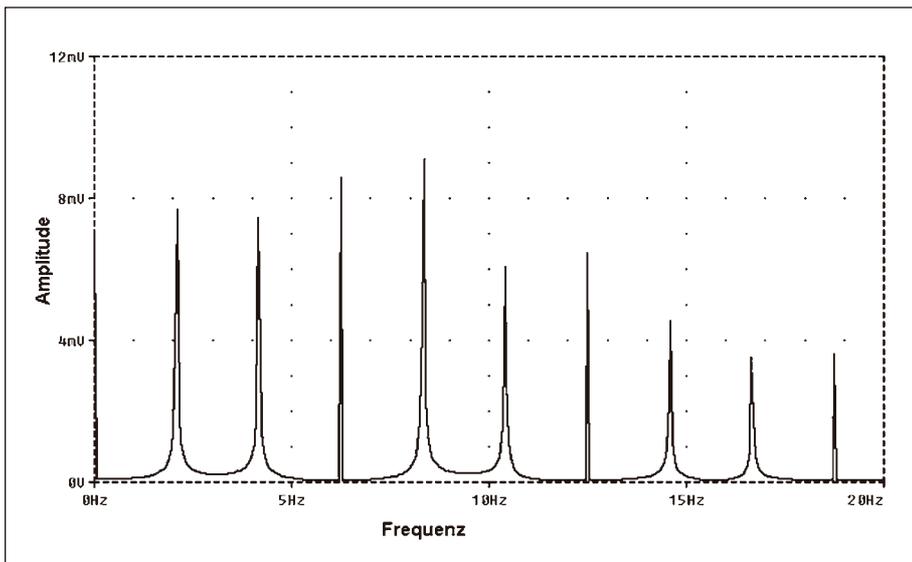


Abb. 3: Signal-Spektrum der Handy-Aussendung nach Abb. 2 (demodulierter NF-Bereich, unterste Frequenzen)

einem Anstieg von 75 % auf knapp 100 % der Signalamplitude innerhalb von $0,2 \pm 0,1 \mu\text{s}$. Zur Bestätigung dieser spezifizierten Signalform kann eine überall mit einer Antenne empfangbare TV-Aussendung verstärkt und auf einem Oszilloskop dargestellt werden, siehe Abb. 5; hier kann die Form des Synchronisationsimpulses gut wiedererkannt werden. Dieser Impuls wird zur Zeilensynchronisation (15,625 kHz) sowie zur Bildsynchronisation (50 Hz) verwendet. Sein Spektrum ist sehr breit, wie in Abb. 6 zu sehen ist. Man kann feststellen, dass zahlreiche Signal-Frequenzen im Bereich zwischen 50 Hz und 1000 Hz, die von manchen Forschern im Zusammenhang mit Mobilfunk als bedenklich angesehen werden, auch in diesem TV-Signal enthalten sind.

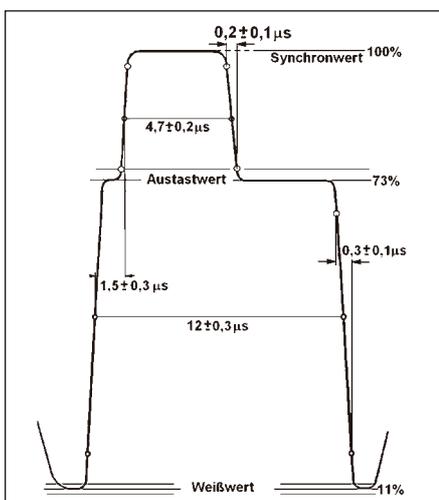


Abb. 4: Spezifizierte Form der Synchronimpulse (73 % bis 100 %) am Senderausgang eines Fernsehsenders (Pflichtenheft Nr.5/2.1)

Messungen der Intensität von Fernseh- und Mobilfunkstrahlung

Im Rahmen der in Bayern als „Rinderstudie“ bekannt gewordenen Untersuchungen über Krankheiten und/oder Verhaltensanomalien von Rindern abhängig von der Intensität der elektromagnetischen Bestrahlung [5] wurden an den ausgewählten Bauernhöfen die Feldstärken von Mobilfunk-Basisstationen und von anderen HF-Quellen (z. B. TV-Sendern) gemessen. Es ergaben sich Intensitäten der Gesamtexposition, die niedrig im Vergleich zum gesetzlichen Grenzwert waren. Auffallend ist, dass auch die maximale Gesamt-Exposition nur 5,2 Promille des gesetzlich zulässigen Wertes betrug, der Mittelwert lag bei etwa 0,3 %. Das Ergebnis dieser nicht optimal angelegten Studie war zwar sowohl für die Öffentlichkeit als auch für Fachleute enttäuschend, weil kein eindeutiges Ergebnis herausgearbeitet werden konnte. Jedoch können



Abb. 5: Gemessenes TV-Signal an der Empfangsantenne des Rundfunkteilnehmers. Darstellung des Bereichs um den Synchronimpuls (Mittelachse entspricht 0 % in der Abb. 4)

die dort durchgeführten ausführlichen Feldstärkemessungen von TV- und Mobilfunkaussendungen zum folgenden Vergleich der (als biologisch wirksam apostrophierten) Impulsflankensteilheit herangezogen werden.

Vergleich der Belastungen bei

Betrachtung der Impulsanstiegs-Steilheit
Mehr als die Hälfte der in [5] ausgewählten Bauernhöfe lagen – nach Meinung der Besitzer und/oder der auswählenden Institutionen – in einem Bereich erhöhter Strahlenbelastung, vor allem durch Mobilfunk. Bei fast der Hälfte aller in Abb. 7 gezeigten Messstellen ergaben sich jedoch höhere Werte im Bereich der TV- und Rundfunksignale.

Die Berechnung der Steilheit der Impulsflanken für einen willkürlich ausgewählten Hof bei etwa 1 % der Grenzwertbelastung (Hof Nr. 32 in Abb. 5, auf der Weide) ergibt den in Tabelle 1 ermittelten Vergleich (Messwerte aus [6]).

Ergebnis und Bewertung des Vergleichs

Die in der Tabelle 1 für den Hof Nr. 32 beispielhaft berechnete Impulsflankensteilheit ist bei den dort empfangenen Fernsehimpulsen über 60 mal so hoch wie bei den Mobilfunkimpulsen. Diese Tatsache wird in der öffentlichen Diskussion offenbar deshalb nicht erkannt, weil sie häufig durch den Hinweis auf die vollständige Amplitudentastung des Mobilfunksignals verschleiert wird. Das in diesem Zusammenhang in [1] ausdrücklich angeführte logarithmische Maß der Amplitudenänderung zur Betonung der hundertpro-

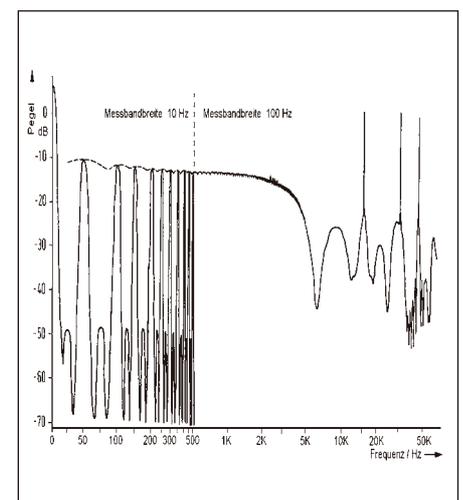


Abb. 6: Spektrum des Fernseh-Synchronimpulses (aus [4])

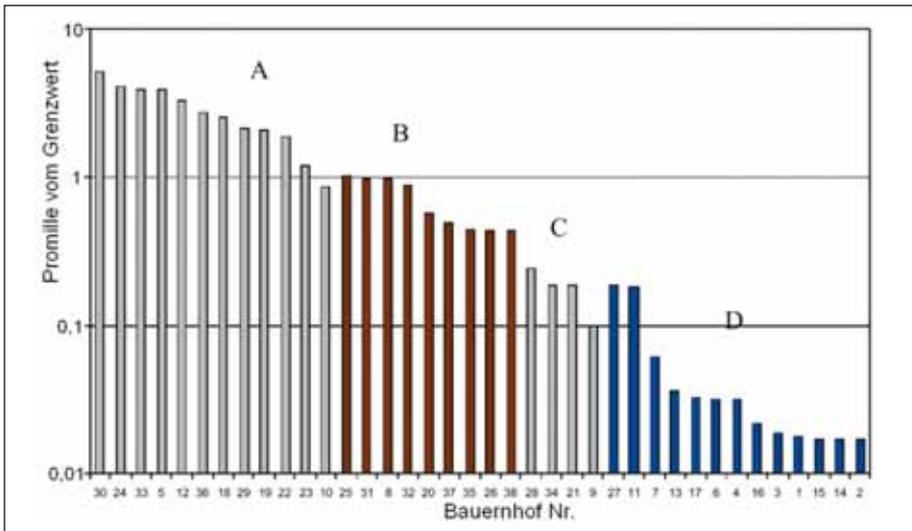


Abb. 7: Gemessene Feldstärkewerte [in Promille] im Rahmen der bayrischen Rinderstudie bezogen auf den Grenzwert nach der 26. BImSchV.

	TV-Signal (bei 511 MHz)	Mobilfunksignal (Basisstation in der Nähe)
Gemessene elektr. Feldstärke	1,1 V/m (Mittelwert mehrerer Messstellen)	0,16 V/m (Maximalwert)
Feldstärke-Unterschied durch Modulationsgrad	0,297 V/m (= 100 % – 73 %)	0,16 V/m (= 100 %)
Impuls-Anstiegszeit	0,3 µs (von 73 % auf 100 %)	min. 11 µs (üblich: ca. 18 µs)
Daraus resultierende Impulsflankensteilheit	1 V/m pro 1 µs	0,015 V/m pro 1 µs

Tabelle 1: Vergleich der Impulsflankensteilheiten zwischen TV-Signal und Mobilfunksignal

zentigen Tastung beim Mobilfunk ist völlig irrelevant, da diese Verhältniszahl bei verschwindendem Minimum-Pegel natürlich gegen Unendlich gehen muss.

Wegen der in [5] getroffenen Auswahl vieler Messstellen entsprechend einem vermuteten Bedrohungsschwerpunkt Mobilfunk ist davon auszugehen, dass im Durchschnitt aller Orte deutschlandweit die Strahlenbelastung durch den Impulsgehalt der TV-Signale wesentlich höher liegt (oder mindestens in der gleichen Größenordnung ist), wie die durch Basisstationen des Mobilfunks oder anderer Dienste.

Schlussfolgerung

Die Behauptung in [1]: „dass das biologische System auf die Änderung pro Zeit reagiert und die Periodizität dieser Signaländerung eine biologische Relevanz besitzt“ mag im Prinzip durchaus auf nachvollziehbaren Überlegungen basieren und

logisch erscheinen. Abgesehen davon, dass offenbar noch keine Demodulator-Funktion bei hohen Frequenzen im lebenden Organismus sicher erkannt wurde, ist bei dieser Behauptung jedoch versäumt worden, die bereits seit Jahrzehnten real existierende elektromagnetische Umwelt in dieser Richtung zu analysieren.

Die hier vorgelegte Analyse bezüglich der behaupteten besonderen Gefahr impulsförmig modulierter Hochfrequenz zeigt als Resultat, dass die biologische Unbedenklichkeit der heute diskutierten Strahlenbelastung durch Mobilfunk-Antennenmasten (Basisstationen) durch die bereits in der Mitte des vorigen Jahrhunderts weltweit eingeführte Technik des Fernsehens eigentlich bereits hinreichend belegt sein müsste.

In allen Ländern der Welt mit TV-Versorgung wird die Bevölkerung mit den in Ab-

schnitt 2.2 beschriebenen periodischen steilen Impulsflanken belegt. Nach zwei Generationen der Menschheit und noch mehr Generationen bei den Nutztieren hätten schädliche Einflüsse durch diese impulsmodulierte Hochfrequenz mit ihren wesentlich steileren Impulsflanken und gleichzeitig ebenfalls meist wesentlich höheren Feldstärken als bei den Mobilfunkanlagen längst festgestellt werden können bzw. müssen.

Die zur Zeit laufenden Langzeit-Studien im Bereich Mobilfunk könnten deshalb möglicherweise das gleiche Ergebnis der Unbedenklichkeit bringen wie die Experimentalstudie [7], die erst ein Jahrzehnt nach der Behauptung des Waldsterbens durch die elektromagnetischen Strahlen von Richtfunk und Radar diese Behauptung entkräftete.

Literatur

[1] v. Klitzing, L.: Handys – ein gesundheitliches Risiko. Vortrag anlässlich der Winterschule 2000 der Deutsch. Gesellschaft für Medizinische Physik (DGMP) in Pichl, 24.01.2000

[2] Eberspächer, J., Vögel, H.-J.: GSM – Global System for Mobile Communication. Verlag B.G. Teubner, Stuttgart 1997, S. 82-83.

[3] Silny, J.: Rectification of RF Sine Wave Packages in Excitable Cells, Tested in In-Vivo-Investigations. BEMS (1999) Abstract Book, pp. 85 –86.

[4] Mäusl, R.: Fernsehtechnik. 2. Auflage, Hüthig-Verlag, 1995.

[5] Hecht, W., et al.: Untersuchungen zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobilfunkanlagen auf Gesundheit, Leistung und Verhalten von Rindern. Kurzfassung Endbericht, www.umweltministerium.bayern.de/bereiche/mobilf/rinder.pdf

[6] Wuschek, M.: Detail zu [5], persönl. Kommunikation.

[7] Götz, R., Käs, G.: Untersuchungen zur Wirkung elektromagnetischer Felder auf Waldbäume. Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Newsletter 3 (1999), S. 12-14.

2.2.2 Gepulste Hochfrequenz in der Radartechnik Technisches Prinzip und Anwendungen

Eduard David, Siegfried Eggert, Andreas Wojtysiak

Eine technische Anwendung, die beispielhaft für die Charakterisierung von gepulsten hochenergetischen Strahlen immer an erster Stelle genannt wird, ist RADAR. Dieser Beitrag umfasst einen historischen Rückblick, die Beschreibung der technischen Funktion und die praktischen Anwendungsfälle. Auf die Auswirkungen auf die biologischen Systeme wird in Abschnitt 3.1.6 eingegangen.

Geschichte des Radars

Das aus dem Englischen stammende Wort „Radar“ ist eine Abkürzung für „Radio Detection and Ranging“ und bedeutet sinngemäß „Erfassen und Messen der Entfernung mittels Radiowellen“. Ursprünglich wurden die gleichen Verfahren als Funkmesstechnik (deutsch) oder Radiolokatoren (russisch) bezeichnet. Bereits auf das Jahr 1904 datieren erste erfolgreiche Versuche in Forscherkreisen aus Deutschland und England. Die ersten praktisch verwendbaren Geräte arbeiteten im Bereich Meter- und Dezimeterwellen, ca. 30 m bis ca. 1 m entsprechend 10 MHz bis 300 MHz. Im Laufe des Zweiten Weltkriegs wurden sowohl boden- als auch bordgestützte Geräte in großer Zahl für die See wie auch für die Luftaufklärung wirksam eingesetzt, u.a. wurde der U-Boot-Krieg dadurch entscheidend beeinflusst. Auch heute noch gibt es zahlreiche militärisch erprobte und genutzte Varianten der Radartechnik, die der zivilen Fachwelt erst bekannt werden, wenn sie veraltet sind.

Betrachtet man die historische Entwicklung der Radartechnik unter dem Aspekt möglicher Einflüsse auf die Gesundheit, so lässt sich feststellen, dass die Radargeräte etwa in der Zeit von 1950 bis Ende der 70er Jahre die höchsten Sendeleistungen sowohl für Impuls- als auch für Dauerstrichbetrieb aufzuweisen hatten – und in dieser Zeit ereigneten sich auch schwere Unfälle. Inzwischen sind die Erfahrungen jedoch in zulässige Grenzwerte umgesetzt worden, so dass selbst in dem für das Bedien- und Wartungspersonal zugänglichen Bereich die Exposition gegenüber der Hochfrequenzstrahlung so beschränkt ist, dass die gesundheitsrelevanten Werte nicht überschritten werden. Das wird seit Jahren bei Einhaltung der entsprechenden Dienstvorschriften gewährleistet.

Prinzip des Radars

Alle unter dem Sammelbegriff „Radar“ zusammengefassten Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Reflexion elektromagnetischer Wellen an einem Objekt, dem Empfang der reflektierten Energie und der Gewinnung von Informationen über das Objekt aus der Art des reflektierten Signals. Radargeräte senden dabei ein kurzes Signal von einigen Nanosekunden aus und empfangen das zurückkommende Echo (Primärradarverfahren), oder sie veranlassen beim Objekt, dass ein Transponder ein eigenes Antwortsignal aussendet, üblicherweise mit einer Kennung zur Identifikation des Ziels codiert (Sekundärradarverfahren).

Radar gehört zum Bereich Funkortung und wird zur Richtungs-, Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung genutzt. Spezielle Anwendungen sind z. B. die genaue Abbildung der Erdoberfläche sowie die Flug- und Navigationssicherung mit Hilfe von Sekundärradarverfahren. Radar-Verfahren benutzen üblicherweise elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 200 MHz bis 35 GHz, spezielle Anwendungen überdecken aber auch den Bereich von 10 MHz bis über 100 GHz. Die dabei verwendeten Sendeleistungen reichen von einigen Milliwatt bei der Verkehrsüberwachung im Straßenverkehr bis zu einigen Megawatt im Flugsicherungsdienst. Dabei wird jeweils bezogen auf die Anwendung ein Optimum der Parameter Frequenz und Reichweite angestrebt (niedrige Frequenz und hohe Sendeleistung für große Reichweiten, z. B. $f \approx 1,3$ GHz, $P_{\text{imp}} \leq 2$ MW; hohe Frequenz und niedrige Sendeleistung für hohe Auflösung, z. B. $f = 10 - 35$ GHz, $P_{\text{imp}} \leq 20$ kW).

Das Radarprinzip beruht auf folgenden Eigenschaften elektromagnetischer Wellen:

- Ausbreitung mit einer bekannten Geschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit)
- Quasi-optische Ausbreitung des Send- und Empfangssignals
- Möglichkeit der Formung der Strahlung (Richtwirkung und Bündelung/Fokussierung)
- Reflexion der Strahlung an leitfähigen Hindernissen.
Diese wiederum hängt ab:
 - von der Leitfähigkeit des Objektes,
 - vom Verhältnis der Abmessungen des Objektes relativ zur Wellenlänge der elektromagnetischen Wellen,
 - von der Form und der Reflexionsfähigkeit des Objekts und
 - vom Wasseranteil (Dampf, Tropfen, Flocken) in der Atmosphäre.

Reicht die natürliche Reflexion von Objekten für eine sichere Ortung nicht aus, zum Beispiel bei Booten aus Holz oder Kunststoff, so kann durch das Anbringen ca. 10–20 cm großer Winkelreflektoren (Tripel Spiegel) der Reflexionsfaktor um mindestens eine Größenordnung erhöht werden.

Die Mehrzahl der Radarverfahren nutzt gepulste Feldformen, wofür es verschiedene Gründe gibt. Zur Ortung von Objekten werden hauptsächlich Laufzeitunterschiede zwischen ausgesendetem und empfangenem Signal ermittelt, was definierte „Pulspakete“ voraussetzt. Grundsätzlich können aus solchen Signalen durch die Veränderung bei der Reflexion auch zusätzliche Informationen über das Objekt gewonnen werden. Hinzu kommt eine Energieeinsparung bei reduzierter Sendezeit für kurze Impulse.

Signalerzeugung und Signaltypen

Um das Sendesignal beim Impulsradar zu erzeugen, wird in einem Modulator die

Versorgungsspannung für den Hochfrequenzerzeuger (meist ein Magnetron) in Form von Gleichspannungsimpulsen generiert. Über diese Gleichspannungsimpulse werden die Parameter der Hochfrequenzimpulse – Leistung, Pulsbreite, Pulsfolgefrequenz – eingestellt; nur die „Trägerfrequenz“ wird durch die Bauweise des Magnetrons festgelegt. An die Form und zeitliche Stabilität der Gleichspannungsimpulse werden sehr hohe Anforderungen gestellt, die z.T. nur mit aufwändigen Speicherschaltungen erfüllt werden können. Die Impulslänge und die Pulsfolgefrequenz variieren von einigen Millisekunden und einigen hundert Hertz bei Mittel- und Weitbereichsradaranlagen bis zu einigen Nanosekunden und einigen Kilohertz bei Nahbereichs-Radaranlagen (z. B. Flughafen/Vorfeldradar). Bei besonders hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Zielerfassung werden die Sender mit Doppel- oder Mehrfachimpulsen getastet. Für die Verbindung zwischen Sender/Empfänger und Antenne werden – abhängig von Frequenz und zu übertragender Leistung – in der Regel bis ca. 2 GHz Koaxialkabel, darüber (teilweise auch bereits ab 1 GHz) Wellenleiter (meist rechteckige Hohlleiter) eingesetzt.

Bei Impulsradaranlagen ist in der Hochfrequenzverbindung zwischen Sender, Empfänger und Antenne ein besonderer, sehr schneller Schalter erforderlich, wenn für Senden und Empfangen dieselbe Antenne verwendet wird. Dieser Schalter hat die Aufgabe, für die Zeit des Sendeimpulses den Empfängereingang zu sperren und damit zu schützen, weil sonst durch die Energie des Senders die empfindliche Eingangsschaltung sofort zerstört würde. Diese Schaltfunktion wird entweder durch schnelle hochbelastbare Schaltdioden oder spezielle Einrichtungsleitungen mit Ferriten realisiert.

Allen Grundtypen von Radargeräten ist gemeinsam, dass sie eine hochfrequente elektromagnetische Strahlung (HF-Strahlung) erzeugen und aussenden. Der ausgesandte Strahl (Richtstrahl) ist je nach Anwendungsfall und Gerätetyp von unterschiedlicher Gestalt. Grundsätzlich ist zwischen zwei Wirkprinzipien zu unterscheiden: Impulsradar und Dauerstrichradar (CW-Radar, cw = continuous wave). Das Impulsradar umfasst etwa 75 % aller zivilen Radareinsatzfälle. Es misst die Impulslaufzeiten und eignet

sich vorwiegend für Entfernungsmessungen. Beim CW-Radar liegt die Information in der Frequenz, es eignet sich vorwiegend für Geschwindigkeitsmessungen.

- **Überwachungsradare** dienen der Luftraum-, Seeraum- oder Wetterbeobachtung und der Navigation. Sie senden mit einer sich drehenden Antenne kurze elektromagnetische Impulse aus und ermitteln aus der Laufzeit des Echos und der Ausrichtung der Antenne Entfernung und Richtung des Objekts. Ihr Richtstrahl bildet einen vertikalen Fächer.
- **Feuerleitradore** dienen der Ermittlung genauer Zieldaten für den Waffeneinsatz. Ihre Antenne wird direkt auf das Ziel ausgerichtet und sendet einen scharf gebündelten Richtstrahl aus, der ebenfalls aus kurzen Impulsen besteht. Die Charakteristik des ausgesandten Radarsignals erlaubt es, die Bewegung des Ziels zu erkennen und die Antenne automatisch nachzurichten.
- **Beleuchtungsradare** sind besondere Feuerleitradore. Sie senden ein nicht gepulstes, kontinuierliches HF-Signal zu einem Ziel, das durch Lenkwaffen (Raketen) bekämpft werden soll. Die Abwehrrakete empfängt und peilt die reflektierte Energie und lenkt sich ins Ziel.
- **Radargeräte zur Geschwindigkeitsmessung** senden ein nicht gepulstes Dauersignal in Messrichtung. Bei der Reflexion zum Beispiel an einem Auto, das sich auf das Messgerät zubewegt oder sich von ihm entfernt, wird die Frequenz der HF-Strahlung verändert (Dopplereffekt). Aus dem Frequenzunterschied lässt sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs errechnen. Neuerdings wird auch hier gepulste Radartechnik eingesetzt.
- **Sonderanwendungen** für den Radareinsatz gibt es z. B. in der Raumforschung zur Planetenerkundung, zur Vermessung der Erdoberfläche oder zur Suche verschütteter Menschen und Tiere.

Antennenformen und -charakteristiken

Während die Antennen von Überwachungsradaren die Energie meist gleichmäßig rundum aussenden, geht die Strahlung anderer Geräte nur in eine Richtung, die sich, wenn überhaupt, nur langsam verändert. Für eine gute Auflösung benötigen die Antennen eine spezielle Richtcharakteristik, zum Beispiel bedeutet das für das Diagramm eines Mittelbereichs-Rundsichtradars in der

horizontalen Ebene einen sehr schmalen Öffnungswinkel (typisch $1,5^\circ$) und in der vertikalen Ebene 10° bis 20° . Die Bewegung der Antennencharakteristik erfolgt meist durch mechanisches Drehen oder Schwenken der gesamten Antenne, oder bei modernen Geräten rein elektronisch durch Phasensteuerung in der Antenne (Beispiel: Präzisions-Anflugradar).

Für Radarantennen gibt es drei Grundbauformen:

- Reflektorantennen, bestehend aus einem zumeist parabelförmigen Reflektor (Sekundärstrahler), in dessen Brennpunkt ein oder mehrere vom Sender gespeiste Erreger angeordnet sind
- Wellenleiter-Schlitzantennen, bestehend aus linienhaft oder flächenhaft angeordneten Wellenleitern, an deren Schmalseiten als Einzelstrahler wirkende Schlitze angeordnet sind, aus deren Einzeldiagrammen sich das Gesamtdiagramm bildet
- Phasengesteuerte Antennen (phase-array), bestehend z. B. aus einer flächenhaften Anordnung von Einzelantennen in Verbindung mit Ferrit-Elementen, deren Magnetisierungszustand einzeln elektronisch gesteuert werden kann und damit die Phasenlage des Wellenfeldes steuert. Das ergibt eine nahezu trägheitslose Bewegung des Richtdiagramms.

Bei größeren Radaranlagen sind der Sender, in dem die Strahlung erzeugt wird, die Antenne und der Bildschirm getrennte Geräte. Die Antennen befinden sich im Freien, Sendegeräte und Bildschirme in geschlossenen, aber meist getrennten Räumen.

Sendeleistungen

Luftraumüberwachungs-, Feuerleit- und Beleuchtungsradare arbeiten mit hohen Leistungen (typische Werte: 200 – 20.000 Watt CW-Leistung), um auch über große Entfernungen sichere Zieldaten zu ermitteln. Sekundärverfahren können prinzipiell mit geringeren Leistungen auskommen ($P_{imp} < 5 \text{ kW}$) als Primärverfahren, da keine Reflexionsverluste zu überwinden sind. Geschwindigkeitsmessradare arbeiten nur auf sehr kurze Distanz und daher mit sehr geringer Energie (typische Werte: 0,0005–0,01 Watt).

Das Signal an der Antenne („Luftschnittstelle“)

Bei den üblichen Impuls-Radargeräten wird die Hochfrequenz-Sendeleistung von der Antenne mehr oder weniger scharf gebündelt als Folge von Impulsen abgestrahlt. Dabei ist die Dauer des Impulses zur Dauer der jeweils folgende Pause in der Regel sehr klein; das Verhältnis wird „Tastverhältnis“ (engl. „duty cycle“) genannt und kann zwischen ca. 1 : 200 und ca. 1 : 2000 variieren. Die zugehörigen Pulsfolge-Frequenzen liegen zwischen 100 Hz und 5000 Hz.

Für den einzelnen Puls (die Hüllkurve) wird eine Rechteckform angestrebt, in der Praxis ist jedoch nur eine Trapez-ähnliche Darstellung mit steilen Flanken und einer abfallenden Dachschräge erreichbar (Darstellung im Zeitbereich). Diese Verformungen gegenüber der „Idealform“ resultieren einerseits aus dem Einschwingverhalten des Generators und andererseits aus der Stabilität der Speisespannung der Leistungs-Endstufe.

Die Darstellung eines typischen Radarimpulses im Frequenzbereich (Spektrumanalysator) zeigt eine mehr oder weniger glockenförmige Verteilung rechts und links der Nennfrequenz. Die Aussendung einer spektral reinen Einzelfrequenz ist nur mit sehr hohem Aufwand möglich und für die meisten Anwendungsfälle weder erforderlich noch erwünscht. Die Anzahl der Schwingungen während eines Impulses hängt von der Trägerfrequenz und der Impulsdauer ab. Bei speziellen Aufgabstellungen werden an Stelle eines längeren Einzelpulses zwei (oder mehrere) kurze Pulse in geringem zeitlichem Abstand und geringem Frequenzversatz ausgesendet (z. B. Seeweg-Kontrollradaranlagen).

$$P = P_{\text{imp}} \times d$$

wobei

$$d = T_{\text{imp}} \times F_T$$

Die Leistung eines solchen Radars wird als Impulsleistung in Kilowatt oder Megawatt angegeben. Die mittlere Leistung (wichtig für die Bewertung mittels Vergleich zu Grenzwerten) kann sehr einfach über das Tastverhältnis errechnet werden:

Beispiel:

Impulsleistung	$P_{\text{imp.}}$	=	80 kW,
Impulsdauer	$T_{\text{imp.}}$	=	$1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$
Tastfrequenz	F_T	=	$1000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ s}^{-1}$
Tastverhältnis	d	=	$10^{-6} \text{ s} \times 10^3 \text{ s}^{-1} = 10^{-3}$,
Mittlere Leistung	P	=	$80 \text{ kW} \times 10^{-3} = 80 \text{ W}$

Bei einer rotierenden oder schwenkenden Antenne werden Signalform und -energie am Empfangsort wesentlich verringert, da er immer nur dann der Strahlung ausgesetzt ist, wenn die Hauptkeule der Antennencharakteristik über ihn hinweg geht. Das kann zum Beispiel bei gleichförmiger Rotation (über 360 Grad) und einer Halbwertsbreite der Hauptkeule von 2 Grad die Bestrahlungszeit und damit die energetische Belastung auf 1/180stel verringern.

Das einwirkende Signal stellt sich als ein Pulspaket dar, dessen Einhüllende der Form der Hauptkeule der Antennencharakteristik entspricht. Die Anzahl der „Originalimpulse“, die es enthält, hängt von der Winkelgeschwindigkeit der Antenne, der Breite der Hauptkeule in der Antennencharakteristik und der Tastfrequenz des Senders ab.

Sinngemäß gilt das auch für bewegte Antennen bei Dauerstrich-Radargeräten, z. B. Dauerstrich-Zielerfassungsgeräten, nur dass der Empfangsort nicht von einem Impulspaket, sondern bei jeder Umdrehung der Antenne von einem „Dauerstrichpuls“ getroffen wird, dessen Einhüllende der Form der Hauptkeule der Antennencharakteristik entspricht.

Radargeräte der Bundeswehr

Im Heer finden Radargeräte einerseits bei der Artillerie Verwendung, um die Flugbahnen gegnerischer und eigener Geschosse zu vermessen, andererseits sind sie auf Flugabwehrpanzern zur Zielerfassung und Waffenleitung eingebaut.

Die Luftwaffe überwacht mit großen Radaranlagen den Luftraum. Die Raketenverbände der Luftverteidigung – im Laufe der Jahre die Waffensysteme HAWK, NIKE und PATRIOT – können mit Radargeräten Ziele erfassen und verfolgen; auch die Abwehraketen werden mit Radar ins Ziel gelenkt. Flugzeuge verfügen über ein meist in der Flugzeugnase eingebautes Radar für die Navigation und zur Zielerfassung.

Die Marine unterhält auf ihren Schiffen zum Teil sehr umfangreiche Systeme unterschiedlicher Radaranlagen, die unter anderem die gleichen Funktionen haben wie die Anlagen der Luftverteidigung. Hinzu kommen Navigationsgeräte und Störsender, die Radarsignale simulieren. Schließlich verfügt die Marine über Flugzeuge und Hubschrauber mit Radarausrüstung und über Küstenradarstellen.

Tabelle 1: Impulsradar-Systeme (Primärradar)

Art des Radars	Bereich der Impulsleistung	Typische Frequenzen	Bereich der Impulsfrequenz	Art der Antennen	Exposition bei Normalbetrieb grenzwertnah möglich?
Schiffsradar (Bordgerät)	10 – 80 kW	3 – 4 GHz; 9 – 10 GHz	500 – 1200 Hz	Schlitzstrahler	nein
Bordradar für Boote und Binnenschiffe	max. 15 kW	9 – 10 GHz	800 – 1500 Hz	Schlitzstrahler	nein
Landradar für Schifffahrt	bis 250 kW	1,5 – 2 GHz; 9 – 10 GHz	200 – 1200 Hz	Schlitzstrahler	nein, außer bei Wartungsarbeiten im Antennenbereich und unzulässiger Annäherung
Mittelbereichs-Radar-Flugsicherung	2 MW	1,2 – 1,8 GHz	200 – 1000 Hz	Reflektorantenne	nein, Betreten des Gefahrenbereiches nicht möglich
Wetterradar	max. 500 kW	9 – 10 GHz	800 – 1500 Hz	Kreisrunde Reflektorantenne	nein, Betreten des Gefahrenbereiches nicht möglich

Art des Radars	Bereich der Sendeleistung	Typische Frequenzen	Bereich der Umschaltfrequenz	Art der Antennen	Exposition bei Normalbetrieb grenzwertnah möglich?
Dopplerradar für Flugzeuge	200 W	8 – 12 GHz	10 – 100 Hz	Schlitzstrahler	Bei Wartungsarbeiten am Boden und unzulässiger Annäherung
Geschwindigkeits-Messgeräte der Polizei	max. 20 mW	8 – 12 GHz	–/–	Diverse Ausführungen	nein
Bewegungsmelder	max. 10 mW		–/–	Diverse Ausführungen	nein
Kollisionschutzradar für Kfz	max. 20 mW	30 – 90 GHz	–/–	Diverse Ausführungen	nein

Tabelle 2: Dauerstrich-Systeme

Literatur

Bernhardt, J.H. (2002): Gesundheitliche Aspekte niederfrequenter Felder der Stromversorgung, Dtsch Ärztebl 2002, 99: A: S. 1898 - 1910.

Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik BGFE (2001): BG-Regeln, BGR B11, Elektromagnetische Felder.

Buddecke, E. (1980): Grundriß der Biochemie. Lehrbuch für Studierende der Medizin, Zahnmedizin und Naturwissenschaften, Walter de Gruyter Berlin - New York, S. 371 - 372.

David, E.; an der Heiden, W.U.; Reißweber, J.; Pfothner, M. (1991): „Epidemiologische Studien zu den Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf den Menschen“, Dtsch Ärztebl - Ärztliche Mitteilungen, 88. Jahrgang/Heft 10 A: S. 753 - 758.

David, E.; Reißweber, J.; Wojtyasiak, A.: Untersuchungen über die Erfassung des gesundheitlichen Risikos von Bundeswehrangehörigen im Arbeitsbereich Radar im Zeitraum 1956-1985 (Studie zur Analyse der Mortalität), Zentrum für Elektropathologie der Universität Witten/Herdecke

David, E.; Reißweber, J.; Wojtyasiak, A.; Pfothner, M. (2002): Das Phänomen der Elektrosensibilität, Umweltmed Forsch Prax 7 (1), S. 7 - 16.

Forstreuter, C.(2005/06): Untersuchung zu Art und Häufigkeit von Neoplasien bei Radarmechanikern der deutschen Bundeswehr, Dissertation, Universität Witten/ Herdecke

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) (2000): Extrapulmonale Krebserkrankungen Wismut am 12. Februar 1998 in Hennef, BK-Report, Berufskrankheiten-Forum (Jacobi-Studien II und III), HVBG Sankt Augustin, ISBN: 3-88383-536-6.

International Radiation Protection Association (IRPA) (1990): Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields, Health Phys. 58, S. 113 - 122.

Liboff, A.R.; McLeod B.R.; Smith S.D. (1990): Ion Cyclotron Resonance Effects of ELF Fields in Biological Systems, in: Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: The Question of Cancer, edited by Bary W. Wilson, Richard G. Stevens and Larry E. Anderson, Battelle Press Columbus, Richland, for Library of Congress.

Peier, D. (1990): Grundlagen der Feldtheorie, in: Haubrich, Hans-Jürgen: Sicherheit im elektromagnetischen Umfeld, Berlin - Offenbach: VdE-Verlag, ISBN 3 - 8007-1700-X, S. 7 - 21.

Polk, C. (1986): CRC-Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, C. Polk and E. Postow, eds. Boca Raton, Florida.

Reilly, J.P. (1992): Electrical Stimulation and Electropathology, with chapters contributed by Hermann Antoni, Cambridge University Press for Library of Congress.

Reißweber, J.; David, E.; Pfothner, M. (1992): Untersuchungen über psychologische Aspekte bei der Wahrnehmung von Magnetophosphenen und Elektrophosphenen, Biomed. Technik 37, S. 42 - 45.

Reiter, R.J.; Lerchl, A. (1992): Regulation of Mammalian Pineal Melatonin Production by the Electromagnetic Spectrum, in: Melatonin, Biosynthesis, Physiological Effects, and Clinical Applications, edited by Hing-Sing Yu and Russel J. Reiter, CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, S. 108 - 127.

Schröder, C.; Friedrich, K.; Butz, M. (1999): Uranerzbergbau und Berufsgenossenschaften: Das Berufskrankheitengeschehen der SAG/SDAG Wismut.

Seidel HJ (1995): Umweltmedizin, Fakten und Informationen für einen verantwortungsvollen Umgang mit Umwelt und menschlicher Gesundheit, Georg Thieme Verlag Stuttgart – New York 1996.

Sommer, Th. (2001): Die Bundeswehr und ihr Umgang mit Gefährdungen und Gefahrenstoffen, Bericht des Arbeitsstabes.

2.2.3 Gepulste Felder außerhalb des RF-Frequenzbandes, erstes Beispiel: Laser

Hans-Dieter Reidenbach

Laserstrahlung hat mit Mobilfunk und Funk allgemein nur insofern etwas zu tun, als sie auf derselben physikalischen Grundlage des Elektromagnetismus beruht. Denn das Frequenzspektrum für Funkanwendungen endet dort, wo Laserwellenlängen beginnen, bei 1 mm bzw. 300 GHz als Frequenz. Anders als der Laser arbeitet Mobilfunk nicht im sensiblen (Sicht-) Bereich des Auges und wird dort entsprechend keine optischen, fokussierenden Wirkungen hervorrufen. Ebenfalls anders als Laserstrahlen sind Mobilfunkfelder selbst auch nicht stark fokussiert, so dass die Strahlungsenergie nicht auf kleine Einwirkungsflächen gebündelt wird. Auf die Laserstrahlung wird der Vollständigkeit halber eingegangen, weil ihre biologischen Wirkungen Denkanstoß geben können für Fragestellungen und Untersuchungsziele in der Mobilfunkforschung.

Theoretisch kann nicht ausgeschlossen werden, dass starke Mobilfunkfelder unter bestimmten Bedingungen Energiekonzentrationen im biologischen Gewebe (Hot Spots) erzeugen könnten, die ansatzweise gleiche Mechanismen bewirken. Nach heutigem Kenntnisstand sind solche Ereignisse bei Einhaltung der geltenden Grenzwerte aber ausgeschlossen. Die aktuelle Forschung zum Mobilfunk konzentriert sich vorwiegend jedoch auf offene Fragen zu möglichen nicht-thermischen Effekten im Zusammenhang mit biologischer Signalübertragung (Nervenleitung, Zellwachstum, interne zelluläre Signale), insbesondere der Beeinflussung von Erbinformationen.

Noch einmal hingewiesen sei darauf, dass es bei den Laserauswirkungen nur um thermische bzw. thermochemische oder fotochemische Auswirkungen geht. Im Hinblick auf eine Gefährdung durch Laserstrahlung ist also in erster Linie an die Augen zu denken. Diese sind zwar durchaus an wechselnde Umgebungsbedingungen gewöhnt, gegenüber konzentrierter optischer Strahlung, wie sie von einem Laser ausgehen kann, besitzt der Mensch aber nur eine sehr eingeschränkte Abwehrmöglichkeit, so dass ein System technischer und organisatorischer Maßnahmen eingeführt werden musste, um insbesondere Augenschäden zu vermeiden. Dazu gehört auch ein auf den Gefährdungsgrad bezogenes Klassifizierungssystem sowie – wenn nichts anderes mehr hilft – die Benutzung der richtigen Schutzbrille.

Was ist ein Laser

Die Geschichte des LASERs ist eng mit Albert EINSTEIN verknüpft, der 1917 die Theorie der induzierten bzw. stimulierten Emission kohärenten Lichtes entwickelte. Theodore MAIMAN setzte 1960 als Erster diese Theorie im optischen Bereich mit dem Bau eines blitzlampengepumpten Rubin-Lasers in die Tat um. Das Wort LASER selbst ist ein Akronym für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ und beschreibt damit den Prozess der „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“.

Für das Verständnis des Laserprinzips muss man sich drei elementare physikalische Effekte vergegenwärtigen, nämlich die Absorption, die spontane Emission und die stimulierte Emission.

Den Vorgang der Absorption kann man sich so vorstellen, dass man ein Photon mit einer „passenden“ Energie auf ein Mikrosystem, d. h. z. B. ein Atom oder Molekül, einfallen lässt, die gerade dem Abstand zweier quantenmechanisch erlaubter Energiewerte dieses Mikrosys-

tems entspricht. Wird dabei das Lichtquant vom System „absorbiert“, so erhöht sich dessen Energie, d. h. im Falle eines um einen Atomkern umlaufenden Elektrons gelangt dieses auf eine weiter außen liegende Bahn. Im Energieniveauschema bedeutet dies die Besetzung eines höheren Niveaus mit einem Elektron. Dieser Zustand bleibt aber nicht für alle Zeiten erhalten, sondern „zerfällt“ in der Regel durch Aussendung eines Photons. Dabei handelt es sich um einen zufälligen Prozess, der nach einer für das jeweilige System charakteristischen Zeit, der spontanen Lebensdauer, erfolgt. Zu dem ursprünglich absorbierten Photon besteht dabei weder eine Richtungs- noch eine Phasenbeziehung, lediglich die Frequenz des emittierten Photons entspricht derjenigen des absorbierten. Man bezeichnet daher diese spontane Emission auch als inkohärente Strahlung.

Darüber hinaus gibt es noch andere Möglichkeiten, wie der angeregte Zustand eines Mikrosystems wieder abgebaut werden kann.

Gelangt ein Photon mit einer Energie, die derjenigen des Abstandes zwischen 2 erlaubten Energieniveaus entspricht, in den Wechselwirkungsbereich eines angeregten Mikrosystems, so gibt es eine endliche Wahrscheinlichkeit dafür, dass dieses Photon die Emission eines weiteren, in Frequenz, Richtung und Phasenlage identischen Photons stimuliert, induziert bzw. erzwingt. Man spricht bei diesem kohärenten Prozess von der stimulierten Emission von Strahlung. Dabei befindet sich das betrachtete Mikrosystem nach dem Verlassen der zwei „kohärenten“ Photonen wieder in dem Zustand vor der Anregung.

Ähnlich wie zwei Schwalben aber noch keinen Sommer machen, so reichen natürlich auch zwei Photonen noch nicht, um das Laserprinzip darzustellen. Hierzu muss man sich z. B. einer so genannten Mehrniveaudarstellung zuwenden, die die „normale“ Besetzungsdichteverteilung bei einer bestimmten Temperatur des jeweils betrachteten Lasermediums widerspiegelt. Diese Normalverteilung

muss durch das so genannte „Pumpen“, d. h. durch geeignete Energiezufuhr, so verändert werden, dass sich zwischen den Energieniveaus eine solche Verteilung einstellt, wonach sich auf einer höheren Stufe mehr angeregte Zustände befinden als in einer darunter liegenden. Dies wird auch als Inversion bezeichnet.

Die daran anschließenden Vorgänge der stimulierten Emission, die sich aus der spontanen Emission ergeben können, muss man sich dann noch in einem abgegrenzten räumlichen Volumen vorstellen, und insbesondere entlang der so genannten optischen Achse des Systems, so dass die emittierten Photonen auf ihrem Weg weitere Stimulationsprozesse auslösen können und dabei eine Photonenlawine erzeugen. Koppelt man diesen Vorgang gewissermaßen in sich zurück, in dem man zwei Spiegel mit dem notwendigen Reflexionsgrad an den Enden des verstärkenden Mediums anbringt – also einen Resonator aufbaut –, so lässt sich damit ein Laserstrahl erzeugen, der das System aus einem teildurchlässigen Spiegel verlässt.

Die Norm definiert einen Laser als „jedes Gerät, das dazu benutzt werden kann, elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 180 nm bis 1 mm primär durch den Vorgang der kontrollierten stimulierten Emission zu erzeugen oder zu verstärken“ und Laserstrahlung als „jede elektromagnetische Strahlung zwischen 180 nm und 1 mm, die von einer Laser-Einrichtung emittiert wird und als Ergebnis kontrollierter stimulierter Emission entsteht“ (DIN EN 60825-1).

Im Sinne der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ werden unter Laser-einrichtungen Geräte, Anlagen oder Versuchsaufbauten verstanden, mit

denen Laserstrahlung erzeugt, übertragen oder angewendet wird. Dabei erstreckt sich der Wellenlängenbereich im Gegensatz zur Festlegung in der Norm auf den Bereich zwischen 100 nm und 1 mm, also auf das Gebiet, das üblicherweise der optischen Strahlung zugeordnet wird (BGV B2).

Laser werden heute insbesondere in der Materialbearbeitung, in der Mess- und Prüftechnik, im Bauwesen, in der Nachrichten- und Kommunikationstechnik, in der medizinischen Diagnostik und Therapie sowie in der Unterhaltungsindustrie und zu Vorführzwecken eingesetzt. Die Zahl der an Laser-Einrichtungen Beschäftigten und mit dem Betrieb von Lasern befassten Personen hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen.

Der Laserstrahl und seine Eigenschaften

Der „Laserstrahl“ liegt oft als ein „paralleles“ Strahlenbündel („gebündelter Strahl“) mit sehr geringer Winkeldivergenz oder -konvergenz vor, kann aber darüber hinaus durchaus auch mehr oder weniger stark divergent auftreten und damit hinsichtlich einer eventuellen Gefährdung auf die unmittelbare Umgebung seines beabsichtigten bzw. ungewollten Wirkortes beschränkt bleiben.

Genau genommen besitzt ein Laserstrahl eine ortsabhängige Strahlaufweitung und eine Intensitätsverteilung im Querschnitt, die von einer Profilkfunktion bestimmt ist, d. h. die Leistungsdichte ist über den Querschnitt nicht konstant. Es handelt sich beim Laserstrahl um eine transversale elektromagnetische Welle (TEM-Mode).

Der von einem Laser emittierte Strahl unterscheidet sich als elektromagnetische Wellenerscheinung von den beiden Spezialfällen, der ebenen und der Kugelwelle,

dadurch, dass es sich hierbei um eine transversale elektromagnetische Welle (TEM) handelt, die

- eine endliche Divergenz und
- eine transversale Intensitätsverteilung aufweist.

Bei der Beschreibung eines Laserstrahls kann man die Bereiche Nah- und Fernfeld unterscheiden. Die Grenze zwischen diesen Zonen wird durch die so genannte Rayleigh-Länge bestimmt. Dort hat sich der Strahldurchmesser auf den $\sqrt{2}$ -fachen Wert an der Taille vergrößert (**Abb. 1**).

Zwischen der Strahltaile (Tailenradius) w_0 und der Divergenz (voller Fernfeldöffnungswinkel) Θ_0 besteht der fundamentale Zusammenhang

$$\Theta_0 \cdot w_0 = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi}$$

d. h. eine kleine Strahltaile bedingt gleichzeitig eine große Divergenz und umgekehrt.

Gemäß der Definition bzw. Begriffsbestimmung kann es Laser im Wellenlängenbereich von 100 nm bzw. 180 nm bis 1 mm geben. In **Abb. 2** ist diesbezüglich eine Übersicht der wichtigsten technisch eingesetzten Lasertypen dargestellt. Dabei kann das so genannte aktive Medium, in dem die Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung erfolgt, entweder ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein fester Stoff sein. Darunter finden sich z. B. Helium-Neon (He:Ne)-Laser bei 632,8 nm mit Leistungen bis ca. 50 mW, Argon (Ar⁺)-Ionen-Laser mit Wellenlängen zwischen 351,1 nm bis 528,7 nm bei Leistungen bis ca. 20 W, Kohlendioxid (CO₂)-Laser bei 10,6 μ m im Leistungsbereich bis einige kW, Neodym-YAG (Nd:YAG)-Laser bei 1,064 μ m ebenfalls bis in den kW-Bereich.

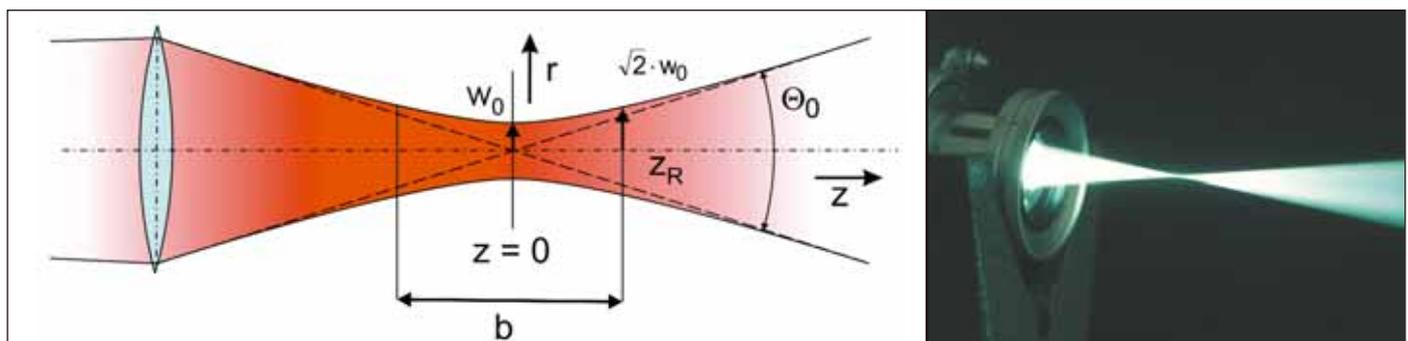


Abb. 1: Strahlverlauf als Funktion des Ortes z und des Radius r; z_R : = Rayleigh-Länge, Grenze zwischen Nah- und Fernfeld $z_R = \pi \cdot w_0^2 / \lambda$; $b = 2 z_R$; z : = Abstand von der Strahltaile bei $z = 0$; rechts: realer Strahlverlauf eines fokussierten Argon-Ionen-Laserstrahls

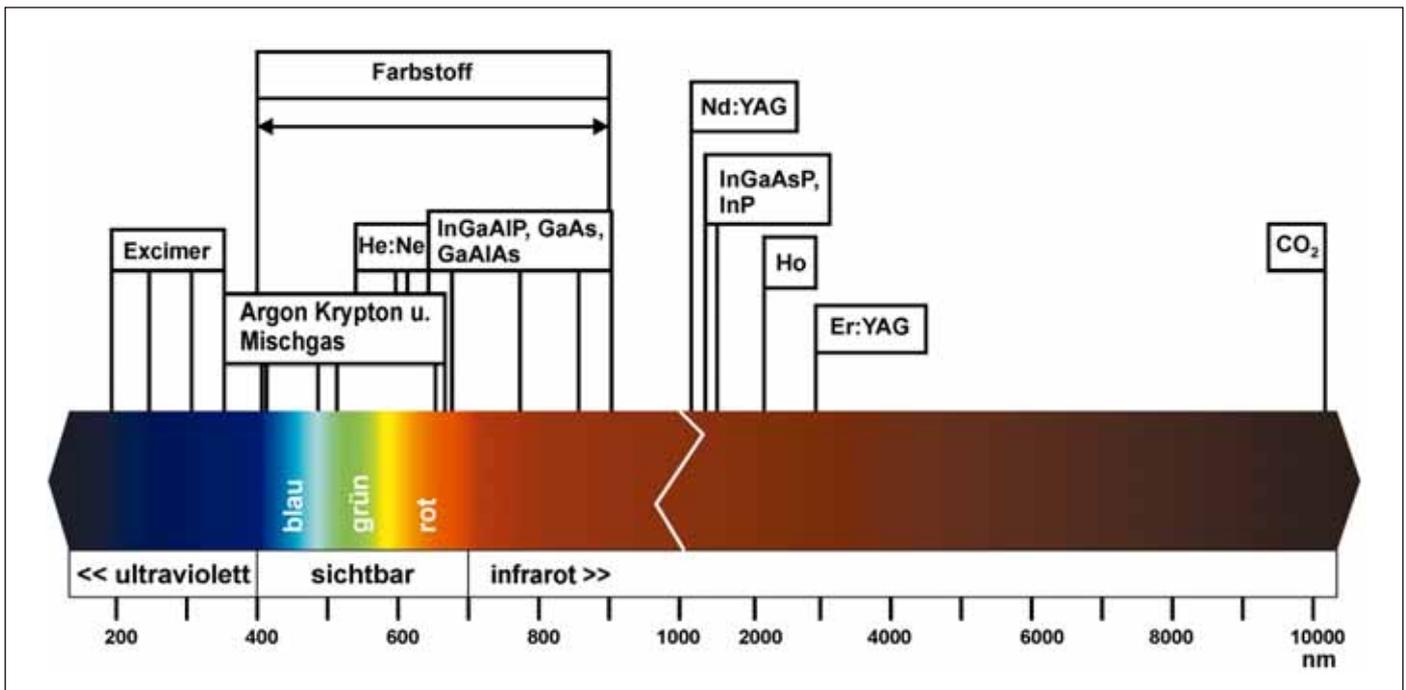


Abb. 2: Übersicht einiger Lasertypen nach Wellenlängen geordnet

reich sowie eine Vielzahl verschiedener Halbleiter-Laser, insbesondere im nahen Infrarot-Bereich.

Laserstrahlung zeichnet sich insbesondere durch:

- Monochromasie (Einfarbigkeit; Schmalbandigkeit),
- Kohärenz (zeitliche und räumliche feste Phasenbeziehungen der Wellen),
- kleine Strahldivergenz (Strahlbündel- und Fokussierbarkeit) sowie
- hohe Leistungs- bzw. Energiedichte aus.

Die Betriebsarten eines Lasers

Die Einteilung der Betriebsarten eines Lasers erfolgt aufgrund seiner Emissionsdauer. Darunter wird die zeitliche Dauer eines Impulses, eines Pulszuges oder einer Impulsfolge oder des Dauerbetriebes verstanden, während der der Zugang zu Laserstrahlung möglich ist, wenn die Laser-Einrichtung betrieben, gewartet oder instand gesetzt wird.

Die Ausgangsstrahlung eines Lasers kann also entweder kontinuierlich oder gepulst vorliegen. Wird ein Laser fortlaufend betrieben, spricht man vom Dauerstrichbetrieb (engl.: continuous wave – CW). In Regelungen und Normen wird ein Laser, der länger als 0,25 s andauernd strahlt, als Dauerstrich-Laser betrachtet.

Ein Impuls-Laser ist dagegen ein Laser, der seine Energie in Form eines Einzelimpulses oder einer Impulsfolge abgibt. Die zeitlichen Emissionen bestehen entweder jeweils aus einem einzelnen Impuls, wie z. B. bei einem Q-switch-Laser (gütegeschalteter Laser im Bereich von wenigen Nanosekunden Pulsdauer) oder einer Impulsfolge, wie z. B. bei einem Mode-Locking-Laser (schwingungstypengekoppelter Laser mit Pulsdauern im Bereich von wenigen Pikosekunden). In jedem Fall ist die Zeitdauer, d. h. das Zeitintervall zwischen den Halbwerten der Spitzenleistung in der ansteigenden und abfallenden Flanke eines Impulses, kleiner als 0,25 s. Allgemein kann man Laser nach ihrer Betriebsart gemäß **Tabelle 1** einteilen.

Im Dauerstrichbetrieb sind heute Leistungen im Bereich von wenigen mW bis zu einigen zehn kW erhältlich. Für eine Impulsfolge ist die Emissionsdauer die Zeitdauer zwischen dem ersten halben Spitzenwert des führenden Impulses und dem letzten halben Spitzenwert des abschließenden Impulses. Es können dabei Spitzenleistungen bis 10^{14} W (=0,1 Petawatt) erzielt werden.

Gefährdungen durch Laserstrahlung

Lasereinrichtungen können äußerst intensive, stark gebündelte Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichtes bzw. im infraroten oder ultravioletten Spektralbereich erzeugen. Durch fotochemische, thermische oder optomechanische

Laser-Betriebsart	Zeitdauer in s
Dauerstrichlaser (CW)	> 0,25
Impuls-Laser (Blitzlampen gepumpt)	10^{-6} bis 0,25
Riesenimpuls-Laser (Q-switch)	10^{-9} bis 10^{-6}
Modengekoppelter Impuls-Laser (Mode-Locking) oder Ultrakurzimpuls-Laser (Femtosekundenimpuls-Laser)	< 10^{-9}

Tabelle 1: Laserbetriebsarten und zugehörige Emissionsdauern

Wirkungen kann die Laserstrahlung Schäden erzeugen. In erster Linie besteht die Gefahr irreparabler Augenschäden.

In einen Laserstrahl kann man entweder unmittelbar gelangen oder aufgrund einer Reflexion. Dabei spricht man von einem direkten Blick in den Strahl bei allen Sehbedingungen, bei denen das Auge einem direkten oder einem spiegelnd reflektierten Laserstrahl ausgesetzt ist, und zwar im Gegensatz zur Betrachtung von z. B. diffusen Reflexionen. Dieser Unterscheidung kommt bei der Anwendung von Lasern insofern eine große Bedeutung zu, da Laser der Klasse 3B hinsichtlich idealer diffuser Reflexion als gerade noch nicht gefährlich eingestuft werden, und zwar solange der Strahlauftreffort nicht länger als 10 s aus einer Entfernung von nicht weniger als 13 cm betrachtet wird.

Besonders unerwartet kann man von einem Laserstrahl getroffen werden, wenn dies aufgrund einer Reflexion erfolgt. Man spricht dann von vagabundierender Laserstrahlung, d. h. von Laserstrahlung, die vom definierten Strahlengang abweicht. Zu dieser Art Strahlung gehören unerwünschte Reflexionen von Komponenten im Strahlengang, abgelenkte Strahlung durch falsch justierte oder beschädigte Komponenten und Reflexionen von einem Werkstück.

Spiegelnde Reflexion liegt dann vor, wenn die Korrelation zwischen dem einfallenden und dem reflektierten Laserstrahl („gebündelter Strahl“) aufrechterhalten bleibt. Dies ist z. B. der Fall bei der Reflexion an einem Spiegel oder an einer glänzenden Oberfläche.

Von diffuser Reflexion spricht man dagegen, wenn es zu einer Veränderung der räumlichen Verteilung eines Strahlbündels nach der Streuung in viele Richtungen durch eine Oberfläche oder eine Substanz kommt. Ein vollkommen diffus streuendes Material zerstört jede Korrelation zwischen den Richtungen der einfallenden und wieder austretenden Strahlung, kommt aber nur theoretisch vor, d. h. die in der Praxis auftretende Reflexion von Laserstrahlung ist oft eine Mischung und enthält Anteile sowohl von gerichteter als auch diffuser Reflexion. Für eine worst-case Betrachtung ist daher das eventuelle Vorliegen gerichteter bzw. spiegelnder Re-

flexion, die nach den Gesetzmäßigkeiten der Optik erfolgt, sicherlich die sicherste Betrachtungsweise und immer dann zu empfehlen, wenn man die jeweiligen Verhältnisse nicht genau genug kennt.

Die Wirkungen von Laserstrahlung auf biologisches Gewebe, insbesondere auf Auge und Haut

Die Wirkungen der Laserstrahlung auf biologisches Gewebe werden einerseits durch die „optischen“ Eigenschaften des Gewebes, wie z. B. Reflexion, Streuung und Absorption, und zum anderen durch die physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Lasers, wie dessen Wellenlänge und Impulswiederholfrequenz bestimmt.

Bei der Beurteilung bzw. Bewertung von Laserstrahlung in Bezug auf deren Wirkung auf den menschlichen Körper – und hier insbesondere auf die Augen und auf die Haut – kommt der Einwirkungsdauer eine große Bedeutung zu. Darunter versteht man die Zeitdauer eines Impulses, eines Pulszuges oder einer Impulsfolge oder der Daueremission von Laserstrahlung, die auf den menschlichen Körper einwirkt bzw. während derer Teile des menschlichen Körpers Laserstrahlung dauernd oder in einem gewissen zeitlichen Verlauf direkt oder als Folge von Streustrahlung ausgesetzt sind.

Diejenige Größe, die zur Beurteilung einer möglichen Wirkung von Laserstrahlung dient, ist entweder die Bestrahlungsstärke oder die Bestrahlung, je nachdem, welche Laserstrahl-Wirkungsrelation in dem jeweiligen Bereich des Zeit-Leistungs- bzw. Energieregimes zugrunde liegt. Die Bestrahlungsstärke ist der Quotient der Strahlungsleistung, die auf ein Flächenelement einfällt, geteilt durch die Fläche dieses Elements. Sie wird in der SI-Einheit Watt je Quadratmeter (W/m^2) bzw. Milliwatt je Quadratcentimeter (mW/cm^2) angegeben.

Die Bestrahlung an einem Punkt der Oberfläche des menschlichen Körpers ist der Quotient aus der Strahlungsenergie, die auf das Flächenelement trifft, das diesen Auftreffort enthält, und der Fläche dieses Elementes. Als deren SI-Einheit wird Joule je Quadratmeter (J/m^2) oder Millijoule je Quadratcentimeter (mJ/cm^2) benutzt.

Prinzipiell erfolgt die Wirkung von Laserstrahlung auf biologisches Gewebe wie auf anorganische Materie auch. Zusätzlich können sich allerdings noch spezifische Effekte bezüglich des zeitlichen Verlaufs und des Ausmaßes der Wirkung einstellen, die sich aus der Tatsache lebender Materie ergeben. An der Grenzfläche des biologischen Gewebes zur Umgebung wird ein Teil der Laserstrahlung reflektiert. Darüber hinaus wird insbesondere im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 1400 nm ein beträchtlicher Teil aus der Gewebeoberfläche rückgestreut. Schließlich wird die in das Gewebe eingedrungene Laserstrahlung dann entweder gestreut oder aber absorbiert.

Streuung tritt im sichtbaren Bereich und im IR-A entweder als Rayleigh-Streuung an Teilchen bzw. Strukturen auf, die klein gegen die Wellenlänge sind oder als Mie-Streuung, wenn die Streuteilchen bzw. -bereiche größere Abmessungen als die Wellenlänge besitzen. Im biologischen Gewebe kann von sehr vielen elementaren Streuprozessen ausgegangen werden, bis die Energie der Photonen der eindringenden Laserstrahlung im Gewebe entweder absorbiert, rückgestreut oder durchgelassen worden ist.

Da die Eindringtiefe von Laserstrahlung in biologisches Gewebe meist nicht allzu groß ist, wird Laserstrahlung im Allgemeinen schon in den oberen Gewebeschichten, d. h. im Millimeter-Bereich, so weit abgeschwächt bzw. absorbiert, dass sie in den darunter liegenden Schichten keine Reaktionen mehr hervorrufen kann.

Absorption von Laserstrahlung in biologischem Gewebe bzw. in seinen Bestandteilen erfolgt im UV-Bereich überwiegend als Elektronenanregung und im IR-Bereich überwiegend als Anregung von Molekülschwingungen. Hierdurch kommt es zu einer Temperaturerhöhung des betreffenden Gewebes.

Wasser, Hämoglobin und Melanin sind für die sehr hohe Absorption der Laserstrahlung im Gewebe bei Wellenlängen unterhalb von ca. 300 nm verantwortlich. Während im sichtbaren Bereich der Farbstoff Hämoglobin bei der Absorption überwiegt, nimmt die Absorption durch Wasser ab etwa 700 nm zum ferneren Infrarot hin ständig zu und weist bei ca. 3 μm und ca. 6 μm ausgesprochene Maxi-

ma auf, d. h. dort ist die Eindringtiefe der Laserstrahlung besonders gering.

Die meisten vom Laser verursachten Schäden gehen auf die übermäßige Erwärmung des Gewebes zurück, das die Laserstrahlung absorbiert. Ein damit verbundener thermischer Schaden bleibt daher auf einen Bereich um die Stelle beschränkt, an der die Laserenergie absorbiert wurde.

Neben der im Gewebe absorbierten optischen Energie bestimmt die Einwirkungs-dauer wesentlich die nachfolgenden Gewebereaktionen. Thermochemische Reaktionen und Effekte, die durch die Wärmeleitung verursacht werden, entstehen sowohl während des Aufheizens als auch während der Abkühlungsphase, wodurch sich eine Abhängigkeit der Ausdehnung und des Grades des thermischen Schadens vom Laserstrahldurchmesser an der Auftreffstelle ergibt. Trifft ein Laserstrahl eines CW-Lasers oder eines solchen, der lange Impulse emittiert, auf Gewebe, dann vergrößert sich als Folge der Wärmeleitung zunehmend das Gebiet, in dem eine erhöhte Temperatur herrscht.

Aus der jeweiligen Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) bzw. Energiedichte (Bestrahlung) und der Einwirkungs-dauer ergibt sich ein breites Spektrum von Wirkungen im biologischen Gewebe, das von fotochemischen über fothermische bis zu fotoionisierenden (fotophysikalischen) Prozessen reicht.

Durch Laserstrahlung mit Leistungsdichten unterhalb von 1 W/cm^2 und für bestimmte Wellenlängen (relativ kurzzeitige mehrfach wiederholte oder längere Einwirkung mit ultravioletter Strahlung oder durch kurzweilige sichtbare Laserstrahlung relativ geringer Leistungsdichte) können auf der Haut reversible Prozesse wie Foto-Stimulation oder fotochemische Reaktionen hervorgerufen werden, wenn die Bestrahlungsdauer größer als ca. 1 s ist.

Dabei entsteht eine spezifische Absorption der Laserstrahlung durch Moleküle. Anstatt die Energie freizusetzen, findet im Gewebe eine chemische Reaktion statt. Diese photochemische Reaktion wird verantwortlich für Schäden bei niedriger Bestrahlungsstärke gemacht. Auf Grund dieses Mechanismus kann es bei einigen

Geweben, wie in der Haut, der Linse des Auges und insbesondere in der Netzhaut, zu irreversiblen Veränderungen kommen. Eine Fleckgrößenabhängigkeit, wie sie auf Grund der Wärmeleitung bei den thermischen Wirkungen auftritt, gibt es bei fotochemischen Wirkungen nicht.

Bei Leistungsdichten im Bereich von ca. 10 W/cm^2 bis 10^5 W/cm^2 und bei Bestrahlungsdauern von Millisekunden bis zu einigen Sekunden erwärmt sich das Gewebe. Es kann dabei denaturieren, d. h. Eiweiß koaguliert (gerinnt) und Zellen werden nekrotisch (Zelltod). Erreicht die Temperatur Werte über $100 \text{ }^\circ\text{C}$ verdampft zunächst die Gewebeflüssigkeit und es kann zur Vaporisation kommen.

Infolge der thermischen Relaxationszeiten der Gewebe können mit kleineren Impulsdauern im Gewebe so genannte nicht-thermische Prozesse (z. B. Fotoablation, Fotodisruption) hervorgerufen werden. Die thermischen Zeitkonstanten hängen dabei auch von der Größe der bestrahlten Fläche ab und liegen zwischen etwa $15 \mu\text{s}$ und 10 s .

So kommt es im Bereich von 10^6 W/cm^2 bis 10^{10} W/cm^2 und bei Bestrahlungsdauern im μs -Bereich und darunter zur Abtragung von Gewebe mit nahezu keiner oder minimaler thermischer Belastung des umliegenden Gewebes. In dem getroffenen Gewebe steigt dabei die Temperatur so schnell an, dass die flüssigen Bestandteile der Zellen in Gas umgewandelt werden. Bei noch kürzerer Einwirkungs-dauer und bei Leistungsdichten bis zu 10^{12} W/cm^2 entsteht ein so genannter optischer Durchbruch, d. h. die elektrischen Feldstärken im Einwirkungsbereich der Laserstrahlung sind mit 10^6 V/cm bis 10^8 V/cm in der Größenordnung der atomaren bzw. intramolekularen Coulombfelder. Dadurch entsteht ein Mikroplasma im Gewebe. Die Expansion dieses Mikroplasmas bewirkt einen akustischen Druckimpuls (Stoßwelle). Über die Wirkung von Ultrakurzpulsen liegen ebenfalls erste Berichte vor (Brose et al., 2003).

(Weitergehende Erläuterungen zu den verschiedenen Wirkungen von Laserstrahlen finden sich u. a. in Leitfaden Laserstrahlung, DIN EN 60825-1, SSK 2000).

Gefährdungen der Augen

Die Augen sind in besonderem Maße der Aufgabe angepasst, sichtbare optische Strahlung, d. h. solche zwischen 400 nm und 700 nm , zu empfangen. Da Laserstrahlung aber zwischen 400 nm und 1400 nm , also im sichtbaren Bereich und im angrenzenden nahen Infrarot (IR-A), bis zur Netzhaut gelangt, ist diese in diesem Wellenlängenbereich besonders gefährdet. Die Gefährdung des Auges, und zwar insbesondere der Netzhaut (Retina) und der darunter liegenden stark pigmentierten, dünnen Gewebeschicht (retinales Pigmentepithel, RPE), hat ihre Ursache außer in der Transmission der Augenmedien in der durch die Augenoptik verursachten Erhöhung der Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut im Vergleich zu derjenigen auf der Hornhaut. Die Zunahme der Bestrahlungsstärke von der Hornhaut bis zur Netzhaut ist etwa gleich dem Verhältnis der Pupillenfläche zur Fläche des Bildes auf der Netzhaut. Während die Pupille einen maximalen Durchmesser von ca. 7 mm bis 8 mm erreichen kann, entspricht das Netzhautbild im Fall eines gut kollimierten Strahls nahezu einem beugungsbegrenzten Fleck von nur etwa $10 \mu\text{m}$ bis $20 \mu\text{m}$ Durchmesser, wobei die Gefährdung fast unabhängig vom Abstand zwischen der Laserstrahlquelle und dem Auge ist. Deshalb kann die Bestrahlungsstärke zwischen Hornhaut und Netzhaut um einen Faktor von $1,2 \cdot 10^5$ bis $5 \cdot 10^5$ steigen. Bei einer Zunahme um den Faktor $5 \cdot 10^5$ erhöht sich die Bestrahlungsstärke daher von z. B. 25 W/m^2 auf der Hornhaut, auf einen Wert von $1,25 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ auf der Netzhaut. Dabei werden 25 W/m^2 oder $2,5 \text{ mW/cm}^2$ bereits bei einem Laserstrahl mit 1 mW Leistung in einem Durchmesser von 7 mm erreicht.

Zwar bleiben nur ca. 5 % der Laserstrahlleistung in den Sehpigmenten der Stäbchen und Zapfen stecken, während der überwiegende Teil vom Farbstoff der unter der Netzhaut liegenden Pigmentepithelschicht absorbiert wird, aber eine damit verbundene lokale Erwärmung kann über Verbrennungen dieser Zellen auch zu irreversiblen Schädigungen der darüber liegenden Sehzellen führen. Solche Ereignisse können mit erheblichen Beeinträchtigungen des Sehvermögens verbunden sein.

Das Spektrum der Schädigungen der Netzhaut reicht von kaum feststellbaren, kleinsten Veränderungen über Ödeme, Koagulationen und Verbrennungen bis hin zum Austreten von massiven, ausgedehnten Blutungen in den Glaskörper.

Laserstrahlung bei Wellenlängen unterhalb von 300 nm und oberhalb von 3000 nm wird vorwiegend in der Hornhaut absorbiert, während Laserstrahlung zwischen 300 nm und 3000 nm, wenn sie nicht bis zur Netzhaut gelangt, so doch mehr oder weniger tief in die Linse oder in den Glaskörper eindringt und damit insbesondere die Hornhaut und eventuell die Augenlinse schädigen kann.

Bei den Schädigungen im Ultraviolettbereich handelt es sich vorwiegend um Fotokeratitis, also eine Hornhaut-Trübung, die meist mit einer Bindehautentzündung (Fotokonjunktivitis) verbunden ist. Im sichtbaren Spektralbereich sind insbesondere zwei Wirkmechanismen für eine Schädigung verantwortlich. So besitzt die Wirkungsfunktion photochemischer Prozesse im kurzwelligen Teil im Bereich von 435 nm bis 440 nm ein Maximum, während im langwelligeren Teil die thermische Wirkung für einen Schaden auf der Netzhaut maßgeblich ist. Anders als bei dem thermischen Schädigungsmechanismus sind die Schwellenwerte für eine photochemische Schädigung stark von der Wellenlänge und der Bestrahlungs-„dosis“ abhängig, d. h. die Schwellenwerte nehmen umgekehrt proportional mit der Verlängerung der Einwirkungsdauer ab.

Infrarotstrahlung wirkt, außer bei Impulsen kleiner Bestrahlungsdauer, rein thermisch, wobei aber für den Ort maximaler Wirkung noch die wellenlängenabhängige Absorption berücksichtigt werden muss. Da Strahlung mit Wellenlängen oberhalb von ca. 1200 nm zunehmend vom Wasser in den vorderen Augenmedien absorbiert wird, erreicht nur noch wenig Strahlung die Netzhaut, d. h. außer Netzhautläsionen treten vermehrt Schäden in der Iris und in der Linse auf.

Theoretisch ist die Annahme einer Augenschädigung gerechtfertigt, wenn erstens eine Bestrahlung mit Laserstrahlung erfolgt ist und zweitens die MZB-Werte (maximal zulässige Bestrahlung) dabei überschritten worden sein können.

Gefährdungen der Haut

Die Haut kann insbesondere zwischen 400 nm und 1400 nm wesentlich größere Bestrahlungswerte verkraften als das Auge, da erstens ein Teil der einfallenden Laserstrahlung reflektiert wird und zweitens – was noch wichtiger ist – die Haut keine fokussierenden Eigenschaften hat. Die biologische Wirkung der Bestrahlung der Haut mit Laserstrahlung im UV-, sichtbaren - und im IR-Wellenlängenbereich kann wie auch der von Sonnenlicht entsprechend der Leistungsdichte und der Einwirkungsdauer zwischen derjenigen eines schwachen Sonnenbrandes (Erythem, Verbrennung 1. Grades) bis zu Verbrennungen 3. Grades führen.

Im Allgemeinen heilen Schäden an der Haut, die eine Folge einer Überexposition mit Laserstrahlung sind, gut aus, soweit sie nicht aus dem UV-Bereich stammen. Detailliertere Darstellungen der Wirkungen von Laserstrahlungen finden sich z. B. in der Lasersicherheitsnorm und in anderen Abhandlungen (DIN EN 60825-1, Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“ Laserstrahlung).

Relevanz für Mobilfunk-Anwendungen

Das Frequenzspektrum für Funkanwendungen endet dort, wo Laserwellenlängen beginnen (300 GHz bzw. 1 mm). Anders als der Laser arbeitet Mobilfunk nicht im sensiblen (Sicht-) Bereich des Auges und wird dort entsprechend keine optischen, fokussierenden Wirkungen hervorrufen. Ebenfalls anders als Laserstrahlen sind Mobilfunkfelder selbst auch nicht stark fokussiert, so dass die Strahlungsenergie nicht auf kleine Einwirkungsflächen gebündelt wird. Dennoch ist theoretisch nicht ausgeschlossen, dass auch starke Mobilfunkfelder unter bestimmten Bedingungen Energiekonzentrationen im biologischen Gewebe (Hot Spots) erzeugen könnten, die ansatzweise gleiche Mechanismen bewirken. Nach heutigem Kenntnisstand sind solche Ereignisse bei Einhaltung der geltenden Grenzwerte ausgeschlossen. Noch einmal hingewiesen sei hier darauf, dass es bei den Laserauswirkungen nur um thermische bzw. thermochemische oder fotochemische Auswirkungen geht. Die aktuelle Forschung zum Mobilfunk konzentriert sich vorwiegend jedoch auf offene Fragen zu möglichen nichtthermischen Effekten im Zusammenhang mit biologischer Signalübertragung (Nervenleitung, Zellwachs-

tum, interne zelluläre Signale), insbesondere der Beeinflussung von Erbinformationen.

Literatur

BGV B 2:
Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ v. 1.4.1988 idF v. 1.1.1997 m. Durchführungsanweisungen v. Okt. 1995

Brose, M; Ludwig, T; Püster, T.:
Ultrakurzpuls-Laser: Anwendungen, Risiken, Sicherheitsmaßnahmen;
Strahlenschutzpraxis H.2 (2004), 34 – 43

DIN EN 60825-1(VDE 0837 Teil 1):
2003-10:
Sicherheit von Laser- Einrichtungen; Teil 1:
Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen, Benutzer-Richtlinien, (Einschließlich Änderung A1:2002 + A2:2001) (IEC 60825-1:1993 + A1:1997 + A2:2001) (IEC 60825-1:2001); Deutsche Fassung EN 60825-1:2001.

Brose, M; Brüggemeyer, H.; Kreutz, E.W.; Ott, G.; Reidenbach, H.-D.; Sutter, S.,
Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“, Laserstrahlung, Fachverband für Strahlenschutz e. V., FS-05-133-AKNIR, 25.02.2005

SSK:
Gefahren bei Laseranwendung an der menschlichen Haut, Empfehlung der Strahlenschutzkommission; verabschiedet in der 169. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 31. Oktober 2000.

2.2.4 Gepulste Felder außerhalb des RF-Frequenzbandes, zweites Beispiel: Das Stroboskop

Fred-Jürgen Breit

Der Vollständigkeit halber soll noch ein jedem bekanntes Beispiel knapp behandelt werden.

Ein Stroboskop ist ein Gerät, das optische Impulsfolgen erzeugt. Hierbei ist die Funktionsweise entweder die periodische Unterbrechung oder Intensitätsänderung eines Lichtbündels durch Bedeckung (Blendenverfahren) oder durch Beleuchtung (Lichtblitzverfahren).

Es sollen drei bekannte Anwendungstypen betrachtet werden. Die erste Anwendung diente einem frühen Vorläufer der Filmtechnik. Dabei wurden Bildfolgen auf einer Trommel von innen jeweils kurzzeitig über einen Schlitz beleuchtet, der jedem Bild zugeordnet war. Bei hinreichender Geschwindigkeit ergab sich die Illusion von bewegten Bildern.

Für ein Messgerät nutzt(e) man den entgegengesetzten Effekt aus. Durch eine sich drehende Lochscheibe (oder heute eher durch einen periodischen Lichtblitz) wird Licht auf ein ebenfalls rotierendes Teil geworfen. Bei synchronem Betrieb wird immer dieselbe Stelle beleuchtet. Dies dient zur Kontrolle (Einstellung) oder Messung einer Drehzahl, vorausgesetzt ist dabei natürlich, dass die Frequenz des Messgeräts genau bekannt ist. Dreht sich der Prüfling etwas schneller, so bemerkt man die Voreilung, im entgegengesetzten Fall das Zurückbleiben. (Ein ungewollter Effekt ergibt sich im Film bei der Wiedergabe der Drehung von Speichenrädern durch abweichende Drehzahl und Bildfolgefrequenz: sie scheinen sich oft in die „falsche“ Richtung zu drehen).

Bekannte praktische Anwendungen sind im Bereich des Autos die Zündzeiteinstellung und beim Plattenspieler die Drehzahleinstellung (meist 33 oder 45 Touren), im letzteren Fall durch Beleuchtung einer entsprechend markierten Scheibe auf dem Plattenteller oder der Marken am Teilerumfang mit einer in 50 Hz flimmern- den Lampe.

Weit verbreitet dürfte heute das Lichtblitzverfahren sein, das dazu dient, schnelle Bewegungen (z.B. im Sport oder in der Natur) für fotografische Aufnahmen zu zerlegen. Man erreicht mit elek-

tronischen Blitzen Dauern weit unterhalb $1 \mu\text{s}$ mit Wiederholraten über 150.000 pro Minute (2500/s). Ein beeindruckendes Anwendungsbeispiel ist die fotografische Aufnahme einer abgeschossenen Pistolenkugel. (Beim Modell P1/P38 hat man es mit einer Mündungsgeschwindigkeit von 356 m/s zu tun.)

Etwas andere Anforderungen werden an Stroboskope für Showeffekte gestellt, weil sie eine bewegte Szene beleuchten sollen. Durch entsprechende Einstellung von Blitzdauer und Wiederholfrequenz erscheinen Bewegungen gewollt ruckartig, die kontinuierliche Bewegung wird in Einzelbilder aufgelöst. Allerdings kann der abrupte Lichtwechsel für Betrachter anstrengend oder auch unangenehm bis lästig sein.

Neben diesen gewollten Effekten sind aber auch akute gesundheitliche Auswirkungen möglich (siehe dazu Abschnitt 3.1.4 in diesem Buch). Bei der Epilepsie (griech. für Fallsucht) gilt Flackerlicht als möglicher äußerer Auslöser eines Anfalls. Dies ist nicht nur auf regelmäßige und starke Blitze eines Stroboskops (z.B. in einer Diskothek) oder den Lichtwechsel dort durch eine so genannte Lichtorgel beschränkt, sondern es werden auch Lichteffekte von Monitoren (bei Fernsehen oder Videospiele) genannt. Darüber hinaus werden Betroffene sogar vor schnellem Lichtwechsel im Auto durch die tief stehende Sonne gewarnt, deren direktes Licht durch Baumreihen unterbrochen wird. Personen, die an dieser Form der Epilepsie leiden, müssen solche Situationen meiden.

Oft lässt sich diese Fotosensibilität durch ein EEG (Elektroenzephalogramm) erkennen. Hierzu setzt man den Patienten

während der Aufnahme des EEG auch dem Lichtwechsel eines Stroboskops aus. Außerhalb der Anfälle können dann so genannte Krampfpotenziale sichtbar werden.

Einen deutlichen Schritt weiter gehen Leute, die diese bekannten optischen Effekte analog für gepulste elektromagnetische Felder im Frequenzbereich der Mikrowellen „befürchten“. Einerseits ist die Frage offen, ob es – von der Frequenz ganz abgesehen – hinreichende Ähnlichkeiten in der Kurvenform zu denen des Stroboskops geben kann, andererseits sind bisher nur ganz wenige gezielte Untersuchungen mit gepulsten HF-Feldern zur Epilepsie bekannt. Das EMF-Portal der FEMU-Datenbank* (Erforschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit) der RWTH Aachen listet zum Stichwort „Epilepsie“ sieben Untersuchungen auf, von denen vier epidemiologischer Art sind. Zwei der übrigen wenden gezielt GSM-ähnliche Exposition an und untersuchen akustisch evozierte Potenziale beim Menschen; in beiden Fällen sieht sich dieselbe Forschergruppe nicht in der Lage, auf eine gesundheitliche Wirkung zu schließen.

*) Zugang: www.emf-portal.de

2.3 Vorsorglicher Personenschutz

Ein wichtiger Aspekt bei der Anwendung jeglicher Techniken ist der der Personensicherheit. Das gilt natürlich auch für die Hochfrequenztechnik. Hier wird der Schutz von Personen durch die Festlegung von Grenzwerten sichergestellt. Dabei werden Obergrenzen für elektrische Felder oder deren biologische Wirkungen so festgelegt, dass eine gesundheitliche Beeinträchtigung von Personen ausgeschlossen ist. Dieses Kapitel stellt zunächst die heutigen Festlegungen und die historische Entwicklung der Personenschutzgrenzwerte dar.

Anschließend wird das Projekt „miniWatt“ beschrieben, das sich mit der Emission von elektromagnetischen Wellen und Feldern beschäftigt. Es erfasst zunächst die Immissionen in die Umwelt und untersucht schließlich Minimierungsmöglichkeiten der vorhandenen Emissionen unter Einsatz alternativer Techniken.

Seit Beginn der 90er Jahre bestimmt die Entwicklung der individuellen mobilen Kommunikation in immer stärker werdendem Maße unser Kommunikationsverhalten, Immissionen im Privatbereich durch Produkte der persönlichen Kommunikation wie DECT, WLAN, Bluetooth usw. nehmen stetig zu. Aus diesem Grund wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) von Januar 2002 bis März 2003 das Vorhaben „Alter-

native Funkssysteme mit minimaler Strahlungsleistungsdichte im digitalen Rundfunk, Mobilfunk und drahtlosen LANs“ (kurz: miniWatt) initiiert und finanziert. Ziel des Vorhabens war es, ein ideales System zu entwerfen, welches eine maximal sichere Datenübertragung bei minimaler Leistung erlaubt. Dazu war eine umfassende Untersuchung des Potenzials zur Senkung der Exposition durch technische, strukturelle und organisatorische Maßnahmen beim digitalen Rundfunk, dem Mobilfunk und den WLANs notwendig.

Nun – anknüpfend an die Ergebnisse des Vorhabens miniWatt – werden seit April 2005 systematisch Leistungsdichten, SAR und die Pulshaltigkeiten der verschiedensten Dienste analysiert und verglichen. Das laufende Vorhaben erhielt den Titel „Minimierung der Immission zukünftiger Funkdienste“ (kurz: miniWatt II) und wird gemeinsam vom BMBF und BMU (Bundesministerium für Umwelt) gefördert. Im Gegensatz zum abgeschlossenen Vorhaben miniWatt, soll das Hauptaugenmerk nun auf die Immission gerichtet sein. Die Ergebnisse können u.a. einen wichtigen Beitrag zur immissionsoptimierten Funknetzplanung liefern. Des Weiteren soll die Geräteindustrie in die Lage versetzt werden, ganzheitlich optimierte Lösungen zur Senkung der (Gesamt-) Exposition umzusetzen.

Anschließend wird am Beispiel der Magnetresonanztomografie beschrieben, wie man in einem Sicherheitskonzept von Schutzziele für Zielgruppen ausgeht, für diese Ziele Kriterien formuliert und daraus Maßnahmen ableitet, die Grenzwerte und/oder Hilfsmittel sein können. Dabei geht ein Beratergremium von allen verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen aus, bewertet sie und zieht daraus Schlüsse, die in Empfehlungen an das verantwortliche Ministerium münden. In Deutschland ist das Beratergremium die Strahlenschutzkommission, die vom BMU berufen wird; international bildet die ICNIRP das Beratergremium für die WHO.

Wie die Magnetresonanztomografie funktioniert, die sich inzwischen zu einem vielseitigen Bildgebungsverfahren in der medizinischen Diagnostik entwickelt hat, ist im Anhang A7 dieses Bandes beschrieben.

2.3.1 Schutz und Sicherheit

Volker Bökelmann, Fred-Jürgen Breit, Peter Hartmann, Ralf Köper,
Regina Reichardt

Der Schutz der Bevölkerung vor möglichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder aus Sendeanlagen wird sichergestellt durch die Festlegung und Einhaltung von Grenzwerten, die in Deutschland durch Rechtsverordnungen verbindlich gemacht worden sind. Für die strikte Einhaltung der internationalen und nationalen Standards sind staatliche Institutionen verantwortlich. Bei der Allgemeinbevölkerung ist dies der Umweltminister zusammen mit dem Gesundheitsminister, im Arbeitsschutz tritt der Arbeitsminister an die Stelle des Umweltministers. Von den Betreibern ist die Einhaltung der Obergrenzen der Immissionen rechnerisch oder messtechnisch nachzuweisen. Die Bundesnetzagentur wacht durch eigene Aktivitäten über die Einhaltung und bietet der Öffentlichkeit Informationen über die örtliche Exposition an.

Zum Schutz der Bevölkerung vor möglichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder werden Obergrenzen für die Felder selbst oder für deren biologische Wirkung im menschlichen Körper festgelegt. Grundsätzlich erfolgt dabei zunächst die Festlegung einer Wirkungsschwelle für bekannte biologische Effekte. Diese basiert auf dem jeweils aktuellen medizinisch-biologischen Kenntnisstand. Zusätzlich werden Sicherheitsfaktoren definiert, die den Unsicherheiten im Kenntnisstand Rechnung tragen.

Heute basieren die meisten Grenzwertfestlegungen auf den Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) aus dem Jahr 1998 [1]. ICNIRP empfiehlt im Frequenzbereich 100 kHz – 10 GHz als Basisgrenzwerte für die allgemeine Bevölkerung einen Ganzkörper-SAR-Wert ($SAR = \text{spezifische Absorptionsrate}$) von 0,08 W/kg, gemittelt über 6-Minuten-Intervalle und über den gesamten Körper, sowie einen Teilkörper-SAR-Wert von 2 W/kg, gemittelt über 6-Minuten-Intervalle und über 10 g Gewebe. Für die berufliche Exposition gelten fünfmal so hohe Grenzwerte. Bei der SAR handelt es sich physikalisch um eine Leistungsaufnahme pro Masse. Zusätzlich sind in der Praxis leichter bestimmbare „abgeleitete“ Feldstärkegrenzwerte festgelegt.

Diese Werteempfehlung hat auch die deutsche Strahlenschutzkommission als Beratergremium des Bundesumweltministers in ihrer Empfehlung vom 4. Juli 2001 übernommen. Sie bestätigt darin das Schutzkonzept der ICNIRP. Eine allgemeinverständliche Beschreibung der

Grenzwertfindung kann man z.B. in [2] und [3] nachlesen. Im Wesentlichen gelten diese Empfehlungen noch heute, sie werden durch die verantwortlichen Strahlenschutzgremien allerdings fortwährend anhand des aktuellen Forschungsstandes überprüft.

Die so festgelegten Grenzwerte haben Eingang in die deutsche und europäische Gesetzgebung gefunden. Die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutz-Gesetzes (26. BImSchV) schreibt unter anderem Feldstärkegrenzwerte für den Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern vor.

Zur Überwachung von ortsfesten Funkanlagen verweist die Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) aus dem Jahr 2002 sowohl auf die Grenzwerte der 26. BImSchV als auch auf die Empfehlung des Rates 1999/519/EG zur Begrenzung der Expositionen der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern. Nach dieser Rechtsvorschrift legt die Bundesnetzagentur zu ortsfesten Funkanlagen einzuhaltende Sicherheitsabstände fest.

Auf der Endgeräteseite, die dem Benutzer näher liegt, wird der Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern auf der Grundlage der europäischen Richtlinie 1999/519/EG gewährleistet, die die Empfehlungen der ICNIRP umsetzt. Die Richtlinie 1999/5/EG (R&TTE-Richtlinie) regelt das Inverkehrbringen und die Inbetriebnahme von Funkanlagen und Telekommunikationsendeinrichtungen. Damit dürfen in der europäischen Union nur Geräte in Verkehr gebracht werden, die

den Anforderungen dieser Richtlinie und damit auch den Personenschutzgrenzwerten genügen. In Deutschland ist die R&TTE-Richtlinie im Gesetz über Funkanlagen und Telekommunikationsendeinrichtungen umgesetzt.

Die Prüfung der Konformität von Endgeräten erfolgt gegen die Basisgrenzwerte. Die Vereinfachung des Nachweises der Grenzwerteinhaltung mit Hilfe der abgeleiteten Grenzwerte ist hier nicht möglich, da der Nutzer sich typischerweise im Nahfeld der Sendeantenne befindet. Es gibt eine Rückwirkung durch die Anwesenheit des Nutzers auf die Sendecharakteristik mit der Folge, dass die absorbierte Energie nicht unmittelbar aus der Freiraumfeldstärke berechenbar ist. Stattdessen muss mit Hilfe eines Körperphantoms, dessen elektrische Eigenschaften dem Körpergewebe entsprechen, sowie einer miniaturisierten Feldsonde der SAR-Wert direkt gemessen werden.

Schon bei Standardisierung und später bei Entwicklung und Konstruktion von Endgeräten werden entsprechende Sicherheits- und Schutzmaßnahmen getroffen, indem Strahlungsdichten und -leistungen durch bauliche Maßnahmen entsprechend niedrig gehalten bzw. Streustrahlungen und Leckquellen vermieden werden.

Bereits vor den genannten aktuellen Grenzwertempfehlungen und deren Umsetzung war für den Schutz von Personen gesorgt. Zu nennen sind die von der WHO/IRPA veröffentlichten „Umwelt-Gesundheitskriterien“ (veröffentlicht Genf 1992), die für den Hochfrequenzbereich

die gleichen Empfehlungen aussprachen wie die ICNIRP später. Diese Empfehlung hatte die deutsche Strahlenschutzkommission in ihrer Empfehlung vom 19. Dezember 1991 übernommen.

Vor Inkrafttreten der 26. BImSchV erfolgte die Umsetzung der Empfehlungen in der deutschen Normenreihe DIN VDE 0848, die neben den genannten Grenzwerten auch Mess- und Additionsverfahren für mehrere Frequenzen beschreibt. Durch den Beginn der Normungsarbeit auf europäischer Ebene musste das nationale Verfahren eingefroren werden, so dass der Entwurf nicht in eine endgültige Norm überführt werden konnte, gleichwohl wurde er für verbindlich erklärt.

Das damalige Bundesamt für Post und Telekommunikation (BAPT) und später die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP), Vorläufer der heutigen Bundesnetzagentur (BNetzA), führten bereits in den Jahren 1996/1997 und 1999/2000 zwei große EMF-Messreihen durch. Umfassten die Messreihen im Frequenzbereich von 9 Kilohertz bis 3 Gigahertz anfangs 1075 Feldstärkemessungen, wurden diese später in enger Kooperation mit den Umweltministerien der Länder auf 2000 jährliche Messungen erweitert.

Die Ergebnisse aller Messreihen zeigen, dass die Grenzwerte zum Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern deutlich unterschritten werden. Oftmals wird der zulässige Grenzwert noch nicht einmal zu 1 Prozent ausgeschöpft. Sämtliche Messergebnisse sind in der EMF-Datenbank der BNetzA veröffentlicht und können über ein Geografisches Informationssystem ortsbezogen aufgerufen werden (<http://emf.bundesnetzagentur.de>).

Neben dem Personenschutz bei direkter Absorption eines elektromagnetischen Feldes durch den menschlichen Körper müssen aber auch Störungen elektrischer und elektronischer Geräte berücksichtigt werden, die dadurch indirekte Wirkungen auf Personen zur Folge haben können. In diesem rein technischen Bereich gilt das allgemeine Ziel der elektromagnetischen Verträglichkeit. Im deutschen EMV-Gesetz von 1998 ist es unter § 2 Pkt. 9 so formuliert: Geräte müssen die Fähigkeit besitzen, „in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umwelt vorhandene Geräte unannehmbar wären.“ Anders als im unmittelbaren Personenschutz ist hier also sowohl die aktive Aussendung elektromagnetischer Felder als auch die passive Störfestigkeit gegen äußere Felder zu berücksichtigen. Je nach Einsatzzweck des betreffenden elektrischen Gerätes (Gewerbebereich, Haushalt, medizinische Anwendung) existieren Normen für die Störfestigkeit, denen die Geräte für die Gewährleistung eines störungsfreien Betriebes genügen müssen. Mit Inkrafttreten des Gesetzes über Funkanlagen und Telekommunikationsendeinrichtungen (FTEG) am 31.01.2001 sind die Anforderungen des Personenschutzes und der elektromagnetischen Verträglichkeit von Endgeräten und Funkbasisstationen geregelt.

Literatur

- [1] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electro-magnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74,4(1998)494-522
- [2] Norbert Leitgeb, Machen elektromagnetische Felder krank?, Springer-Verlag Wien 2000
- [3] Nimtz und Mäcker, Elektromog, BI-Taschenbuch, Mannheim 1994

2.3.2 Neue Technologien: Das Vorhaben miniWatt

Michael Baldauf, Werner Sörgel, Werner Wiesbeck

Seit den 90er Jahren bestimmt die individuelle mobile Kommunikation in starkem Maße unser Kommunikationsverhalten. Neben Quellen, denen die Bevölkerung aufgrund von regionalen und überregionalen Netzen ausgesetzt ist, nehmen die Immissionen im Privatbereich durch Produkte der persönlichen Kommunikation wie DECT, WLAN, Bluetooth usw. stetig zu. Während ein Großteil der Bevölkerung die neuen Kommunikationstechniken intensiv nutzt, besteht aber auch eine gewisse Verunsicherung bezüglich der gesundheitlichen Auswirkungen von Hochfrequenzanwendungen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt aber nicht nur die Entwicklung von neuen Technologien, sondern leistet ebenfalls einen Beitrag zur Technikfolgenabschätzung, indem gezielt Projekte aus dem Bereich EMVU gefördert werden.

So hat das BMBF von Januar 2002 bis März 2003 das Vorhaben „Alternative Funksysteme mit minimaler Strahlungsleistungsdichte im digitalen Rundfunk, Mobilfunk und drahtlosen LANs“ (kurz: miniWatt) finanziert. Das mit ca. 1,1 Mio Euro geförderte Projekt war in sieben Arbeitsbereiche mit insgesamt 38 Teilprojekten untergliedert. An dem Forschungsvorhaben waren elf Universitätsinstitute, drei Industrieunternehmen, vier mittelständische Unternehmen sowie ein unabhängiges Forschungsinstitut beteiligt. Ziel des Vorhabens war eine umfassende Untersuchung des Potenzials zur Senkung der Exposition durch technische, strukturelle und organisatorische Maßnahmen beim digitalen Rundfunk, Mobilfunk und bei WLANs.

Die Fortsetzung des Projekts läuft unter dem Namen miniWatt II und soll im Gegensatz zum abgeschlossenen Vorhaben miniWatt, bei dem die Emission im Vordergrund stand, das Hauptaugenmerk nun auf die Immission richten. Mit Wissenschaftlern, welche über ein breites Fachwissen auf dem Gebiet der Biomedizin verfügen, sollen darüber hinaus Immissionen umfassend bewertet werden. Die Ergebnisse können u.a. einen wichtigen Beitrag zur immissionsoptimierten Funknetzplanung liefern. Des Weiteren soll die Geräteindustrie in die Lage versetzt werden, ganzheitlich optimierte Lösungen zur Senkung der Exposition umzusetzen.

Stand der Technik

Die heutigen Mobilfunksysteme, die der breiten Bevölkerung zur Verfügung stehen, nutzen digitale Modulationsarten. Analoge Systeme werden momentan noch für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) genutzt. Beim terrestrischen Rundfunk existieren derzeit analoge und digitale Verteilungsstrategien. Digitale Techniken erlauben aufgrund der besseren Datensicherungsmaßnahmen den Einsatz niedrigerer Sendeleistungen. Dadurch wird prinzipiell eine Senkung der Exposition im Vergleich zu analogen Übertragungstechniken möglich. Andererseits nimmt die Nutzung des elektromagnetischen Spektrums gerade in den Bereichen des Mobilfunks und der Heimvernetzung zu, so dass hierdurch die Zahl der Feldquellen ansteigt.

Die heute zur Verfügung stehenden Techniken sind so konzipiert, dass eine Dekodierung der Signale möglich ist, solange die erforderlichen Qualitätskriterien des Signals im Vergleich zu Störeinflüssen (S/NR) erfüllt sind. Um Interferenzen zu

minimieren werden zudem keine unnötig hohen Sendeleistungen verwendet, d. h. die Empfindlichkeiten der Geräte werden voll ausgeschöpft. Rückkanalfähige Systeme (wie z. B. Mobilfunk) besitzen des Weiteren Mechanismen zur Sendeleistungsregelung, die Emissionen auf das Maß reduzieren, das für eine sichere Verbindung erforderlich bzw. im Rahmen der Spezifikationen möglich ist.

Effizienzsteigerung

Der zentrale Ansatzpunkt für eine umfassende Senkung der Emission ist eine Steigerung der Effizienz durch Nutzung nicht erschlossener Ressourcen (z. B. Raumdiversität). Das heißt, ein ideales System ist so zu entwerfen, dass die Energie, welche erforderlich ist, um ein Nutzbit in einer geforderten Zeit (Datenrate) sicher zu übertragen, minimiert wird. Das Minimum muss unter Berücksichtigung von bestimmten Randbedingungen (erlaubter Spektralbereich, Kosten...) gefunden werden. So kann es beispielsweise sein, dass durchaus höhere Effizienzen, und damit geringere Emis-

sionen, möglich wären bei Verwendung einer anderen Arbeitsfrequenz, die aber nicht für die Nutzung freigegeben ist. Aufwändigere Techniken sind in der Regel mit höheren Kosten verbunden, welche eine wirtschaftliche Einführung neuer Technologien verhindern können.

Um die Effizienz eines Funksystems zu steigern, können verschiedene einzelne Parameter des Systems oder das ganze System verändert werden. Daher wurden, im Rahmen des Vorhabens miniWatt, zusammengehörige Techniken entsprechend zusammengefasst (siehe **Tabelle 1**).

Referenzmodelle

Um die verschiedenen Maßnahmen hinsichtlich ihres Einsparpotenzials an Sendeleistung bewerten zu können, wurde jedem Teilprojekt ein geeignetes Referenzmodell zugrunde gelegt. Für die Systeme WLAN, PAN, Mobilfunk (GSM und UMTS) sowie digitales Fernsehen wurden Parametersätze definiert, im Hinblick derer die untersuchten Techniken zu vergleichen sind.

AP 1	Bandspreizverfahren
AP 2	Raum-Zeit-Signalverarbeitung
AP 3	Alternative Frequenzbereiche
AP 4	Selbstorganisierende Netze, Algorithmen und Protokolle
AP 5	Alternative Netze
AP 6	Standardkonforme Entwicklungen beim Mobilfunk
AP 7	Standardkonforme Entwicklungen beim Digitalen Rundfunk

Tabelle 1: Arbeitspakete im Vorhaben miniWatt.

Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse des Vorhabens dargestellt. Der vollständige Abschlussbericht ist unter [1] zu finden.

Intelligente Antennensysteme

Aus mehreren Antennen bestehende Systeme können durch eine Überlagerung der von den verschiedenen Einzelantennen abgestrahlten Signalanteile zur Ausbildung einer Gesamtrichtcharakteristik führen, die von der eines Einzelelementes abweicht. Hierdurch kann die elektromagnetische Energie an dem gewünschten Raumbereich des Empfängers konzentriert werden, während sie gleichzeitig an anderen Orten reduziert wird. Da dies adaptiv geschehen kann, ist eine Ausrichtung auf verschiedene Teilnehmerstandorte leicht möglich. Man spricht hierbei von (ggf. adaptivem) Beamforming. Die Strahlformung kann ausgenutzt werden um die Sendeleistung abzusenken. MIMO-Systeme (Multiple Input Multiple Output), die über mehrere Antennen auf der Send- und Empfangsseite verfügen, gehen einen Schritt weiter. Unter Ausnutzung der Diversität, beispielsweise des Raumes, sind die Signale an den einzelnen Empfangsantennen unkorreliert. Die in der Empfängerumgebung verfügbare Leistung wird besser genutzt, insbesondere können kurzzeitige Signaleinbrüche stark vermindert werden. Des Weiteren ist es möglich über verschiedene Antennen unterschiedliche Informationen parallel zu übertragen, die am Empfänger geeignet kombiniert werden. Ein derartiges MIMO-System ist schematisch in **Abb. 1** dargestellt.

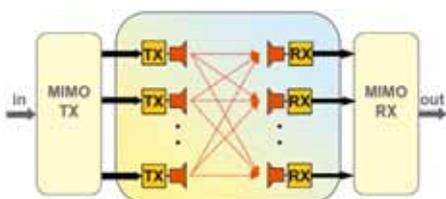


Abb. 1: Schematische Darstellung eines MIMO-Mehrantennensystems

Die Kapazität eines MIMO-Systems ist eine Zufallsvariable und hängt von der Realisierung des Funkkanals ab. Daher wird bei der Angabe von Kapazitäten die Übertragungskapazität angegeben, die in einem bestimmten Prozentsatz der Fälle nicht erreicht wird. Diese Kapazität wird üblicherweise als Ausfall-Kapazität (engl. outage capacity) bezeichnet. **Abb. 2** zeigt, dass bei einem Mehrantennensystem (durchgezogene blaue Linie) eine bestimmte Ausfall-Kapazität bei einem deutlich geringeren Signal-zu-Rauschverhältnis erreicht werden kann als bei der üblichen Konfiguration mit einer Empfangsantenne (gestrichelte schwarze Linie). Die Einsparungen der Sendeleistungen sind im Wesentlichen abhängig von der erforderlichen Übertragungskapazität (in bit/s/Hz), der Antennenanzahl auf Send- bzw. Empfangsseite sowie dem vorliegenden Funkkanal. Einsparungen um etwa eine Größenordnung sind aber durchaus realistisch. Allerdings sind geeignete Signalverarbeitungsmechanismen zumindest auf der Empfangsseite, bei bestimmten MIMO Übertragungsverfahren auch auf der Sendeseite, erforderlich, um einen entsprechenden Kapazitätsgewinn bzw. eine Sendeleistungsreduktion zu erhalten. Diese

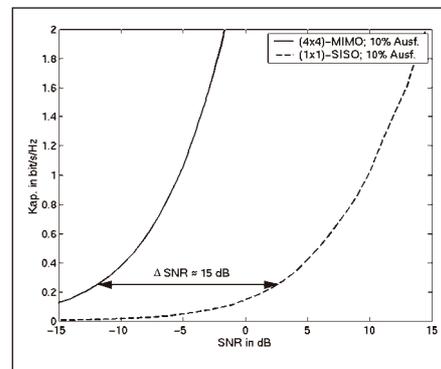


Abb. 2: 10 % Ausfall-Kapazitäten für eine klassische Antennenkonfiguration von einer Send- und einer Empfangsantenne (SISO-System) und einem MIMO-System bestehend aus vier Send- und Empfangsantennen in einem Rayleigh Kanal [2]. Im dargestellten Fall ergibt sich eine mögliche Sendeleistungsreduktion von ca. 15 dB (Faktor 32).

Technik steht mittlerweile vor der Einführung beim Mobilfunk. Sie ist jedoch auch für andere Übertragungen, z. B. Rundfunk, nutzbar.

Neuartige Netzstrukturen

Eine Veränderung der Netzstruktur der Sendeeinrichtungen hat, aufgrund der notwendigen Parameteranpassungen für die Sendeanlagen, einen unmittelbaren Einfluss auf die Emission. Im Rahmen des Vorhabens miniWatt wurden u.a. Multihop-Systeme betrachtet, bei denen das Funksignal von einem Endgerät über mehrere verschiedene andere Endgeräte (ggf. inaktiver) Teilnehmer zu einer Basisstation gelangt (**Abb. 3**). Wegen der kurzen Distanz zum nächsten Endgerät wird für den Nutzer mit dem Verbindungswunsch die Verwendung einer erheblich kleineren Sendeleistung möglich. Nähere Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass bei vielen Hops der Verwaltungsaufwand sehr stark zunimmt, wodurch gleichzeitig die Effizienz sinkt. Es kann daher unter Umständen keine zuverlässige Verbindung gewährleistet werden. Zudem ist das Vorhandensein anderer verfügbarer Endgeräte in der Umgebung erforderlich, die ihrerseits wieder zu Quellen werden.

Durch die Verkleinerung des Versorgungsgebietes kann die Emission deutlich gesenkt werden. Im Falle von zellularen Netzen (Mobilfunk) spricht man dann von Zellteilung (**Abb. 4**). Die Beschränkung der Versorgung auf jeweils kleinere Gebiete erlaubt bei Rundfunknetzen ebenfalls eine Senkung der Sendeleistung. Da bei Mobilfunkzellen die maximale Nutzeranzahl pro Basisstation beschränkt ist, sind die Vorteile beim Mobilfunk wegen der gleichzeitigen Kapazitätserhöhung durch die Zellteilung größer als beim Rundfunk. Beim digitalen terrestrischen Fernsehen (DVB-T) könnte durch den Ersatz des Versorgungsziels „portable indoor“, das eine Versorgung mit Rundfunkdiensten im Kerngebiet innerhalb des Hauses im Erdgeschoss vorsieht, durch die Forderung, dass die erforderliche Feldstärke nur außerhalb des Hauses in Dachhöhe erreicht wird, die Emission deutlich reduziert werden. Unter Verwendung einer Dachantenne, die einen Gewinn von etwa 10 dB aufweist, ließe sich so die erforderliche Sendeleistung insgesamt um den Faktor 1000 (30 dB) bis 10000 (40 dB) absenken. Eine dichtere Netzstruktur würde



Abb. 3: Reduktion der Sendeleistung durch Verwendung multi-hop-fähiger Endgeräte. Aufgrund geringer Distanzen zu einem benachbarten Endgerät wird nur eine kleine Sendeleistung benötigt.

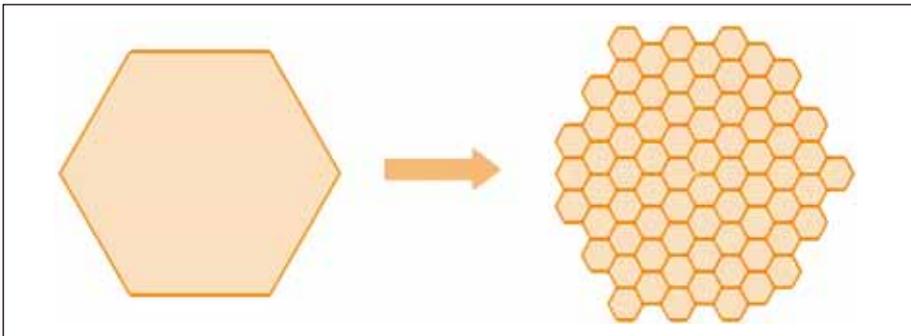


Abb. 4: Eine Zellteilung verkleinert das zu versorgende Gebiet. Dadurch kann die Sendeleistung reduziert und die Kapazität gesteigert werden

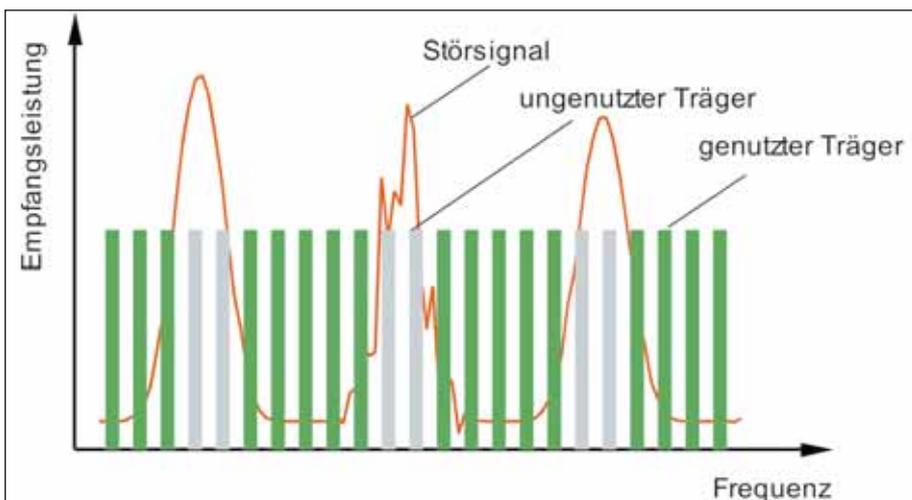


Abb. 5: Durch Verzicht auf die Übertragung von Trägern, welche am Empfänger nicht korrekt decodiert werden können, kann Sendeleistung eingespart werden.

sich diese Art der Versorgung auch in Anbetracht der Kosten an. Die Exposition aufgrund von Satelliten zur Rundfunkübertragung ist im Vergleich zum terrestrischen Fernsehen, trotz der um Größenordnungen höheren Programmvierfalt, deutlich kleiner.

Innovative Signalverarbeitungstechniken

Mehrträgerverfahren verwenden zur Übertragung von Informationen verschiedene Trägerfrequenzen aus einem vorgegebenen Frequenzbereich. Derartige Techniken besitzen den Vorteil, dass die Möglichkeit besteht, zur Übertragung von Signalen nur diejenigen Trägerfrequenzen zu nutzen, bei denen eine geringe Übertragungsdämpfung auftritt bzw. die am Empfänger in ausreichend hoher Qualität empfangen werden können. Ein hierfür geeignetes Verfahren ist beispielsweise OFDM (orthogonal frequency division multiplex). Durch adaptives „Bit-loading“ werden hierbei Informationen nur auf den Frequenzen übertragen, die auch am Empfänger wieder dekodiert werden können (Abb. 5). Simulationen im Rahmen des Vorhabens miniWatt haben gezeigt, dass durch den Einsatz eines adaptiven Bit-loadings die erforderliche Sendeleistung typischerweise um ca. 1,5 dB (Faktor 1,4) gesenkt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Emissionsreduzierung ist eine geeignete Störunterdrückung (Interference Cancellation). Hierbei können am Empfänger vorhandene Informationen über die störenden Signale genutzt werden, um die Störeinflüsse zu reduzieren. Auf diese Weise kann die erforderliche Sendeleistung verkleinert werden.

Darüber hinaus kann durch die Verwendung höherer Datenkompressionen die Emission ebenfalls abgesenkt werden. Da für die Übertragung eine kleinere Übertragungsrate (in bit/s), und damit eine kleinere Übertragungskapazität, erforderlich ist, kann die Sendeleistung reduziert werden.

Alternative Frequenzbereiche

Im Rahmen des Vorhabens miniWatt wurde das Potenzial einer Sendeleistungsreduktion durch die Verwendung von alternativen Frequenzbereichen analysiert.

darüber hinaus zu einer weitergehenden Emissionsreduktion führen.

Hochfliegende Plattformen bzw. Satelliten zeichnen sich durch eine sehr homogene

Leistungsdichteverteilung am Boden aus. Insbesondere für Rundfunksysteme ohne Rückkanal, bei denen zudem große Flächen mit einer endlichen Anzahl von Programmen versorgt werden sollen, bietet

Die bei niedrigeren Übertragungsfrequenzen vorhandene kleinere Ausbreitungsdämpfung erlaubt eine Reduktion der Sendeleistung. Würden beispielsweise für UMTS-Dienste anstatt der üblichen Frequenzen um 2 GHz Frequenzen im Bereich um 450 MHz (früheres C-Band) verwendet, so ließe sich die Sendeleistung um ca. 14 dB (Faktor 25) senken.

Als Alternative zur Verwendung von Frequenzen im GHz-Bereich für einige Anwendungen innerhalb des Hauses (z. B. WLAN, Bluetooth, Funkkopfhörer) könnten teilweise Infrarotsender eingesetzt werden. Die biologischen Auswirkungen von Infrarotstrahlung sind geklärt und sind durch den üblichen Einsatz von IR-Fernbedienungen bzw. Ir-DA Schnittstellen in der Bevölkerung akzeptiert. Zudem sind die Komponenten äußerst preiswert verfügbar. Da die Übertragung praktisch Sichtverbindung voraussetzt, sind die Anwendungsmöglichkeiten entsprechend begrenzt.

Sowohl die Übertragung per Schallwellen als auch die Möglichkeit der induktiven Übertragung erwies sich als nicht effizient.

Aktuelles Forschungsvorhaben miniWatt II

Anknüpfend an die Ergebnisse des Vorhabens miniWatt werden seit April des Jahres 2006 systematisch Leistungsdichten, spezifische Absorptionsraten und die Pulshaltigkeiten der verschiedensten Dienste analysiert und verglichen. Das Vorhaben trägt den Titel „Minimierung der Immission zukünftiger Funkdienste“ (kurz: miniWatt II) und wird gemeinsam vom BMBF und BMU gefördert.

Im Gegensatz zum abgeschlossenen Vorhaben miniWatt, bei dem die Emission im Vordergrund stand, soll das Hauptaugenmerk nun auf die Immission gerichtet sein. Mit Wissenschaftlern, welche über ein breites Fachwissen auf dem Gebiet der Biomedizin verfügen, sollen darüber hinaus Immissionen umfassend bewertet werden.

Die Ergebnisse können u.a. einen wichtigen Beitrag zur immissionsoptimierten Funknetzplanung liefern. Des Weiteren soll die Geräteindustrie in die Lage versetzt werden, ganzheitlich optimierte Lösungen zur Senkung der Exposition umzusetzen.

Literatur

- [1] Katalog OPAC, Suchbegriffe: Alternative Funksysteme, miniWatt (ca. 27 MB) <http://www.tib-hannover.de>,
- [2] M.A. Baldauf, Th. Fügen, C. Kuhnert, Th. Schäfer, C. Waldschmidt, W. Wiesbeck, „Expositionsreduzierung in zellularen Mobilfunknetzen unter Verwendung intelligenter Antennensysteme“, Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV 2004, pp. 523-530, Düsseldorf, 2004
- [3] http://www.dlr.de/pt_it/kt/miniwatt_broschuere.pdf (ca. 3,6 MB)

2.3.3 Personenschutzkonzept am Beispiel der Magnetresonanztomografie

Fred-Jürgen Breit

Bei der MRT ist man als Patient verschiedenen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern ausgesetzt, zusätzlich einer Geräuschbelastung durch die Anlage. Zum Schutz vor gesundheitlichen Auswirkungen wird die Exposition in einer speziellen internationalen Norm (IEC EN 60601-2-33) begrenzt. In ihr stützt man sich auf das vorhandene Wissen auf diesem Gebiet sowie auf die Bewertungen einer internationalen Expertengruppe (ICNIRP) und die der nationalen Strahlenschutzkommission. Hierbei geht man, wie weltweit bei dieser Thematik üblich, zunächst von Schutzziele aus und legt dann Parameter und Prozeduren fest, mit denen diese Ziele erreicht werden.

Einleitung

Im Jahre 1998 sind in Deutschland 3,7 Millionen Untersuchungen mit der Magnetresonanztomografie (MRT; auch: Spinechotomografie) durchgeführt worden, weltweit waren es rund 20 Millionen. Dieses Bildgebungsverfahren ist zu einem immer wichtiger werdenden Hilfsmittel der medizinischen Diagnose geworden, denn es bietet von außen „Innenansichten“ des Patienten. Eine Beschreibung dieses Verfahrens findet sich im FGF-Internet [1] und ist etwas verändert hier im Anhang A7 wiedergegeben. Es liegt in der Natur der Sache, dass der Patient bei der MRT magnetischen und elektromagnetischen Feldern ausgesetzt wird, bei denen es sich nicht mehr um schwache Felder handelt. Insbesondere die neueren Verfahren der schnellen Bildgebung führten zu höheren Feldwerten.

In diesem Aufsatz soll das Schutzkonzept skizziert und der Schutz des Patienten bei der MRT in Relation zum Schutz von Beschäftigten und dem der allgemeinen Bevölkerung gebracht werden. Es soll keine umfassende Darstellung der Schutzbemühungen gegeben werden. Ist diese gewünscht, so sei beispielsweise auf die Lektüre der Empfehlung der SSK [6] oder die der ICNIRP [7] verwiesen.

Gepulste Felder

Bei der MRT wird man gleich zweierlei gepulsten Feldern ausgesetzt, es sind dies die magnetischen Gradientenfelder und das Hochfrequenzfeld zur Spinanregung. In der Diskussion um gepulste Felder tut man sich schon bei der Beschreibung dieses Begriffs schwer. Es gibt keine eindeutige Definition dafür.

Einerseits sieht man bereits als gepulst an, was im **Zeitverlauf** eine Abweichung von der harmonischen Sinusform darstellt. Dabei spielt der optische Eindruck eines modulierten Signals die Hauptrolle, charakterisiert durch die Höhe und Steilheit der wiederkehrenden Maxima.

Andererseits versucht man, auf mathematischem Wege eine Pulshaltigkeit zu formulieren, bei der es beispielsweise um das Verhältnis der Leistung des niederfrequenten Anteils eines Signals zu seiner Gesamtleistung geht. Man führt also eine numerische Betrachtung in der **Frequenzebene** durch.

Bei der Magnetresonanz kommt eine dritte Variante hinzu. Hier ist die **Wirkung** auf ein Spinsystem in Form einer gewollten Änderung der Spinordnung von Belang. Bedingung ist, dass man einen in Zeit und Amplitude abgestimmten Wellenzug bei der Larmofrequenz der Protonen einstrahlt. Die Namensgebung 90°- oder 180°-Puls kommt von der entsprechenden Kippwirkung der Pulse auf das Spinsystem. Mit einem beliebigen oder gar statistisch veränderlichen „Impuls“ kann man keine nachweisbare Spinresonanz oder -reaktion erzeugen. In diesem Fall lässt sich erst bei nennenswertem Energieeintrag eine Änderung bei der physikalischen Größe Temperatur feststellen. Vielleicht ist das nicht nur auf Spinsysteme begrenzt.

Wie steht es nun aber um den Schutz des Patienten vor Gefahren und möglichen gesundheitlichen Schäden bei diesem Verfahren? Wie bemüht man sich darum?

Übersicht der Regelungsgeber

Verantwortlich für die Sicherheit von Personen vor gesundheitlichen Gefahren ist – außer den Personen selbst – auf höchster Ebene der Staat, abgeleitet vom grundgesetzlichen Schutz auf Leben und Gesundheit in Artikel 2 Abs. 2, GG. Bei Strahlen, auch bei nichtionisierenden Strahlen, ist dies der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (für Arbeitsschutz der Arbeitsminister, beide unter Beteiligung des Gesundheitsministers). Dafür hat er als Beratergremium aus Experten die Strahlenschutzkommission (SSK) berufen. Teilweise übergeordnet ist eine europäische Ebene; zusätzlich gibt es davon losgelöst eine internationale Ebene mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und dem zugeordneten Beratergremium ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Für den beruflichen Bereich sind die Berufsgenossenschaften gesetzlich eingebunden und stellen Regelungen für die Sicherheit auf und überwachen sie. Nachrangig fungieren Normungsgremien, die den Stand von Wissenschaft und Technik beschreiben sowie technische (Mess-) Verfahren und Grenzwerte festlegen. Oft handeln sie dabei im staatlichen oder übernationalen Auftrag.

Eine genauere Beschreibung der rechtlichen Konstruktion und des Zusammenwirkens dieser Regelungsebenen findet man bei Frese & Oppelt [2].

Eine Auswahl der Regelungen

Von diesen staatlichen und nichtstaatlichen Organen gibt es zum Thema Sicherheit in elektromagnetischen Feldern mehrere Regelungen.

In Deutschland sind dies im Wesentlichen:

- 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung, sie legt u. a. Feldstärkegrenzwerte für kommerzielle EMF-Erzeuger im Hoch- und Niederfrequenzbereich fest
- Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung der elektromagnetischen Felder als Standort-Bescheinigungsverfahren für Funkstellen ab 10 W EIRP
- DIN VDE 0848 Teile 1-3 (für Mess- & Rechenverfahren sowie Herzschrittmacher)
- Arbeitsschutzgesetz, zuletzt geändert am 30.7.2004
- BGV B11 (als Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“) + BG-Regeln
- IEC EN 60601-2-33 (als Sicherheitsnorm für Magnetresonanztomografen); diese internationale Norm ist in Deutschland verbindlich; sie ist übrigens auch in den USA akzeptiert.

Schutzziele und -empfehlungen

Bei Schutzhemen geht man grundsätzlich so vor, dass man zunächst Schutzziele formuliert. Danach geht es um Kriterien dafür, schließlich um entsprechende Maßnahmen, die Ziele zu erreichen, beispielsweise durch Grenzwerte oder Hilfsmittel. Sowohl die SSK als auch die ICNIRP, die übrigens mit den anderen Einrichtungen im stetigen Informationsaustausch arbeiten, bewerten auf Basis der vorhandenen wissenschaftlichen Arbeiten in gewissen Abständen die Situation sowie den aktuellen Kenntnisstand und geben Schutzempfehlungen ab, die bei den zuständigen Behörden und den Normungsgremien hohes Gewicht haben. Aktuelle Berichte zum Thema sind der SSK-Bericht von 2002 [6] und das „Statement“ der ICNIRP von 2004 [7]. Auf sie soll hier besonders eingegangen werden, im Übrigen soll aber versucht werden, hauptsächlich den Roten Faden zu verfolgen.

Stärke der Felder

Wenden wir uns jetzt noch einmal den physikalischen Größen bzw. ihren Werten zu. Das konstante Magnetfeld, in dem der Patient liegt, kann 1 Tesla (T) oder mehr betragen, was etwa dem 20.000-fachen des Erdmagnetfelds entspricht. Die Höhe überrascht zunächst, hat man es doch bei den bekannten EMVU-Grenzwerten für die Bevölkerung mit deutlich kleineren Zahlen zu tun. So nennt die Empfehlung

des Rates der EU vom 12.7.99 [3] als Grenzwert für das statische Magnetfeld 40 mT.

Schutzkonzept

Wie ist dieser gravierende Unterschied zu erklären? Hierzu muss man zuerst das ganze Konzept wenigstens skizzieren:

1. Es gibt unterschiedliche Anwendungsbereiche, die sich auf unterschiedliche Zielgruppen beziehen. Diese sind einmal die Allgemeinbevölkerung, dann Beschäftigte in elektromagnetischen Feldern und schließlich medizinische Anwendungen. So ist in der „Empfehlung des Rates“ [3] ausdrücklich die Exposition von Arbeitnehmern durch EMF am Arbeitsplatz ausgenommen {dort im Pkt. (3)} sowie die Exposition zu medizinischen Zwecken {dort in Pkt. II b), denn dafür gibt es andere Regelungen.

Für den Arbeitsschutz gilt die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 „EMF“ [4], in der schon im § 1 Abs. 2 steht: „Diese Unfallverhütungsvorschrift gilt nicht für die Exposition bei gewollter medizinischer Einwirkung von EM-Feldern.“

Für den medizinischen Bereich gilt das Medizinproduktegesetz, das sich in unserem Fall der MRT auf die einschlägige „harmonisierte“ Norm IEC EN 60601-2-33 [8] bezieht.

2. In der Tat ist in diesem „Dreiklang“ vom Schutz der Öffentlichkeit, den betroffenen Arbeitnehmern und den medizinischen Anwendungen an Patienten eine Abstufung der Grenzwerte zu erkennen. Für die Ersteren gilt der am weitesten reichende Schutz mit den niedrigsten (strengsten) Grenzwerten. Für den Arbeitsschutz sind die zulässigen Werte etwa fünfmal so hoch. Für den medizinischen Bereich gelten gesondert festgelegte Grenzwerte.
3. Für diese Abstufung gibt es gute Gründe: Für die Allgemeinbevölkerung legt man Daueraufenthalt und Schutz für Personen jeden Alters sowie unterschiedlicher gesundheitlicher Konstitution zu Grunde. Die absoluten Feldstärkewerte sollen so niedrig sein,

dass sie völlig unberücksichtigt bleiben können und sich alle Personen frei bewegen können. Durch einen Sicherheitszuschlag will man als Ziel eventuelle noch nicht bekannte gesundheitliche Einflüsse sicher vermeiden (Vorsorgegedanke).

Im Arbeitsumfeld handelt es sich nicht nur vom Zugang her um einen kontrollierten Bereich, sondern auch um bekannte Feldverhältnisse, um entsprechend geschultes sowie eingewiesenes Personal (mit Verhaltensanweisungen und Schutzmitteln) und um zeitlich begrenzte Exposition. Ziel ist es hier ebenfalls, negative gesundheitliche Einwirkungen auszuschließen.

Bei medizinischen Anwendungen ist die Zeit der Exposition noch enger begrenzt und findet unter ärztlicher Aufsicht statt. Im Unterschied zu den beiden vorhergehenden Situationen können hier (medizinische) Wirkungen beabsichtigt sein, z. B. durch innere Erwärmung. Bei der MRT sind die wesentlichen Argumente, dass man eine zuverlässige Diagnose braucht und mit diesem Verfahren ein anderes, das mit ionisierenden Strahlen arbeitet (Computertomografie), ersetzen kann. Da man bei ionisierenden Strahlen wegen der Schädigungsmöglichkeit auch bei geringer Dosis keinen Grenzwert angeben kann, bei dem mit Sicherheit nichts passiert, muss man dort nach dem ALARA-Prinzip („as low as reasonably achievable“ = so niedrig, wie vernünftigerweise erreichbar) vorgehen. Bei nichtionisierenden Strahlen geht man dagegen nach allem was man weiß, von einer Schwellenwirkung aus, d. h. unter einer bestimmten Schwelle passiert nichts, weiteres Absenken bringt nicht mehr Sicherheit.

Betriebsarten einer Magnetresonanz (MR)-Anlage

Konzentrieren wir uns auf den Schutz von Patienten in der MR-Anlage. In bewusster Anlehnung an die internationale/europäische Norm IEC EN 60601-2-33 unterscheiden auch SSK und ICNIRP beim Betrieb einer MR-Anlage drei Stufen (die Bezeichnungen variieren nach der Quelle; hier ist die Begrifflichkeit der SSK übernommen):

• **Normalbetrieb = NB** (bis hin zu den empfohlenen Werten)
Hier überschreitet kein Betriebsparameter Grenzen, die eine physiologische Belastung beim Patienten erwarten lassen.

• **Kontrollierter Betrieb = KB** (unter besonders kontrollierten Bedingungen und besonderer Überwachung des Patienten, weil Betriebsparameter Werte erreichen können, die eine physiologische Belastung verursachen können)

• **Forschungsbetrieb** (unterliegt besonderen Regelungen, weil Betriebsparameter ein Gesundheitsrisiko erzeugen können)

Wir werden uns hauptsächlich dem Normalbetrieb widmen. Betont wird von der SSK, dass schon dort die empfohlenen Werte über denen für berufliche Exposition liegen. Die Rechtfertigung ergibt sich aus dem medizinischen Nutzen für den Patienten und der kurzen Expositionsdauer. Der Vorteil des Verfahrens ist die Vermeidung von ionisierenden Strahlen sowie, dass kein Eingriff in den Körper stattfindet.

Schutzziele und Grenzwerte

Generelle Absicht ist es, gesundheitliche Beeinträchtigungen zu vermeiden. Es werden vier physikalische Größen der MR-Anwendung betrachtet und dafür Ziele formuliert, die dies sicherstellen sollen. Das geschieht praktisch durch Begrenzung der Exposition. Hierbei wird teilweise nach den Betriebsarten unterschieden.

Statisches Magnetfeld

Nach langjähriger klinischer Erfahrung werden bis 4 T keine Gesundheitsbeeinträchtigungen erwartet. Von 2-4 T besteht die Möglichkeit von Befindlichkeitsstörungen bei Bewegungen im Feld.

Für den Normalbetrieb will man keine Befindlichkeitsstörungen zulassen, für den kontrollierten Betrieb keine Gesundheitsbeeinträchtigungen.

Zeitlich veränderliche Magnetfelder

In den Gradientenspulen, die für die Bildauflösung in den drei Raumrichtungen erforderlich sind, werden innerhalb des Pulsprogramms starke Ströme schnell geschaltet, d. h. die Gradientenfelder gehen schnell von Null auf Maximum und

wieder zurück. Nach dem Faradayschen Gesetz werden proportional zur Änderung des Magnetfelds (dB/dt) elektrische Felder erzeugt, die im leitfähigen Körpergewebe zu Strömen führen. Diese Ströme können Nerven und Muskeln stimulieren.

Schutzziel ist es, die Stimulation von Nerven und Muskeln (hier besonders des Herzens) zu vermeiden. Dabei wird zusätzlich zu dB/dt noch die Stimulationszeit t_s herangezogen.

Innerhalb des Normalbetriebs soll es zu keinen Stimulationen der Nerven und

Muskeln kommen; im kontrollierten Betrieb ist zwar eine wahrnehmbare, jedoch nicht schmerzhaftige Stimulation zugelassen. Die Begrenzungen sind kompliziert, sie können nicht als einzelne Zahlen dargestellt werden. **Tabelle 2** gibt daher nur eine Orientierung.

Hochfrequenzfelder

Bei den eingestrahelten elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern ist der relevante Effekt die Erwärmung des Körpergewebes. Ziel ist es, diese Erwärmung zu begrenzen. Als tolerierbar wird nach langjähriger Erfahrung 0,5 °C (Normalbetrieb)

Regelung	GrW	Zielpersonen	Exposition
Rat EU [3]	40 mT	allg. Bevölkerung	unbegrenzt
UVV [4]	212 mT	Beschäftigter	Ganzkörpermittelwert für 8 h;
	4 T	bei einzelnen med. Anwendungen	als Spitzenwert max. 2 h/Tag
SSK [6]	NB: 2 T	Patient	kurz + beaufsichtigt
	KB: 4 T	Patient	kurz + beaufsichtigt
ICNIRP [7]	NB: 4 T	Patient	kurz + beaufsichtigt
Norm [8]	NB: 2 T	Patient	kurz + beaufsichtigt
	KB: 4 T	Patient	kurz + beaufsichtigt

Tabelle 1: Grenzwerte für das statische Magnetfeld

Regelung	dB/dt	Zielpersonen	Exposition
UVV [4]	3 T/s	Beschäftigter	
SSK [6]	20 T/s und $t_s < 1$ ms	Patient	kurzzeitig
ICNIRP [7]	$20 \cdot (1 + 0,36/t_s)$ T/s; für NB nur 80 %, bei KB 100 % davon mit $t_s < 1$ ms nicht größer als etwa 40 T/s	Patient	kurzzeitig
Norm [8]	NB: 45 T/s	Patient	kurzzeitig
	KB: 56 T/s	Patient	kurzzeitig

Tabelle 2: Begrenzung für das zeitlich veränderliche Magnetfeld (grob)

Regelung	Ganzkörper	Kopf*	Extremitäten*	Zeit
Rat EU [3]	0,08	2	4	unbegrenzt
UVV [4]	0,4	10	20	Arbeitszeit
SSK [6]				
+ Norm [8]	NB: 2	3,2	20	kurzzeitig
	KB: 4	3,2	20	kurzzeitig
ICNIRP [7]	NB: 2	10	20	kurzzeitig
	NB: 4	10	20	kurzzeitig

* gemittelt über 10 g, besondere Berücksichtigung des Auges
alle Werte gelten gemittelt über 6 min; gleichzeitig Kopf $\leq 38^\circ\text{C}$, Extremitäten $\leq 40^\circ\text{C}$;
die MRT-Werte aus [6], [7], [8] gelten bis zu einer Umgebungstemperatur von 24°C

Tabelle 3: Grenzwerte für die spezifische Absorptionsrate von EMF (SAR in W/kg)

bzw. 1 °C (kontrollierter Betrieb) angesehen. Da diese nicht direkt gemessen und überwacht werden können, bezieht man sich auf die spezifische Absorptionsrate (SAR). Hinzu kommen lokale absolute Temperaturbegrenzungen. Hier geht man im Prinzip keinen Sonderweg und ist näher an den bekannten EMVU-Basisgrenzwerten.

Schallemissionen

Beim Betrieb eines MR-Geräts kommt es durch die Pulsprogramme zu den typischen Hämmergeräuschen. Sie rühren von den schnellen Stromänderungen in den Gradientenspulen her. Im starken statischen Magnetfeld erzeugen diese Ströme Lorentz-Kräfte in den Spulen, die zu Vibrationen und damit zu starkem Geräusch führen.

Überschreitet der Lärm bestimmte Grenzen, so sind wie bei anderen diesbezüglichen Regelungen Schutzmaßnahmen für die Ohren zu ergreifen.

Aus den Empfehlungen der SSK

Die SSK hat sich 1998 schon einmal mit der Thematik Exposition bei der Magnetresonanztomografie befasst. Die Empfehlung der SSK „zur sicheren Anwendung von MR-Verfahren in der medizinischen Diagnostik“ von 2002 ersetzt die frühere (strengere). Sie stützt sich dabei auf die Grundlage der biophysikalischen Kenntnisse und klinischen Erfahrungen, sie berücksichtigt auch die berufliche Sicherheit des Anwenders und die Gesundheit der Allgemeinheit. Dabei bezieht sie sich auf 14 Regelungen und 31 wissenschaftliche Artikel. Im Normalbetrieb sieht die

SSK grundsätzlich kein MR-Risiko für den Patienten; in einem Kurzbericht im Internet stellt sie fest:

„Bei Patienten wurden nach heutigem Kenntnisstand bei fachgerechter Anwendung keine Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen durch MR-Untersuchungen gefunden.“

Die Erfüllung der Forderungen des Medizinproduktegesetzes sowie die Berücksichtigung des allgemeinen Standes der Sicherheitstechnik setzt sie voraus. Für den Schutz des Personals wird nicht nur auf die UVV BGV B11 „Elektromagnetische Felder“, sondern auch auf die UVV BGV B3 „Lärm“ hingewiesen.

Aus dem „Statement“ der ICNIRP

Ebenso wie die SSK hat sich die ICNIRP mehrfach mit dieser Thematik befasst und Empfehlungen herausgegeben (1994, 1998 und zuletzt 2004), die umfassend Stellung nehmen. Sie richten sich ausdrücklich an verantwortliche Behörden, an MRT-Betreiber wie auch an die Hersteller. Der aktuelle Bericht gründet explizit auf der Auswertung von 133 wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Über die oben beschriebenen Schutzziele und Grenzwerte hinaus wird noch eine ganze Reihe von medizinischen Gesichtspunkten diskutiert. Darüber hinaus empfiehlt ICNIRP sogar dringend, „ruhigere“ Gradientenspulen zu entwickeln! Das Statement endet mit einem Hinweis auf Probleme der elektromagnetischen Verträglichkeit der elektrischen und elektronischen Geräte untereinander, was wegen der starken Felder auf der Hand liegt.

Literatur

- [1] FGF Online-Newsletter 1/2006, 19-25 in www.fgf.de/fup/publikat/newsletter2006.html
- [2] G.Frese, A.Oppelt, Sicherheit und Grenzwerte in der MRT, Z. Med. Phys. 13(2003)159-164
- [3] Empfehlung des Rates (der EU) vom 12.7.1999 (1999/519/EG), Amtsblatt EG L199/59-70 vom 30.7.99
- [4] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift – BGV B11, Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ und BGR-Regeln B11, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, 1.6.2001
- [5] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift – BGV B3, Unfallverhütungsvorschrift „Lärm“, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Januar 2005
- [6] Empfehlung der SSK „zur sicheren Anwendung von MR-Verfahren in der medizinischen Diagnostik“ (verabschiedet in der 180. Sitzung am 19./20.9.2002), Heft 36
- [7] ICNIRP-Statement, „Medical Magnetic Resonance Procedures: Protection of Patients“, Health Physics 87,2(2004)197-216
- [8] IEC EN 60601-2-33, Medizinische Geräte – Teil 2: Besondere Festlegung für die Sicherheit von medizinischen diagnostischen Magnetresonanz-Geräten, 2. Ausgabe, 5/2002

Regelung	Lärmpegel	Zielperson	Maßnahme
UVV [5]	85 dB(A)	Beschäftigte	kurzzeitig auch höhere Werte tolerabel
SSK [6]	91 dB(A)	Patient	1-2 h, darüber Gehörschutz
ICNIRP [7]	85 dB(A)	Patient	Gehörschutz, bereits ab 80 dB(A) anbieten
Norm [8]	99 dB(A)	Patient	Gehörschutz zur Einhaltung

Tabelle 4: Grenzwerte für Lärm und Schutzmaßnahme (stark vereinfacht)

3 Biologische Hintergründe und Stand der Forschung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage nach den biologischen Wirkungen von gepulsten elektromagnetischen Wellen, nachdem zunächst die technischen Grundlagen und Anwendungen ausführlich im Kapitel 2 behandelt worden sind.

Das Kapitel ist in drei Unterkapitel gegliedert, die die Überschriften „Pulse in der Biologie“, „Forschungsergebnisse“ und „Medizinische Anwendungen“ tragen.

Im ersten Beitrag bei „Pulse in der Biologie“ wird die Frage geklärt, inwieweit gepulste Vorgänge im menschlichen Körper durch die Einwirkung gepulster elektromagnetischer Strahlung beeinflusst werden können. Daran schließt sich ein Aufsatz über biophysikalische Primärreaktionen ebendieser Felder an. Nach einem Exkurs zu Demodulationsmechanismen in biologischen Systemen wird konkret auf den menschlichen Sehapparat und die Nervenleitungen eingegangen. Am Schluss dieses Unterkapitels findet sich ein Beitrag über mögliche Auswirkungen bei Menschen mit Epilepsie sowie mögliche Einflüsse durch die Radartechnik.

Im Unterkapitel „Forschungsergebnisse“ erscheint zunächst eine Zusammenfassung einer Literaturlauswertung aller bis 2006 vorhandenen Forschungsprojekte. Ergänzt wird sie von einer Zusammenfassung von Workshops und Seminaren der letzten sieben Jahre zu diesem Thema und endet mit den neuesten Erkenntnissen aus diesem Bereich.

Im letzten Abschnitt wird unter „Anwendungen“ die Therapie von Knochen und Gelenken mittels gepulster Felder unter die Lupe genommen.

3.1 Pulse in der Biologie – Wo treten sie auf und was könnten gepulste hochfrequente elektromagnetische Felder in der Biologie bewirken?

Dieses Kapitel liefert eine Übersicht, in welchen Bereichen der lebenden Materie Pulse, insbesondere gepulste Signale, vorkommen, und stellt diese physikalisch und energetisch den gepulsten elektromagnetischen Feldern (EMF) aus der Technik gegenüber.

Es wird die Frage beantwortet, wie hochfrequente EMF auf biologische Systeme wirken. Welche Wirkmechanismen sind bekannt, und über welche Hypothesen wird spekuliert? Was ist überhaupt ein Wirkmechanismus? Eine Frage, die vielleicht auf den ersten Blick trivial wirkt,

deren Beantwortung aber manche Begriffsverwirrung klären hilft.

Auf die spezifischen Wirkmechanismen gepulster EMF wird in diesem Kapitel detaillierter eingegangen. Welche sind für die Biologie anwendbar und welche spekulativ bzw. welche wurden bereits als irrelevant verworfen?

Zwei biologische Teilsysteme werden speziell betrachtet: das Auge und die Nerven, denen oft eine besondere Empfindlichkeit gegenüber (gepulsten) EMF und damit Verletzlichkeit nachgesagt werden.

Bestimmten technischen Anwendungen wird eine besonders beeinträchtigende Wirkung zugeschrieben, als Beispiele stehen hier die Schnurlos-Telefone (insbesondere DECT) und die Radartechnik im Fokus.

Als Sonderfall wird das Phänomen Epilepsie betrachtet: Gibt es Anzeichen oder Beweise, dass gepulste EMF bei dieser Krankheit eine spezifische Wirkung entfalten?

3.1.1 Gepulste Vorgänge im menschlichen Körper Bieten sie Angriffspunkte für die Einwirkung gepulster elektromagnetischer Felder?

Frank Gollnick

Eine ganze Reihe von physiologischen Vorgängen im menschlichen Körper verläuft in – mehr oder weniger – regelmäßigen Intervallen, die man durchaus als „gepulst“ bezeichnen kann, wie Herzschlag und Atmung. Aber auch weniger bekannte Beispiele, wie der zirkadiane Tag/Nacht-Rhythmus, alle Sinneswahrnehmungen wie Riechen, Schmecken, Hören, Sehen, Tasten oder das Temperaturempfinden sind „gepulste“ Vorgänge. Auch molekulare und elektrische Vorgänge in unseren Körperzellen sowie unsere natürlichen Muskelzuckungen und Augenbewegungen im Schlaf unterliegen „gepulsten“ physiologischen Körpersignalen. Unser Körper versteht sich also in seinem Inneren mit Pulsen; die Pulsgeschwindigkeiten (Frequenzen) dieser Vorgänge sind dabei sehr unterschiedlich.

Gepulste Signale werden auch beim Telefonieren mit dem Handy genutzt. Sie arbeiten nach dem GSM-Standard, dem weltweit am meisten verbreiteten Mobilfunksystem zur mobilen Kommunikation. Da liegt es nahe, einen Zusammenhang mit bzw. eine störende Beeinflussung der „Informationsverarbeitung“ des menschlichen Körpers zu vermuten. Auch gibt es Vorstellungen, dass diese technisch erzeugten, induzierten Pulse im Körper des Menschen Auswirkungen haben könnten, dass sich die fremden Pulse dort „einklinken“ und die eigenen Pulse aus der Bahn werfen könnten. Als Folgen davon werden u.a. nervöse Störungen, Schlaflosigkeit, verschiedenste Schmerzsymptome bis hin zu epileptischen Anfällen angegeben.

Ob diese Möglichkeit der Einflussnahme aus physiologischer Sicht überhaupt besteht, soll in diesem Beitrag näher betrachtet werden.

Körperimpulse und gepulste Funksignale

Insgesamt handelt es sich um sehr komplexe Zusammenhänge, die zum Verständnis in einigen Details genauer angesehen werden müssen. In der Tat liegen einige der natürlich vorkommenden Impulse im Körper ziemlich genau in dem Frequenzbereich, der als die „aufmodulierten“ Änderungen des hochfrequenten Trägersignals, d. h. als relativ niederfrequente „Pulsung“ in digitalen Funksignalen steckt. Die Pulsung wird allerdings erst erkennbar, wenn die niedrigen Frequenzen „demoduliert“, also „herausgefiltert“ werden. Diesen *elektrischen* Impulsen sind in der Mehrzahl entsprechend *schnelle* Körpersignale zuzuordnen. Das scheint im ersten Moment den Beweis darzustellen: „Also sind die schwachen, gar nicht spürbaren, subtilen elektrischen ‘Energieflüsse’ des Körpers täglich einer ‘Übermacht’ von scharfkantigen, groben, unerbittlich hämmernenden und pulsierenden technischen Funksignalen, also ‘seelenlosen’ Angreifern gegenüber gestellt.“

Mit dieser Vorstellung war es naheliegend, schon bald nach der Einführung des Mobilfunks (ab dem Beginn der 90er Jahre

großflächig sichtbar anhand der Mobilfunkmasten) digital gepulsten Funksignalen – *und hierbei vor allem den Pulsen* – die Hauptschuld an einer Reihe oben erwähnter, wahrgenommener Beschwerden zuzuschreiben. Näher und vor allem nüchtern betrachtet, spitzt sich dabei alles auf die Frage zu, ob die Funksignale mit ihren Pulsen tatsächlich in der Lage sind, durch die Haut in den Körper einzudringen und dort, in den einzelnen Zellen und an den Nervenbahnen, *Körperimpulse zu stören*.

Warum eigentlich nicht? Funkwellen dringen ja sogar durch Betonwände und beeinflussen dahinter noch die elektronischen Bauteile eines Funkempfängers, so dass wir zum Beispiel in geschlossenen Räumen Radio hören oder eben Mobiltelefonieren können. Sicher, wir brauchen dazu eine Antenne, und die haben Menschen nun einmal nicht angeboren. Aber auch an vielen modernen Handys sieht man keine Antenne mehr, und vielleicht gibt es in unserem Körper ähnliche verdeckte Strukturen, die wie die eingebaute Antenne im Innern eines Handys wirken können? Dieser Gedankengang vernachlässigt allerdings vollkommen, dass elek-

tronische Bauteile in der Tat sehr viel empfindlicher auf Funkwellen reagieren können als biologisches Material, wie beispielsweise Körperzellen. So ist es nicht verwunderlich, dass Träger von Hörgeräten Probleme beim Mobiltelefonieren haben können, weil die niederfrequenten Anteile des Funksignals in die Geräte-Elektronik einkoppeln, dort „demoduliert“ und verstärkt werden und so für ein unangenehmes Brummen sorgen. Genauso können die „Pulsanteile der Handystrahlung“, manchmal sehr öffentlichkeitswirksam, mit Hilfe eines Radioempfängers dem Publikum bei Versammlungen oder Fernsehsendungen als Geräusch demonstriert werden. Aber: Es ist bis heute in noch keinem Experiment eindeutig gelungen zu zeigen, dass Körpergewebe in der Lage ist, eine modulierte Funkwelle zu „demodulieren“ und damit die niederfrequenten Anteile herauszufiltern – so wie es eben ein elektronisches Bauteil zum Beispiel in jedem Radio macht, um Sprache und Musik hörbar zu machen. Eine differenziertere Betrachtung ist deshalb unbedingt ratsam, und die zentrale Frage ist dabei, warum ein solcher Nachweis in biologischem Gewebe zumindest bisher nicht erbracht werden konnte.

Physiologisch relevante Pulsereignisse im Körper

Wir befinden uns bei diesem Thema weitgehend im Bereich der so genannten „Reizphysiologie“, man könnte sagen, einer „Lehre von den etwas auslösenden elektrischen Ereignissen im Körper auf der Ebene der Zellen“. Lassen wir dabei einmal die ganz langsamen pulsierenden Ereignisse, wie Herzschlag, Atmung oder noch langsamere „zirkadiane“ Rhythmen (wie den Tag/Nacht-Rhythmus) außer Acht. Auch sie werden irgendwo durch körperlere elektrische Impulse gesteuert, zum Teil allerdings im Zusammenspiel mit der langsamen Veränderung der Spiegel bestimmter Botenstoffe, wie zum Beispiel der Hormonspiegel. Solche Vorgänge sind aber offensichtlich mit ihren Frequenzen von einigen wenigen Ereignissen bis ...zig Ereignissen pro Minute, pro Tag oder pro Woche sehr viel langsamer als selbst die langsamsten niederfrequenten Modulationsfrequenzen in Funksignalen. Es ist nicht vorstellbar, wie sich hier ein Mobilfunksignal direkt „einklinken“ soll und zu einer Veränderung der natürlichen Rhythmen führen könnte.

Wir betrachten also eher relativ schnelle Vorgänge im Körper, die sich am besten mit Frequenzangaben von „Ereignissen pro Sekunde“ (also in der Einheit „Hertz“ [Hz]) angeben lassen. Neben elektrischen Reizen spielen in der Reizphysiologie *primär* an einigen Stellen auch mechanische, optische, chemische oder Temperaturstimuli eine Rolle. Dies ist bei Reizrezeptoren der Fall. Solche Rezeptoren in Form spezialisierter Einzelzellen oder Zellgruppen gibt es im Körper entsprechend unserer Sinne für Licht, Schall, Temperatur, mechanische Reize (Druck, Schmerz, Vibration etc.), Geschmack und Geruch. Die oben beispielhaft angeführten Beschwerden von Betroffenen ließen sich physiologisch betrachtet fast alle auf diese Rezeptorfunktionen oder auf möglicherweise direkte Einwirkungen auf Nervenzellen zurückführen.

Außerdem werden noch Wirkungen auf molekularer Ebene in den Zellen diskutiert (zum Beispiel Schäden an der Erbsubstanz „DNA“), die weiter zum Problemkreis der „Krebsentwicklung“ führen. Daneben gibt es weitere Sonderfälle, die in dem genannten Frequenzbereich liegen, wie zum Beispiel das „Herzflimmern“. Es würde den Rahmen des vorliegenden Artikels

allerdings sprengen, nun alle diese Rezeptorfunktionen sowie Wirkungen in und an den Zellen der Reihe nach durchzugehen und alle auf ihre Anfälligkeit gegenüber digital gepulsten Funksignalen hin zu hinterfragen. Es gibt aber, um bei den gepulsten Vorgängen zu bleiben, einige grundlegende physiologische Mechanismen im Körper, die fast allen Reizerfassungs- und deren Weiterleitungsvorgängen zugrunde liegen. Hierauf soll näher eingegangen werden, und einige Beispiele von Reizverarbeitung und Nervenleitung werden die Betrachtung ergänzen, immer mit Blick auf die Möglichkeit der Einwirkung gepulster Funksignale.

Wie werden im Körper schnelle Informationen verarbeitet und weitergeleitet?

Der grundlegendste Mechanismus, der hierbei eine Rolle spielt: In allen lebenden Zellen herrscht eine elektrische Potenzialdifferenz, also eine messbare elektrische Spannung (Einheit „Volt“ [V]), zwischen Innenraum und äußerem Milieu, welche durch die Zellmembran, die äußere Begrenzung der Zelle, getrennt sind. Die Zellmembran (**Abb. 1**) ist ein etwa 7 Nanometer (0,000000007 m) dicker „Doppellipidfilm“, der elektrisch recht gut isoliert und den man sich wie zwei extrem dünne, aneinanderliegende Ölfilme vorstellen kann, deren Außenseiten allerdings – anders als beim normalen Ölfilm – wasseranziehend sind.

Die Doppellipidmembran ist sehr wenig dehnbar und für Wasser, bestimmte Moleküle und Ionen (elektrisch geladene Atome oder Moleküle) von Natur aus sehr unterschiedlich durchlässig bis hin zu undurchlässig. Außerdem sind in die Membran spezielle Kanäle und Transporter für bestimmte Stoffe, wie zum Beispiel Metall-Ionen, eingebaut, für die die Membran ansonsten praktisch undurchlässig wäre. Das führt – ebenfalls naturgegeben und genetisch absolut vorbestimmt – dazu, dass sich *in* den Zellen andere Konzentrationen an wasserlöslichen Ionen und (ebenfalls elektrisch geladenen) Eiweißen einstellen als *außen*. Dies wiederum zieht die erwähnte Potenzialdifferenz nach sich, die für jeden Zelltyp verschieden und im Ruhezustand der Zelle meistens konstant ist. Ein Durchschnittswert für das – folglich auch so genannte „Ruhepotenzial“ oder „Membranruhepotenzial“ ist etwa -80 mV (Millivolt = Tausendstel Volt). Es kann bei Warmblütern zwischen -120 mV und -40 mV schwanken. Das „Membranruhepotenzial“ wird immer negativ angegeben. Das heißt, es befinden sich im Inneren der Zelle mehr negative freie Ladungen als außerhalb; der Potenzialgradient ist nach außen gerichtet. Wenn Zellen aktiv sind, sind kurzfristige Auslenkungen bis in den positiven Potenzialbereich möglich. Zusätzlich befinden sich an der inneren und äußeren Oberfläche der Zellmembran überwiegend negative „Oberflächen-

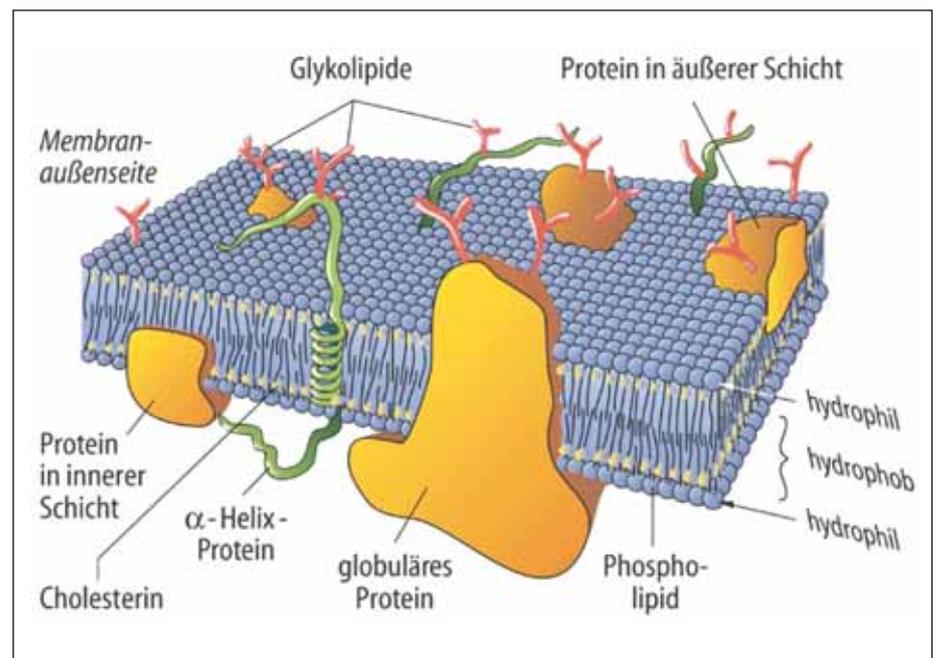


Abb. 1: Schema der Zellmembran (= Plasmamembran) mit eingelagerten Eiweißmolekülen (Proteine) (aus [7])

ladungen“ (innen mehr negative als außen), die die Potenzialdifferenz über die Membran hinweg noch vergrößern [6].

Grundlegende Ereignisse bei der internen Kommunikation im Körper und bei der Steuerung der Zellaktivität sind Änderungen des Membranpotenzials sowie Reaktionen von Rezeptoren der Zellmembran mit vielen die Zelle von außen erreichenden („extrazellulären“) Wirkstoffen. Wenn interne Informationen durch eine sogenannte „elektrische Erregung“ der Zellen vermittelt werden, spielt dabei das sogenannte „Aktionspotential“ fast immer die entscheidende Rolle. Andere Signalmöglichkeiten sind zum Beispiel kurzzeitige („transiente“), deutliche Ionenkonzentrationsänderungen (häufig bei Kalzium-

ionen) oder Konzentrationsänderungen anderer Stoffe, die ebenfalls in der Art von „Pulsen“ ablaufen können (Beispiel: regelmäßige Kalzium-„Spikes“ = kurze, spitze Erhöhungen der Konzentration). Das erwähnte „Aktionspotential“ ist die schnelle kurzzeitige Verschiebung des Membranpotenzials einer Zelle bis in den positiven Potenzialbereich („Depolarisation“), das dabei im Spitzenbereich +40 mV und mehr erreichen kann. Es entsteht durch kurzfristige, massive Ionenverschiebungen durch die Kanäle oder Transporter der Zellmembran hindurch und kann seinerseits in der Folge wiederum solche Ionenflüsse bewirken, die nichts anderes sind als elektrisch messbare Ströme durch die Membran – „Membranströme“. Selbstgeregelt ablaufende Rückflüsse und Rück-

transporte von Ionen stellen nach Erreichen des positiven Spitzenwerts das „Membranruhepotential“ wieder her („Repolarisation“). Die Ionenverschiebungen sind aber außerordentlich klein im Verhältnis zu den vorhandenen Ionenkonzentrationen auf beiden Seiten der Zellmembran. Im Zusammenhang dieser komplizierten Regelmechanismen kann das Aktionspotential selbst wiederum bestimmte Ionenkanäle zum elektrisch gesteuerten Öffnen oder Schließen bewegen („spannungsgesteuerte Kanaltypen“). Beteiligt sind an all diesen Vorgängen hauptsächlich Natrium-, Kalium-, Kalzium- und Chlorid-Ionen. Aktionspotenziale können in den sogenannten „erregbaren“ Zellen ausgelöst werden, das sind hauptsächlich Nerven- und Muskelzellen. Sie dauern am Nerv etwa 1 Millisekunde, am Muskel etwa 10 Millisekunden und am Herzmuskel mehrere 100 Millisekunden ([7], Abb. 2).

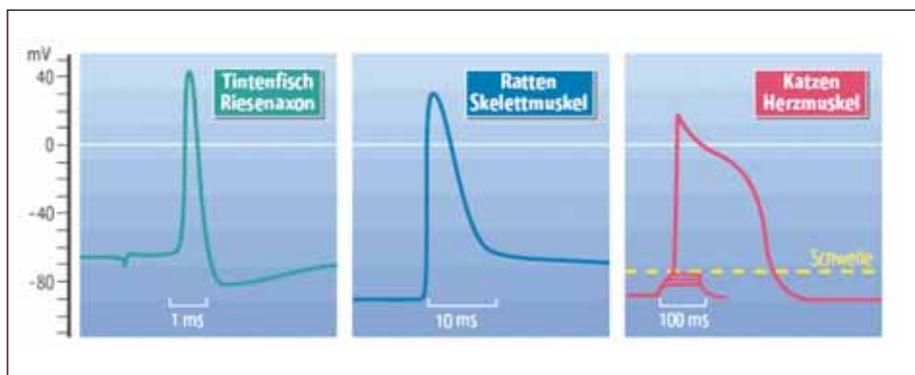


Abb. 2: Gemessene Aktionspotenziale verschiedener erregbarer Zelltypen; Aufgetragen ist das Transmembranpotenzial im zeitlichen Verlauf. Angabe der Zeit in Millisekunden (ms). Die Formen der Potenzialverläufe sind gleich wie bei den entsprechenden Organen des Menschen. (aus [7])

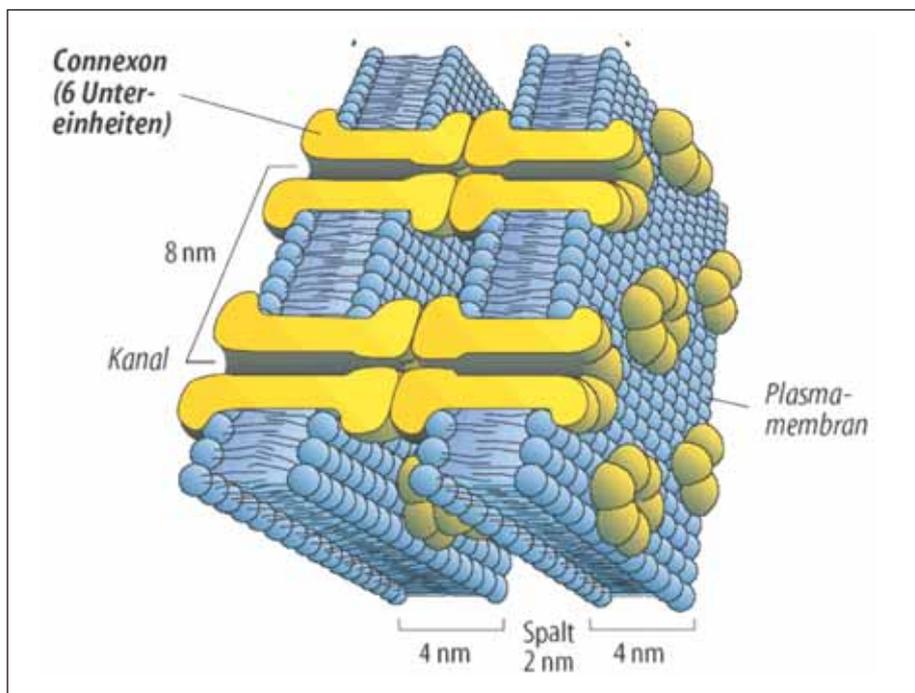


Abb. 3: Schema einer „Gap Junction“ mit mehreren, in die aneinander grenzenden Zellmembranen eingelagerten „Connexonen“; das sind Eiweißmolekülkomplexe, die die elektrische Verbindung zwischen den benachbarten Zellen herstellen. Die Innenräume der Zellen zeigen in der Darstellung nach rechts und links außen. (aus [7])

In sehr langgestreckten Zellen oder solchen mit langen Zellausläufern, wie es typischerweise Nervenzellen sind, kann sich ein Aktionspotential räumlich fortpflanzen. Es tritt hier, anders als bei normalen kleinen Zellen, nur lokal auf und wandert im Membranbereich der Zelle als sogenannte „fortlaufende Erregung“ entlang der Längsachse. Durch diesen elektrischen Mechanismus kann im Körper Information schnell über weite Strecken übertragen werden. Die Übertragung des elektrischen Signals von Zelle zu Zelle findet durch *chemische* Botenstoffe an den Endigungen der Nervenzellen an speziellen Übertragungspunkten, den „Synapsen“, statt. Die Botenstoffe werden per Diffusion über einen winzigen Spalt zwischen den aneinander grenzenden Zellmembranen übertragen. Außerdem kann es, zum Teil auch bei Zellen außerhalb des Nervensystems (beispielsweise im Herzmuskel), zu einer *direkten elektrischen* Informationsübertragung kommen durch massive Ionenströme von einer Zelle zur anderen an speziellen Kontaktstellen zwischen ihnen, den sogenannten „Gap Junctions“ (Abb. 3).

Im Nervensystem hat sich im Laufe der Evolution überwiegend die aufwändigere Informationsweiterleitung über chemische Synapsen durchgesetzt, weil diese viel spezifischer und besser regulierbar arbeiten. Im Gehirn kommen wiederum „Gap Junctions“ relativ häufig vor. Sie ver-

binden meist funktionell zusammenarbeitende Gruppen von Zellen. Die elektrische Informationsübertragung an „Gap Junctions“ findet häufig nicht unmittelbar statt, sondern kann „unterschwellig“ sein (erst von *mehreren* Zellen ankommende Aktionspotenziale lösen in einer Zelle ein neues Aktionspotenzial aus), oder sie kann mit einem „Gleichrichtereffekt“ ablaufen. Es fließt dann ein großer Ionenstrom im Falle einer „eintreffenden“ Depolarisation (Begriff s.o.), aber nur ein kleiner Strom fließt bei einer ebenfalls möglichen „eintreffenden“ ‘Hyperpolarisation’, einer Verschiebung des Membranpotenzials in den negativen Bereich. Dieses sogenannte „nichtlineare“ Verhalten elektrischer Übertragungsstrukturen im Körper könnte für die hier behandelte Fragestellung noch von Bedeutung sein.

Ein Aktionspotenzial ist als *Signalweiterleitungsmechanismus* in seiner Intensität nicht sehr variabel. Es läuft nach dem sogenannten „Alles-oder-Nichts-Prinzip“ ab. Dies bedeutet, dass sich das Membranpotenzial einer Zelle aufgrund eines primären Signals oder aufgrund regelmäßig ablaufender Ionenverschiebungen durch die Membran, ausgehend vom Membranruhepotenzial, relativ schnell in Richtung positiverer Potenzialwerte verschiebt. Ab einem gewissen Schwellenwert („Schwellenpotenzial“ liegt etwa 20 mV positiver als das Ruhemembranpotenzial, also ungefähr bei -60 mV) läuft das Aktionspotenzial dann relativ plötzlich und *unaufhaltsam* – wie weiter oben beschrieben – in einer für den jeweiligen Zelltyp eng festgelegten Art und Stärke ab. Stärkeunterschiede von Reizen, die zum Beispiel körperintern signalisiert werden sollen (wie beispielsweise Schmerzintensitäten oder verschiedene Helligkeiten), können in der Regel also nicht durch die Art oder Höhe eines Aktionspotenzials *weitergegeben* werden. In Nervenfasern werden Aktionspotenziale mit unverminderter Stärke fortgeleitet. Die Leitungsgeschwindigkeit reicht hier je nach Typ der Nervenzelle von unter 1 Meter pro Sekunde bis zu 100 Meter pro Sekunde. Die Physiologie und Regulation der *Herztätigkeit* stellen in dem Zusammenhang eine gewisse Ausnahme dar, da dort besondere Aktionspotenzial-Verläufe eine Rolle spielen.

Reizstärken und -qualitäten werden „digital umcodiert“

Nach dem oben Gesagten muss sich der Organismus eines speziellen Mechanismus bedienen, um die von spezialisierten Zellstrukturen oder Geweben wahrgenommenen Reize adäquat als Körpersignal weiterzuleiten: Information, die in Nerven über größere Entfernung vermittelt werden soll, wird als *Serie von Aktionspotenzialen* mit bestimmter Frequenz – also quasi digital „umcodiert“ – weitergegeben (Abb. 4). Die Frequenz dieser Impulse steigt mit der Größe des *Primärreizes* an, der aber zunächst einmal *überschwellig* sein muss, damit überhaupt etwas passiert. Auch *Reizqualitäten*, wie beispielsweise Geschmackswahrnehmungen, Farben, Gerüche oder Tonhöhen werden in bestimmte Sequenzen von Aktionspotenzialen umgesetzt.

Als erstes Ereignis bei einem solchen Wahrnehmungsvorgang findet an den Rezeptoren (= Sensoren), die Sinnesreize aufnehmen, immer eine relativ langsame, anhaltende Membranpotenzialänderung in den beteiligten Sinneszellen statt. Solche sogenannten „Sensorpotenziale“ oder „Generatorpotenziale“ sind kontinuierlich abgestufte Antworten, das heißt sie bilden mit ihrer Signalhöhe (= Amplitude) die Reizgröße ab (oder bei qualitativen Reizen die Reizqualität) (Abb. 5). Die Sensorpotenziale sind meist depolarisierend (also Verschiebungen vom negativen Ruhemembranpotenzial ggf. bis hin zu positiven Werten), können aber umgekehrt auch hyperpolarisierend sein (zum Beispiel bei der Lichtreizung im Auge). Diese Beschreibungen geben natürlich nur die Grundzüge der Reizwahrnehmung wieder. Bis im Gehirn zum

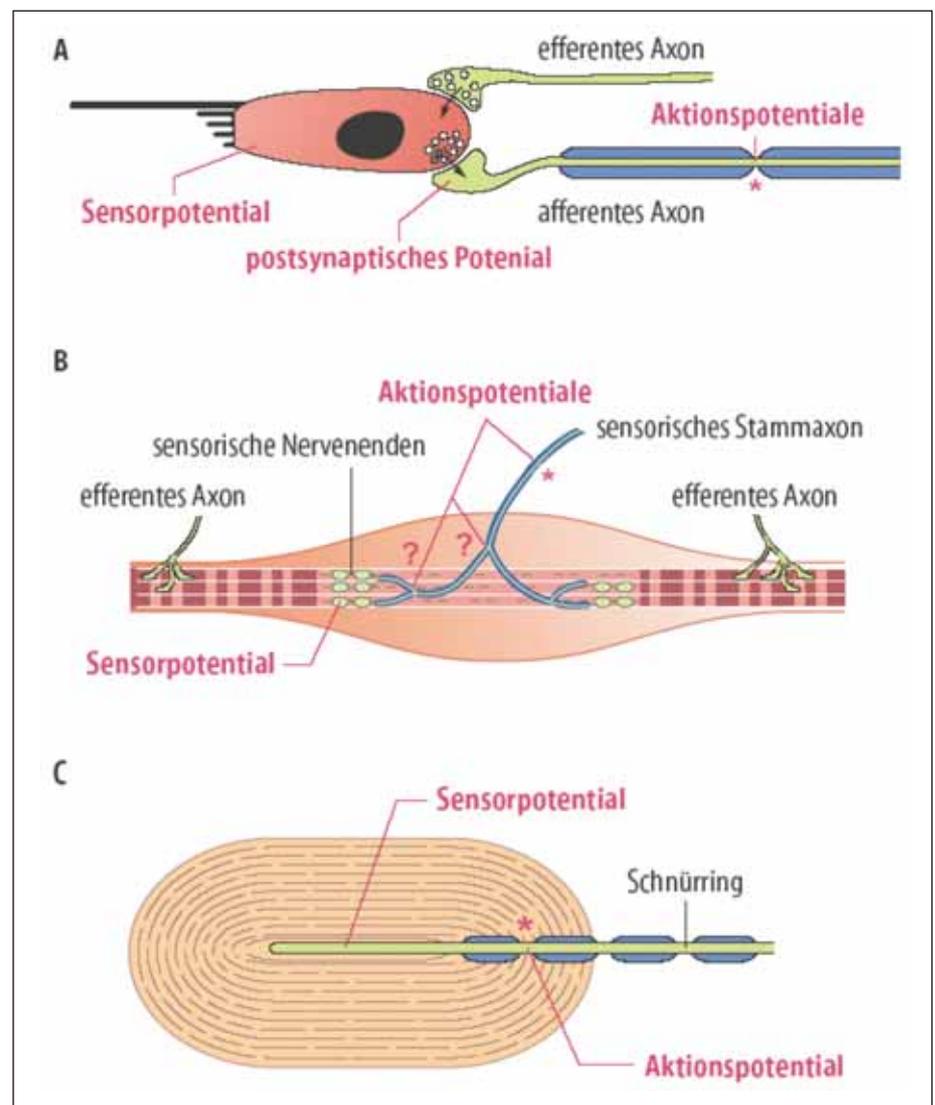


Abb. 4: Verschiedene Sensortypen mit Darstellung der Orte, an denen vermutlich die „Umkodierung“ von Sensorpotenzialen zu Aktionspotenzialen erfolgt.

A Haarzelle aus dem Hörorgan oder dem Gleichgewichtsorgan.

B Muskelspindel des Frosches.

C Drucksensor in der Haut. (aus [7])

Beispiel ein bestimmter Geschmack eindeutig wahrgenommen wird, sind noch wesentlich kompliziertere Umsetzungsprozesse der beteiligten Nervenfasergruppen notwendig. Einige Beispiele für die „Transformation“ genannte Umkodierung von Primärreizen werden in der **Abb. 6** gezeigt.

Auch bei der netzwerkartigen Übertragung von Information an den Synapsen von einer Nervenzelle zur nächsten summieren sich die gewöhnlich von vielen Zellen an einer „Zielzelle“ ankommenden „synaptischen Potenziale“ zu einer langsamen Änderung des Membranpotentials in der „Zielzelle“ auf. Die einzelnen synaptischen Potenziale sind, für sich genommen, in der Regel unterschwellig und bewirken allein nichts. Erst die aufsummierten Potenzialänderungen werden überschwellig, und sie werden dann in der „Zielzelle“ – wie oben für die Sinnesreize beschrieben – in Aktionspotenzialserien für die Weiterleitung entsprechend der Summengröße im zeitlichen Verlauf umcodiert. Die Frequenz solcher Serien ergibt sich von selbst aus der *Steilheit der Depolarisation*, welche wiederum vom Öffnungs- und Schließverhalten der hierfür verantwortlichen Ionenkanäle abhängt, hauptsächlich solcher für Natrium- und Kaliumionen. Auch Gruppenentladungen („Bursts von Aktionspotenzialserien“) sind bei anhaltendem Reiz anstelle von Aktionspotenzialserien hoher Frequenz möglich (siehe **Abb. 6**, Temperatursensor).

Die *maximale Frequenz* von Aktionspotenzialserien ist beim Menschen und bei Wirbeltieren begrenzt durch die sogenannte „absolute Refraktärzeit“, in der nach einem erfolgten Aktionspotenzial wegen der zugrunde liegenden Ionenverschiebungs-Mechanismen kein neues gestartet werden kann. Die Refraktärzeit, in der die Erregungsschwelle zeitweise unendlich hoch liegt, endet etwa 2 Millisekunden nach Beginn eines Aktionspotenzials, so dass die Zelle maximal mit einer Frequenz von 500 Hz erregt werden kann. Normal sind Frequenzen darunter, es kommen aber bei bestimmten Zelltypen kürzere Refraktärzeiten und Aktionspotenzialfrequenzen von bis zu 1000 Hz vor.

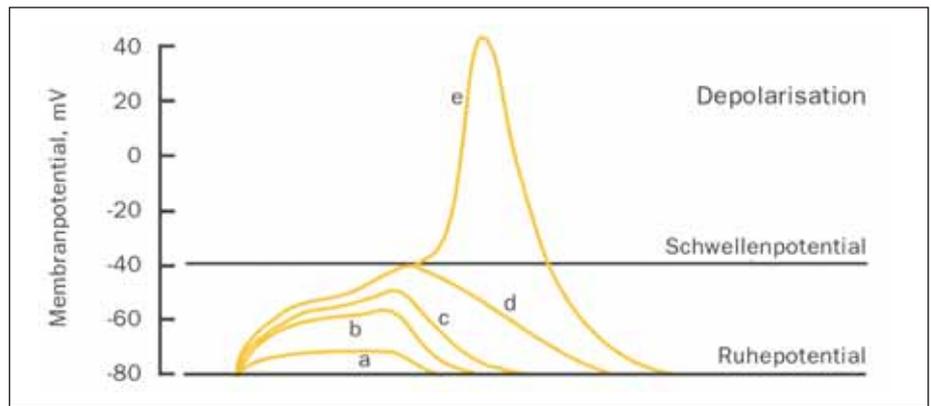
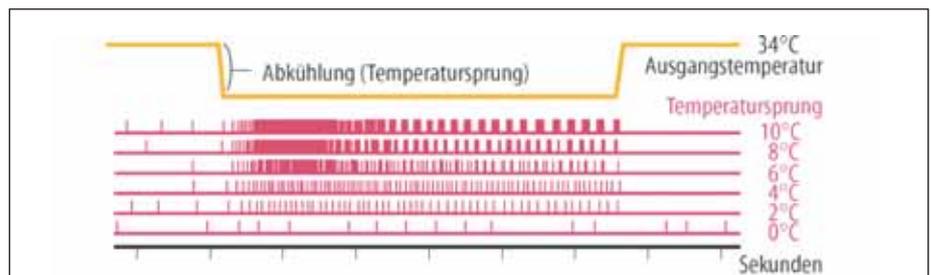
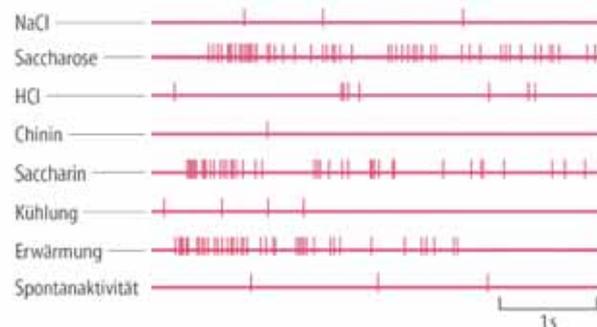


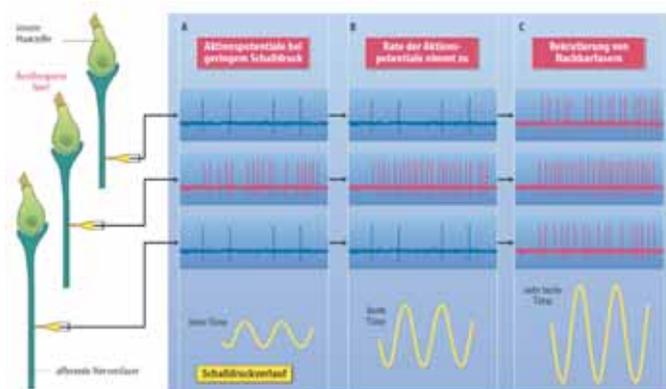
Abb. 5: Generatorpotenziale und Aktionspotenzial eines Drucksensors der Haut. Die Reizung führt bei schwacher Einwirkung zu Sensorpotenzialen, deren Amplitude die Reizstärke codiert (a-d). Ein überschwelliges Sensorpotenzial löst ein Aktionspotenzial (e) aus.



Temperatursensor: Abgestuftes Antwortverhalten eines Kaltsensors in der Hand bei Erniedrigung der Hauttemperatur für 5 Sekunden um den rechts angegebenen Betrag, jeweils ausgehend von 34 °C. Ein senkrechter Strich auf den Linien bedeutet ein Aktionspotenzial in der ableitenden Nervenfasern. (aus [7])



Geschmackssensor: Gemessene Nervenimpulse (Aktionspotenziale) in den ableitenden Nervenfasern bei Reizung der Geschmacksknospen auf der Zunge mit Geschmackssubstanzen oder Temperaturen verschiedener Qualität. Es gibt verschiedene Fasertypen mit bevorzugten Reaktionen auf eine der vier Geschmacksqualitäten „süß“, „salzig“, „sauer“ und „bitter“ sowie Kombinationen davon. (aus [7])



Schallsensor: Kodierung des Schalldrucks im Hörnerv. Bei leisen Tönen werden nur die Sensorzellen gereizt, die am besten auf die vorhandene Frequenz reagieren können (A). Nachdem bei zunehmender Lautstärke (B) die Kodierung durch Zunahme der Aktionspotenzialrate in einer Nervenfasern „ausgereizt“ ist, werden zusätzlich benachbarte Nervenfasern aktiviert (C). (aus [7])

Abb. 6: Beispiele für die Umkodierung von Primärreizen in Aktionspotenzialserien

Gehirnwellen und EEG

Die Großhirnrinde, also der größte Teil unseres Gehirns, beinhaltet überwiegend Neurone (Nervenzellen) vom Typ der nach ihrem Aussehen benannten „Pyramidenzellen“, die anderen werden als „Sternzellen“ zusammengefasst. In ihrem hochkomplizierten Netzwerk laufen alle uns bekannten Denk- und Steuerungsprozesse des Gehirns ab. Mit knopfförmigen Elektroden aus einer Silberlegierung lassen sich von der Kopfhaut des Menschen kontinuierliche elektrische Potenzialschwankungen ableiten, die als „**Elektroenzephalogramm**“ (EEG) bezeichnet werden. Die Frequenzen dieser Schwankungen liegen zwischen 0 und 80 Hz, die Amplituden liegen in der Größenordnung von 1 bis 100 μV (Mikrovolt = Millionstel Volt). Im Wesentlichen spiegeln sich hier die „erregenden synaptischen Potenziale“ (siehe oben) der Pyramidenzellen aufgrund ihrer relativ großen extrazellulären Ströme wider. Praktisch keine Beiträge zum EEG liefern normalerweise die *fortgeleiteten Aktionspotenziale* der Nervenzellen. Aus den an mehreren Stellen gleichzeitig gemessenen Potenzialschwankungen werden fünf verschiedene „Gehirnwellen“-Arten abgeleitet und unterschieden, daneben noch einige krankheitsbedingte „Krampfwellen“, die vor allem bei Epilepsie auftreten. Bei den Gehirnwellen des gesunden Menschen unterscheidet man *Alphawellen* (in Ruhe im Wachzustand), *Betawellen* (bei Sinnesreizen und geistiger Tätigkeit), *Theta-* und *Deltawellen* (im Schlafzustand) sowie *Gammawellen* (bei Lernprozessen). Das EEG ist in Ruhe und vor allem im Schlaf niederfrequent und synchronisiert, bei den anderen Zuständen eher hochfrequent und desynchronisiert (**Abb. 7**). In der Schlafforschung ist

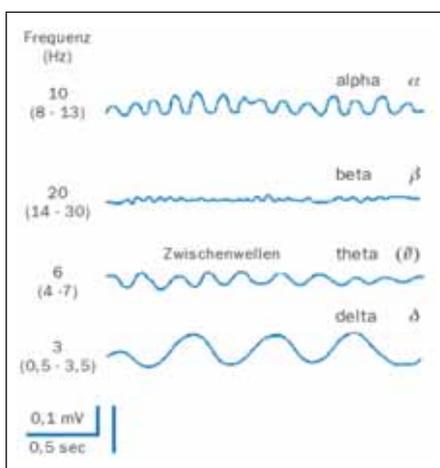


Abb. 7: EEG-Wellenarten, die bei Gesunden vorkommen können

das EEG unerlässlich für die Identifizierung der Schlafstadien.

Auch bei diesem äußerlich messbaren Ausdruck gepulster elektrischer Vorgänge im menschlichen Körper wird die Möglichkeit einer Einflussnahme durch digital gepulste Hochfrequenzsignale von außen seit langem diskutiert. Wie bei allen vorgenannten Beispielen wird bisweilen behauptet, gepulste Funksignale könnten direkt und ohne den Umweg über eine künstlich erzeugte Wärmewirkung (also „athermisch“) auf Signalvorgänge an den Nervenzellen einwirken und so messbare EEG-Veränderungen hervorrufen.

Ist die Beeinflussung körpereigener Informationsströme durch schwache gepulste Funkwellen von außen physikalisch möglich?

Dass eine Beeinflussung der beschriebenen Informationsströme im Körper durch *starke*, von außen angelegte Felder prinzipiell und praktisch möglich ist, steht außer Frage. Vom Notarzt eingesetzte Elektroschockgeräte (Defibrillatoren) zum Beispiel sorgen dafür, dass stehen gebliebene oder „flimmernde“ Herzen wieder anfangen (regelmäßig) zu schlagen. Durch äußere Stimulation mit starken Magnetfeld-Spulen können experimentell Muskelzuckungen hervorgerufen und im Gehirnbereich Parkinson-, Schizophrenie- oder Epilepsiepatienten behandelt werden. Die bei solchen Maßnahmen angewendeten Felder und Ströme haben jedoch weder in ihrer Art, noch von der Frequenz und der Stärke her irgendetwas mit den bei Funkanwendungen eingesetzten Feldern zu tun. Selbst dann nicht, wenn man davon ausginge, dass die in digital gepulsten Funksignalen enthaltenen niederfrequenten Anteile vom Körpergewebe demoduliert werden könnten. So bleibt nach der Betrachtung der grundlegenden Vorgänge der elektrischen Signalübertragung und Fortleitung im Körper die Frage offen, ob es auch einen Mechanismus gibt, über den gepulste Funksignale realistisch betrachtet in das körpereigene Geschehen störend eingreifen können.

Resonanz bei unmodulierten Funkwellen

Da die hier betrachteten Orte des Geschehens, die Zellen in unserem Körper, und die Funkwellen sich ja stofflich nicht „berühren“ können, müssen eventuelle Wechselwirkungen zwangsläufig *elektromagnetischer* Natur sein. Wechselwirkun-

gen solcher Wellen können nur mit elektrisch *geladenem* Material auftreten. Und von elektrisch geladenen Teilchen oder Strukturen war in der vorliegenden Betrachtung ja des öfteren die Rede. Wir befinden uns also wieder beim erwähnten Wasser, bei den Metallionen, den Membranen, den gelösten Eiweißen, Nukleinsäuren, Aminosäuren und sonstigen Bestandteilen lebender Zellen, die alle positive und/oder negative Ladungen aufweisen. Soweit also kein Hinderungsgrund, dass man grundsätzlich irgend einen Einfluss der Trägerwellen der Funksignale (also schon der *ungepulsten* Funkwellen) auf die beschriebenen biologischen Systemelemente und die damit verbundenen Signalvorgänge annehmen könnte. Dabei spielt das „*Resonanzverhalten*“ eine entscheidende Rolle, das die mechanische Vibration der Systemelemente beinhaltet. Die natürlichen Frequenzen solcher Resonanzen spielen sich generell im Mikrowellenbereich ab, in dem auch die Funkfrequenzen liegen.

Einige der genannten Systemelemente werden durch ihre elektrische Ladungsungleichverteilung („Dipolmoment“) an die elektromagnetischen Felder angekoppelt [8]. Dies ist für das Wasser-Dipolmolekül (negative Ladung beim Sauerstoffatom, positive Ladung bei den beiden Wasserstoffatomen) vielleicht noch am anschaulichsten vorstellbar, weil wir wissen, dass Wasser durch Anlegen *starker* Mikrowellenfelder relativ schnell heiß wird (im Mikrowellenofen bei 100 bis 800 Watt mit einer – für die Resonanz hier nur einigermaßen passenden – Frequenz von 2,45 GHz). „Erhitzen“ heißt nichts anderes, als dass die Wassermoleküle ihre Bewegungen (Vibration und Rotation) verstärken, also durch die Ankopplung des Hochfrequenzfelds an die Dipolmoleküle ihre „kinetische Energie“ erhöhen. Dabei spielen fast nur die *elektrischen* Feldkräfte des Mikrowellenfelds eine Rolle. So wie ein Topf Wasser im Mikrowellenofen heiß wird, so würden auch unsere (überwiegend mit Wasser gefüllten) Köpfe heiß, wenn Handys mit 800 Watt senden würden. Sie senden aber im Schnitt nur mit 0,3 Watt, und so passiert zumindest auf diesem Weg nichts, außer dass man dadurch ein warmes Ohr und eventuell eine warme Wange bekommt, dass man sich das Plastikgehäuse des Telefons isolierend auf die warme Haut hält, welches zusätzlich von innen vom Batteriestrom erwärmt wird [9, 10]. Die minimal stärkere

Bewegung der sich ohnehin schon ständig bewegenden Wassermoleküle durch die zusätzlichen 0,3 Watt Sendeenergieeintrag geht in den natürlich vorkommenden geringen Temperaturschwankungen des Körpers praktisch vollständig unter.

Die *quantitative* Abschätzung solcher Resonanzeffekte in kleinen Dimensionen (an Molekülen in ihrer natürlichen Umgebung) – und damit die Frage, ob solche Effekte überhaupt zum Tragen kommen können – ist jedoch in theoretischen Berechnungen wie in praktischen Experimenten äußerst kompliziert und hat letztendlich zu den bekannten gegensätzlichen Meinungen über die mögliche Beeinflussung biologischer Vorgänge durch Funkwellen geführt. Viele theoretische Überlegungen wurden nicht zu Ende gedacht, und viele Experimente wurden mit zu wenig Aufwand, nicht gründlich durchdacht oder unexakt ausgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Dämpfung durch Wasser und der damit verbundene eingeschränkte Energietransfer durch Resonanzmechanismen in Abschätzungen möglicher Effekte nicht immer berücksichtigt wurden.

Dämpfung in molekularen Dimensionen

Wasser hat dämpfenden Einfluss auf Bewegungen. Jeder weiß, wie langsam ein Gegenstand unter Wasser zu Boden sinkt im Vergleich zur Fallgeschwindigkeit in der Luft oder gar im Vakuum. Das ist in molekularen Dimensionen nicht anders. Wassermoleküle sind zudem (auch unter den Biomolekülen) sehr klein und passen sogar in die sehr engen Ionenkanäle der Membranen. Alle Ionen sind in biologischem Gewebe (außer in kristallisierter Substanz) mit einer „Hydrathülle“, also einer Hülle aus Wassermolekülen versehen. In vielen früheren und auch heutigen physikalischen Berechnungen zur möglichen Wechselwirkung von Feldern mit Biomolekülen oder Ionen war man von Bedingungen im Vakuum ausgegangen, von ungedämpften Teilchenkollisionen, oder hatte zumindest der dämpfenden Wirkung des überall vorhandenen Wassers nicht ausreichend Rechnung getragen. So kam es zu einigen groben Fehleinschätzungen des möglichen Ausmaßes von Hochfrequenzfeld-Wirkungen auf biologisches Material. Vakuumbedingungen sind – auch in biologischen Ionenkanälen – eben äußerst unwahrscheinlich.

Die Beeinflussbarkeit von Ionenströmen durch von außen angelegte schwache Felder hoher Frequenz erweist sich daher wegen der Wasserdämpfung und auch rein *elektrisch* betrachtet als sehr unwahrscheinlich. Viel zu groß sind die internen elektrischen Feldkräfte an einer Zellmembran und in Biomolekülen (etwa 10.000.000 V/m, [6]), um einfach Ionenflüsse künstlich umleiten, beschleunigen oder verlangsamen zu können oder um gar die Membranstruktur durch die Umorientierung polarer, eingelagerter Eiweißmoleküle verändern zu können. Mit diesen, auch wegen der sehr kleinen Dimensionen enorm großen internen Kräften müssten die – auch nach neuesten Berechnungen – sehr schwachen induzierten Feldkräfte der von außen eingestrahlten Funkfelder konkurrieren können, wollten sie etwas an den oben beschriebenen biologischen Signalvorgängen verändern. Induktive Kräfte, die für eine effektive Beeinflussung ausreichen, können aber nur von *starken* Feldern relativ *niedriger* Frequenz herrühren. Sie liegen technisch betrachtet weitab von den hier betrachteten Funkfeldern.

Nach neueren zuverlässigen Berechnungen wird es für *unmodulierte Funk- und Mikrowellenfelder* mit Intensitäten unter 100 W/m² (entsprechend einer elektrischen Feldstärke von etwa 200 V/m) für unwahrscheinlich gehalten, dass sie physiologische Vorgänge durch athermische Mechanismen beeinflussen können [11]. In diesen Berechnungen spielt noch eine Reihe anderer Kräfteabschätzungen eine Rolle, deren Darstellung den Rahmen des vorliegenden Artikels sprengen würde. Im Ergebnis wurde kein Mechanismus gefunden, der aus den Funkwellen soviel zusätzliche Energie auf kleine („subzelluläre“) biologische Elemente (wie Zellorganellen oder Moleküle) übertragen könnte, dass damit die Energie der normalen Schwankungen des natürlicherweise vorhandenen „thermischen Rauschens“ (normale Bewegung in mikroskopischen und submikroskopischen Dimensionen bei gegebener normaler Temperatur) überschritten würde. Einzig durch „*Elektrostriktion*“ (Deformation eines dielektrischen Mediums durch ein angelegtes elektrisches Feld) *größerer* Elemente, etwa ganzer Zellen, könnte bei Feldern der genannten Stärke das „thermische Rauschen“ überschritten werden, dieser Effekt wäre jedoch gegenüber den in der Natur vorkommenden Deforma-

tionskräften an Zellmembranen so klein, dass dadurch ausgelöste biologische Effekte unwahrscheinlich wären. Resonanz-Effekte, ein weiterer früher für möglich gehaltener Wirkungsmechanismus, sind nach neuen Berechnungen [11] aufgrund der Dämpfung in wässrigem Milieu vernachlässigbar klein.

Kräfteverhältnisse

Einige Zahlen machen die getroffenen Aussagen zu den Kräfteverhältnissen zwischen Funkfeldern und elektrischen Kräften in und an Körperzellen anschaulicher [12]. Die dahinter stehende Frage lautet: „*Können die durch Funkwellen verursachten Kräfte in dem 'Rauschen' der vorhandenen elektrischen Felder und sonstigen Aktivitäten lebender Zellen überhaupt 'gehört' werden?*“

Eine gute Vergleichsgröße für auftretende Kräfte in Dimensionen von Zellen und Molekülen ist die Einheit „*Pikoneutron*“ (pN), also ein Billionstel (= 10⁻¹²) Newton [N] (1 N ist die benötigte Kraft, um 1 kg Masse in 1 Sekunde auf 1 m/s zu beschleunigen und entspricht ungefähr der Gewichtskraft eines Körpers der Masse 102 g auf Meereshöhe). Ein Kubikzentimeter Wasser wiegt ungefähr 0,01 N. Einige Vergleichswerte für gemessene Kräfte in der Einheit „*Pikoneutron*“ finden Sie in **Tabelle 1**. Vergleicht man hierzu nun die Kräfte, die nach dem Gesetz von Coulomb durch ein *Hochfrequenzfeld am Limit des gültigen ICNIRP Teilkörpergrenzwerts im Bereich Mobilfunk* (2 W/kg, entspricht etwa 45 V/m elektrischer Feldstärke bei 1 GHz) auf ein Zellmembranprotein mit 100 ungleich verteilten Ladungen einwirkt, so lässt sich ein Wert von nur etwa **0,001 pN** ausrechnen. Effekte höherer Ordnung (Dipoleffekte, Quadrupoleffekte, induzierte Dipole) führen zu eher noch kleineren Werten. Andere Vergleiche finden sich in der Einheit der Energie, Elektronvolt (eV) (siehe **Tabelle 2**) bzw. in der Einheit der Leistungsflussdichte (siehe **Tabelle 3**).

Auch diese Zahlen demonstrieren allesamt, wie unwahrscheinlich es aus biophysikalischer Sicht ist, dass die durch schwache Funkwellen verursachten Kräfte im Gesamtensemble der natürlichen elektrischen und sonstigen Aktivitäten lebender Zellen zu irgend einer Veränderung im körperlichen Signalsystem oder bei anderen Körperfunktionen führen. Die Eindringtiefe eines 900-MHz-Mobilfunkfelds

Aktivierung einer „Haarzelle“ (Hörsenzelle im Innenohr)	1 pN
Einzelnes Aktin-Molekül (Eiweiß, das Muskeln kontrahieren lässt)	4 pN
Gewichtseffekt der Erdanziehung auf eine Körperzelle	5 pN
Ionenkanal am Mechano-Rezeptor (Druck-Sinneszelle)	12 pN
Streckung eines DNA-Moleküls um 10 %	20 pN
DNA-Molekül, Bindungskräfte zwischen den beiden Strängen	70 pN
Rezeptor-Ligand-Kräfte (Signalübertragung, z.T. an Membranen)	90 pN

Tabelle 1

Leichte Röntgenstrahlung	10.000 eV	ionisiert Moleküle
Sichtbares Licht	1,5 – 3,3 eV	verbiegt Moleküle
Thermische Energie von Atomen und Molekülen	0,03 eV	lässt Molekülansammlungen zerfallen
Millimeterwellen (z.B. Radar)	0,0001 eV	lässt Moleküle vibrieren
2 GHz (z.B. Mobilfunkgerät)	0,00001 eV	sehr schwache Wirkung auf Moleküle

Tabelle 2

Sonnenlicht am Mittag an der Erdoberfläche	140 mW/cm ²
Normale Leckstrahlung eines Mikrowellenofens am Türspalt	5 mW/cm ²
Wärmeabstrahlung eines menschlichen Körpers	2 mW/cm ²
1 m vor einer 100 W Glühbirne	1 mW/cm ²
Grenzwert Allgemeinbevölkerung Mobilfunkfelder 900 MHz	0,5 mW/cm ²
Grenzwert Allgemeinbevölkerung Mobilfunkfelder 1800 MHz	1 mW/cm ²

Tabelle 3

in Körpergewebe kann mit etwa 3 cm angenommen werden, wobei die ohnehin schon schwache Wirkung von der Körperoberfläche nach innen rapide abnimmt. Der Grenzwert für die Energie, die durch Funkfelder am ganzen Körper absorbiert werden darf, liegt für die allgemeine Bevölkerung bei 0,08 W/kg, für berufsmäßige Exposition bei 0,4 W/kg. Selbst dieser erhöhte Wert für den Arbeitsbereich bedeutet anschaulich, dass die damit beschriebene Energiemenge 10 Tage bräuchte, um einen Eiswürfel (0 °C) zu Wasser (0 °C) zu tauen [12].

Elektrische Demodulation in biologischen Systemen?

Was bleibt, ist ein Paradoxon und – die Frage nach der Demodulation (vergleiche Abschnitt 3.1.3). Ein Paradoxon deshalb, weil durch eine Reihe von ernstzunehmenden Forschungsergebnissen *biologische* Effekte – jedoch keine gesundheitlich relevanten Effekte – durch hochfrequente elektromagnetische Felder, zum Teil auch durch relativ schwache Felder, aufgezeigt wurden. Ein reproduzierbarer, eindeutiger und einen Effekt vorhersagender biophysikalischer Wirkungsmechanismus, der in der Lage ist, von schwachen Hochfrequenzfeldern abhängige biolo-

gische Wirkungen zu erzeugen, wurde jedoch bis heute nicht gefunden [12], [13]. Fast eine letzte Erklärungsmöglichkeit für nicht widerlegbar gezeigte biologische Wirkungen wäre die Demodulation der niederfrequenten „Pulsanteile“ gepulster Funksignale, womit wir wieder zur eingangs gestellten Frage zurückkehren. Schon vor langer Zeit wurde allerdings in sehr aufwändig und gründlich durchgeführten – und daher überzeugenden und weithin anerkannten – Studien an Pflanzenzellen nachgewiesen, dass in lebenden Zellen eine Demodulation hochfrequenter elektromagnetischer Felder oberhalb einer Grenzfrequenz in der Nähe von 10 MHz (also weit unterhalb der bei modernen Funkanwendungen verwendeten Frequenzen) nicht mehr stattfindet [14]. Später durchgeführte weitere Studien unterstützen diese Erkenntnisse [15], [16].

In seiner entsprechenden Ausarbeitung weist Jiri Silny darauf hin, dass aus seinen Versuchen an 13 Probanden mit pulsmodulierten Mikrowellen kein Hinweis auf eine äußere Beeinflussung der Erregung von Skelettmuskeln oder Nerven hervorging [17]. Hierbei wurde untersucht, ob von außen am Oberarm mit einer Koaxialelektrode applizierte Mikro-

wellenpakete (900 MHz oder 1800 MHz; bis zu 100 ms Burstlänge; bis zu 100 W Spitzenleistung am Antennenausgang an der Hautoberfläche) einen so großen Beitrag zum Membranpotenzial der Muskel- oder Nervenzellen induzieren können, dass es zu überschwelligem Erregungen kommt. Diese wären dann als direkt oder indirekt induzierte Muskelzuckungen messbar. Die Resultate zeigten, dass solche überschwelligem Erregungen durch die gepulsten Hochfrequenzfelder nicht zustande kamen. Auch mit einer verfeinerten Methode wurden keine durch Mikrowellen verursachten Zellerregungen festgestellt. Dabei wurde direkt nach einem gepulsten Hochfrequenzfeld ein Stromimpuls verabreicht, der diesmal eine messbare, submaximale Erregung des jeweiligen Nervs oder Muskels einleitete. Auch geringfügige Beiträge des Hochfrequenzfeldes zum Membranpotenzial der Zellen hätten bei diesen Tests in Form von Modifikationen der gemessenen Erregungsstärken zutage treten müssen. Da solche Modifikationen jedoch in keinem Fall beobachtet wurden, schließt Silny aus seinen Ergebnissen, dass „die applizierten Mikrowellenpakete, falls überhaupt, nur einen Beitrag unter ca. 4 mV zur Membranspannung aufbauen können“. Eine

solch geringe Variation würde in der gesamten Spanne an Membranpotenzialen von etwa -90 mV bis $+40$ mV, die eine erregbare Zelle immer wieder durchläuft, vollkommen als normale Hintergrundschwankung untergehen. Das Erreichen von Schwellenpotenzialen bliebe damit unbeeinflusst, und somit hätte der eventuell induzierte, geringe Beitrag zum Membranpotenzial keine biologische, und schon gar keine gesundheitliche Relevanz.

Trotz dieser klaren Befunde ist man auch gegenwärtig noch in einem aufwändigen und gut geplanten Projekt damit beschäftigt zu untersuchen, ob Demodulation modulierter Funkwellen in tierischem oder menschlichem Gewebe vorkommen kann [18], [19]. Allerdings werden hier Gewebeprobe oder Zellsuspensionen als Untersuchungsobjekte eingesetzt. Dabei spielt der weiter oben erwähnte „Gleichrichtereffekt“ an den zum Beispiel in Nervengewebe vorkommenden „Gap Junctions“ wieder ganz aktuell eine Rolle. Auf die biologischen Möglichkeiten der Demodulation wird im Abschnitt 3.1.3 genauer eingegangen. Letztlich bleibt abzuwarten, ob dieser Ansatz den ausstehenden Nachweis für einen plausiblen Wirkungsmechanismus erbringen wird. Bislang jedenfalls kann nicht davon ausgegangen werden, dass die gepulsten Vorgänge im menschlichen Körper wirkliche Angriffspunkte für gepulste elektromagnetische Felder bieten.

Literatur/Internet-Links

Die Abbildung 1, 2, 4 und die untere Abbildung auf Seite 54 wurden mit freundlicher Genehmigung von Springer Science and Business Media Abb. 3 mit freundlicher Genehmigung der Rockefeller University Press aus [7] entnommen.“

- [1] Wiart, J., Dale, Ch., Bosisio, A.V., Le Cornee, A.: Analysis of the influence of the power control and discontinuous transmission on rf exposure with GSM mobile phones. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 42, No. 4, November 2000
- [2] Vecchia, P., Ardoino, L., Bowman, J.D., Cardis, E., Mann, S., Wiart, J.: Radio-frequency exposure of mobile phone users – the activity of the INTERPHONE study group. In: Proceedings of the 5th International Congress of the European BioElectromagnetic Association (EBEA), Helsinki, ISBN 951-802-440-5, 6. – 8. September 2001
- [3] European Telecommunication Standard ETS 300 577, 15th Edition: Digital cellular telecommunications system (Phase 2); Radio transmission and reception (GSM 05.05 version 4.23.1), ETSI, 1999
- [4] Liesenkötter, B.: Vergleich der digitalen Modulation des GSM-Mobilfunks mit den Synchronimpulsen von TV-Sendern. Newsletter 2/2004, 34-39, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2004
- [5] Müller, K.-O.: Angst vor steilen Flanken? Newsletter 2/2004, 40-41, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2004
- [6] Glaser, R.: Biophysics. 1. Auflage, Berlin, Heidelberg [u.a.], Springer-Verlag, 2001
- [7] Schmidt, R.F., Thews, G., Lang, F.: Physiologie des Menschen. 28. Auflage, Berlin, Heidelberg [u.a.], Springer-Verlag, 2000
- [8] Adair, R.K.: Vibrational resonances in biological systems at microwave frequencies. Biophys. J. 82, 1147-1152, 2002
- [9] Oftedal, G., Straume, A., Johnsson, A.: Wie kommt es zur Erwärmung der Haut durch Handys? Newsletter 1/2004, 12-15, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2004
- [10] Straume, A., Oftedal, G., Johnsson, A.: Skin temperature increase caused by a mobile phone: a methodological infrared camera study. Bioelectromagnetics 26, 510-519, 2005
- [11] Adair, R.K.: Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation. Bioelectromagnetics 24, 39-48, 2003
- [12] Valberg, P.: Modulated RF energy: Mechanistic viewpoint on the health implications. Vortrag beim „WHO Workshop on Base stations & wireless networks: Exposure & health“, 15.-16. Juni 2005, WHO Genf, http://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/valberg_bsw.pdf
- [13] Foster, K.R.: The mechanism paradox. In: Bioelectromagnetics: Current Concepts. S. Ayrapetyan, Armenia M. Markov, USA, Hrsg., Springer (NATO Science Series), Kluwer Academic Publishers, Niederlande, 2006
- [14] Pickard, W.F., Barsoum, Y.H.: Radio-frequency bioeffects at the membrane level: Separation of thermal and athermal contributions in the characeae. J. Membrane Biol. 61, 39-54, 1981
- [15] Silny, J.: Gepulste Funkwellen. Wirkungsmechanismen niederfrequenter gepulster Mikrowellen im Organismus. Informationsschrift im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004, <http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/funkwellen/pulswellen.pdf>
- [16] Silny, J.: Influence of pulse-modulated GHz microwaves on the excitation of human nerves and muscles compared with continuous wave exposure. Vortrag beim Workshop der Aktion COST281 der EU „Do sinusoidal versus non-sinusoidal waveforms make a difference?“, 17.-18. Februar 2005, ETH Zürich, <http://www.cost281.org/documents>.
- [17] Silny, J.: Pulsmodulierte Mikrowellen und ihre Wirkungen auf den Menschen. Newsletter 2/2006, 8-18, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2006
- [18] Mobile Telecommunications and Health Research (MTHR) Programme (Großbritannien): Zur Zeit laufendes Projekt „Nonlinear and Demodulation Mechanisms in Biological Tissue“. <http://www.mthr.org.uk>
- [19] Ahmed, I., Excell, P.S., Abd-Alhameed, R.A.: Is a rectifying junction essential for demodulation of modulated waveforms in tissue? Abstract Book 'Bioelectromagnetics 2005', Dublin, Ireland, 289-291, 2005, <http://www.bioelectromagnetics.org>

3.1.2 Biophysikalische Primärreaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder

Roland Glaser

Um den öffentlich diskutierten Befürchtungen zum „Elektrosmog“ eine wissenschaftlich fundierte Antwort geben zu können, sind grundsätzlich drei Ansätze möglich: theoretische Modelle zum Wirkungsmechanismus sowie experimentelle und epidemiologische Untersuchungen.

Trotz jahrzehntelanger Bemühungen gibt es bisher auf keinem dieser Wege eine biophysikalisch vertretbare Vorstellung über eine mögliche nicht-thermische Wirkung hochfrequenter Felder im Intensitätsbereich gültiger Grenzwerte. Da jedoch die Wissenschaft prinzipiell die Nicht-Existenz eines Phänomens nicht beweisen kann, bleibt immer ein Zweifel.

Unbefriedigend bleibt die häufig angewendete Methode, die Auslösung einer Reaktion durch HF-Felder einfach zu postulieren und die Folgeprozesse als „Mechanismus“ der Wirkung zu bezeichnen, ohne den Primärprozess zu klären.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die primären Prozesse der Umwandlung der HF-Energie in molekulare Reaktionen. Zu unterscheiden sind thermische und nicht-thermische, ionisierende und nicht-ionisierende Effekte. Geht es darum, wie der Körper eines Tieres oder Menschen als HF-Antenne wirken könnte, ist die Wellenlänge von Interesse. Geht es darum, wie die Schwingung am Molekül angreifen könnte, ist die Quantenenergie von Bedeutung. Es wird näher darauf eingegangen, welche Mechanismen denkbar, welche auszuschließen sind und worauf weitere Forschung konzentriert werden sollte.

Das eigentliche Problem

Haben die elektromagnetischen Felder des Mobilfunks oder anderer technischer Quellen unserer Umgebung schädliche Einflüsse auf unsere Gesundheit? Diese Frage, obgleich neu in ihrer Aktualität, beschäftigt Ärzte und Naturwissenschaftler schon seit über hundert Jahren. Der französische Erfinder und Arzt Jacques Arsène d'Arsonval (1851-1940) publizierte bereits 1896 seine Feststellung, wonach HF-Felder nicht in der Lage sind, Nerven und Muskeln zu reizen. Der deutsche Arzt Karl Franz Nagelschmidt formulierte 1906 den Begriff „Diathermie“ und erkannte damit die therapeutische Wirkung thermischer Effekte hochfrequenter Felder, die bis heute als „Kurzwellentherapie“ bei verschiedenen Gelenkerkrankungen verwendet wird [Rowbottom u. Susskind 1984].

Man stellte bald fest, dass bei Rundfunktechnikern in Sendeanstalten, die starken hochfrequenten Feldern ausgesetzt waren, vegetative Störungen auftraten – damals als „Senderkrankheit“ oder „Kurzwellenkater“ bezeichnet. Frühzeitig erkannte man, dass es sich auch dabei offensichtlich um „eine primär elektrische Allgemeinerwärmung des gesamten Organismus handelt, die ohne thermometrisch grob nachweisbar zu sein die Re-

gulation vor eine eigentümliche Aufgabe stellt.“ [Schaefer u. Stachowiack 1946].

Heute ist dieses Problem nicht mehr nur eine Frage des Arbeitsschutzes weniger Funktechniker. Die Befürchtung gesundheitlicher Schäden durch hochfrequente elektromagnetische Felder technischen Ursprungs beunruhigt vielmehr große Teile der Bevölkerung. Dabei handelt es sich nicht um intensive Expositionen, wie sie in Sendern und anderen großtechnischen Anlagen auftreten könnten, sondern um Felder mit weit geringerer Intensität, etwa solche vom Handy am Ohr oder durch einen nahen Sendemast. Das Unwort „Elektrosmog“ wurde geboren, was einer Verurteilung ohne Indizien gleichkommt.

Drei mögliche wissenschaftliche Ansätze zur Lösung des Problems

Wie kann man dieses Problem lösen, wie kann man wissenschaftlich fundierte Schutzmaßnahmen ergreifen, die Sicherheit garantieren und auch dann noch Bestand haben, wenn sich unser biomedizinischer Kenntnisstand weiter entwickelt?

Naheliegender ist zunächst die Frage an den Biophysiker: Wo könnten diese Felder angreifen? Wie könnte man sich ihre Wirkungsweise auf das biologische System

vorstellen? Die Antwort darauf, kurz gefasst: Wenn die Feldstärke genügend stark ist, um viele Zehnerpotenzen größer als die eines Handys am Ohr, dann könnten Dipole in Molekülen und Zellen erzeugt und bewegt werden. Bei geringeren Intensitäten bleibt nur noch die Erwärmung.

Zu diesem Schluss ist man bereits vor einem Jahrhundert gekommen (siehe oben!). Tausende von Publikationen bestätigen inzwischen diese Aussage. Und doch kann sich der Theoretiker irren. Vielleicht werden ihn neue Erkenntnisse der schnell fortschreitenden Wissenschaft dereinst eines Besseren belehren? Vielleicht übersieht er Mechanismen die auch bei geringen Feldstärken auftreten können und sich als „nicht-thermisch“ erweisen?

Probieren geht über Studieren! Man wählt deshalb im zweiten Schritt das Experiment: Zellkulturen, Tiere, ja in gewissen Grenzen sogar freiwillige Probanden werden künstlich exponiert und auf mögliche Feldwirkungen hin untersucht. Damit begibt man sich allerdings auf ein vieldimensionales Parameterfeld: Frequenz, Pulsation, Modulation, Intensität des Feldes können variiert werden, andererseits kann man nach genetischen, bio-

chemischen, zytologischen, physiologischen, psychologischen Parametern fragen, kann diese an diesem oder jenem Versuchsobjekt oder in einigen Fällen sogar am Menschen testen. Die Anzahl möglicher Kombinationen geht ins Unermessliche. Ist das Resultat einer Studie negativ, so bleibt die Frage: Aber hätte man nicht vielleicht bei der Wahl eines anderen Parameters etwas gefunden?

Vielleicht hilft der dritte Ansatz: Gibt es in der Bevölkerung überhaupt Hinweise darauf, dass die häufige Nutzung des Handys oder die Nähe des Wohnorts an einer Sendeantenne gesundheitliche Schäden erzeugen? Haben Handy-Nutzer häufiger Krebs („Kohortenstudie“), oder umgekehrt gefragt: Finden sich unter den Patienten im Krebs-Register häufiger Handy-Nutzer („Fallkontroll-Studie“)? Auch dieser Ansatz hat seine Grenzen: Zum Glück sind Hirntumoren, Kinderleukämie und ähnliche Krankheiten relativ selten. Auch bei der Erfassung großer Bevölkerungsgruppen sind die Zahlen der tatsächlich Betroffenen gering und damit die Unsicherheiten der Aussage groß. Wäre der Effekt stark, wie etwa beim Zusammenhang zwischen Rauchen und Lungenkrebs, dann ließe er sich leicht nachweisen. Doch so konnten epidemiologische Erhebungen bisher keinen überzeugenden Nachweis für einen Zusammenhang von HF-Feldern mit der Häufigkeit dieser Erkrankungen erbringen.

Die Notwendigkeit eines biophysikalischen Modells

Da die Wissenschaft prinzipiell nicht beweisen kann, dass ein Phänomen nicht existiert, bleibt immer ein Zweifel. Die meisten Arbeiten enden mit dem Satz: „Weitere Forschung ist nötig!“. Doch Forschung kostet viel Geld; Experimente sind teuer und epidemiologische Erhebungen am teuersten. Auch wenn man von dem Biophysiker nur verlangen kann, eine theoretische Erklärung für solche Effekte zu geben, die experimentell tatsächlich verifiziert wurden, die also offenbar tatsächlich existieren, so sind doch auch hypothetische Denkmodelle nützlich, die zunächst vielleicht nur auf „Hinweisen“ oder unsicheren „Vorabfindungen“ basieren.

Eine vorausschauende Theorie könnte helfen die Planung des Experiments zu optimieren, indem sie aus der oben genannten Vielzahl der Parameter die-

jenigen auswählt, die voraussichtlich den Effekt optimal zeigen, die folglich zur Verifizierung bzw. Falsifizierung der Hypothese führen könnten. Realistische Modelle müssten außerdem in der Lage sein, prinzipielle Fragen zu beantworten, etwa die nach den immer wieder postulierten Frequenz- oder Amplituden-Fenstern einer Wirkung. Ohne Kenntnis des Mechanismus ist es ferner nicht möglich, von einem gefundenen Effekt auf einen anderen bei veränderten Parametern zu schließen.

Ferner ist es allein aus Kenntnis des Wirkungsmechanismus überhaupt erst möglich einen Parameter zu definieren, der als Maß für die Dosis geeignet erscheint. Der im HF-Bereich derzeit verwendete SAR-Wert basiert auf der Vorstellung von einer thermischen Wirkung. Wäre die Wirkung akkumulativ, wie im Falle ionisierender Strahlung, bei welcher Mechanismus und Wirkung genau bekannt sind, dann müsste man die russische Dosisbestimmung anwenden, die als Dosis nicht W/kg, sondern W/kg-Expositionszeit, also genau genommen: J/kg verwendet. Doch dafür sprechen bisher keine Befunde. Was nützt es jedoch, immer bessere Dosimeter zu bauen, wenn noch unklar ist, welcher Parameter überhaupt geeignet ist, als Dosis zur Charakterisierung der Wirkung hochfrequenter Felder auf biologische Systeme zu dienen?

Biophysikalische Grundlagenforschung zu möglichen Feldeffekten und theoretische Berechnungen sind also notwendig, auch wenn die oben genannten Irrtümer dabei nicht auszuschließen sind.

Was heißt eigentlich Wirkungsmechanismus?

Das Grotthus-Draper-Prinzip der Biophysik besagt, dass bei irgend einer physikalischen Einwirkung auf ein System ausschließlich die im System tatsächlich absorbierte Energie wirksam ist. Im Falle biologischer Wirkung ist es dabei gleichgültig, ob diese zum Energiehaushalt desselben beiträgt, oder lediglich als Informationsquelle einen Rezeptor anregt [Glaser 1996, 2000]. Eine harte Röntgenstrahlung hoher Quantenenergie, die den Körper völlig durchdringt und teilweise wieder verlässt, ist zum Beispiel weniger effektiv als eine solche geringerer Quantenenergie, welche eine dichte Kette von Ionisationen hinterlässt. Ausgangspunkt

einer jeden Hypothese zur Wirkung eines beliebigen physikalischen Faktors auf das lebende System muss folglich immer zuerst die Frage nach Art und Effektivität der Energieabsorption sein. Dieser biophysikalische Primärschritt kann in Folge entweder im thermischen Rauschen untergehen oder eine Kette weiterer Reaktionen auslösen.

In den Systemen biologischer Informationsübertragung und -verarbeitung sind inzwischen zahlreiche Signalketten mit molekularen Verstärkereigenschaften bekannt. Der Bruch eines DNA-Stranges, wenn er nicht repariert wird, kann zum Beispiel zur Krebsentstehung oder zu Missbildungen führen. Die Anregung eines einzigen Rhodopsin-Moleküls im Auge, das über eine Kaskade von Folgeprozessen einen optischen Reiz auslöst, kann eventuell physiologische oder psychologisch erfassbare Folgen haben. Beispiele solcher Verstärkermechanismen gibt es unzählige. Mehr und mehr davon werden mit fortschreitender Forschung bekannt. Aus solchen Signalketten lassen sich leicht „biologische“ Mechanismen der Einwirkung eines Agens ableiten.

Häufig postuliert man einfach die Auslösung einer dieser Reaktionskaskaden durch den Einfluss von HF-Feldern und bezeichnet die anschließenden Folgeprozesse als „Mechanismus“ der Wirkung. Als Beispiel sei die Hypothese zum Einfluss von HF-Feldern auf das Regulationssystem der Sauerstoffradikale (ROS) in biologischen Zellen genannt [Liburdy und Vanek 1985, Scott 1992, Oktem et al. 2005, Koyu et al. 2005, Zmyslony et al. 2004, Lantow et al. 2006]. Unabhängig davon, dass selbst bei diesen Reaktionen ein möglicher gesundheitlicher Aspekt noch hypothetisch ist, bleibt die Frage völlig unberücksichtigt, wie das HF-Feld physikalisch überhaupt auf Radikale einwirken könnte. Es wird also eine Kette möglicher Wirkungen konstruiert, ohne das Anfangsglied, nämlich den physikalischen Primärprozess, zu hinterfragen und zu klären, ob die eingestrahlte HF-Energie überhaupt in der Lage ist, eine solche Kaskade auszulösen. Tatsächlich sind nicht so sehr die biologischen Folgereaktionen strittig, als vielmehr die möglichen auslösenden biophysikalischen Primärprozesse.

In Hinblick auf viele populistische Argumentationen kann dieser Aspekt gar nicht

oft genug unterstrichen werden. Der vorliegende Beitrag soll sich deshalb ausschließlich auf biophysikalische Mechanismen konzentrieren, nämlich auf die primären Prozesse der Umwandlung der Energie des HF-Feldes in molekulare Reaktionen. Wenn im Folgenden von „Mechanismus“ die Rede ist, geht es immer genau um diese biophysikalischen Primärprozesse, nicht um die Ketten biologischer Folgereaktionen.

Was sind „thermische“, was „nicht-thermische“ Mechanismen der Wirkung hochfrequenter Felder?

Die Begriffe „thermisch“ und „nicht-thermisch“ (oder „athermisch“) werden in der Literatur sehr unterschiedlich gebraucht [Glaser 2005]. Man spricht von „nicht-thermischen“ Effekten, wenn das Feld so schwach ist, dass mit einer Erwärmung des biologischen Objektes durch die Exposition nicht zu rechnen ist [Geletyuk et al., 1995; Kwee et al., 2001; Phillips et al., 1998; Preece et al., 1999; Weisbrot et al., 2003]. Andere Autoren nennen Effekte „nicht-thermisch“, wenn während der Exposition keine Erwärmung gemessen werden konnte, oder wenn eine gute Thermostatierung dies auszuschließen scheint [Bohr and Bohr, 2000; Byus et al., 1988; Leszczynski et al., 2002; Markkanen et al., 2004]. Wieder andere vergleichen die exponierte Probe mit einer solchen, die anderweitig auf die gleiche Temperatur aufgeheizt wurde. Als „nicht-thermisch“ identifiziert man dann Effekte der HF-erwärmten Probe, die bei konventioneller Erwärmung nicht auftreten [Cao et al., 1995; dePomerai et al., 2000; Peinnequin et al., 2000; Velizarov et al., 1999; Allis et al., 1987]. Bei diesen Definitionen bleiben allerdings die Fragen offen: Hat man nicht vielleicht kleinste Erwärmungen übersehen? Reicht die Empfindlichkeit des verwendeten Thermometers oder Thermistors aus? Ist eine Erwärmung durch ein HF-Feld im biologischen Gewebe gleichzusetzen mit einer solchen in einem Thermostat?

Im Unterschied zu dieser Art der Begriffsbestimmung lautet die biophysikalische Definition des Begriffes „nicht-thermisch“, auf die wir uns im Folgenden beziehen wollen, anders: *Ein Effekt ist dann nicht-thermisch, wenn unter dem Einfluss eines Feldes solche Veränderungen entstehen, die nicht durch eine Temperaturerhöhung erklärbar sind* [Fröhlich 1982]. Diese De-

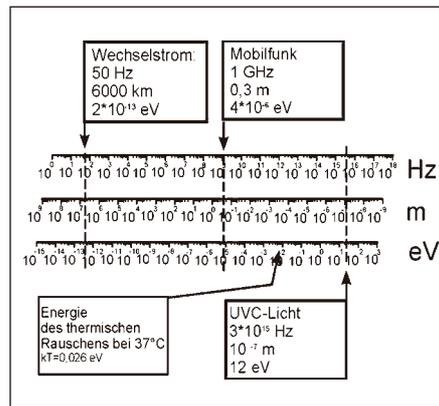


Abb. 1: Die Qualität elektromagnetischer Schwingungen lässt sich als Frequenz [Hz], Wellenlänge [m] oder auch Quantenenergie [eV = Elektronenvolt] angeben. Diese drei Größen sind durch Lichtgeschwindigkeit und Planck'sche Konstante ineinander umrechenbar. Das Spektrum, von den langwelligen Schwingungen des industriellen Wechselstroms über die Frequenzen des Mobilfunks zum Licht, UV und letztlich den Röntgen- und Gamma-Strahlen umfasst viele Zehnerpotenzen. Exemplarisch sind für Wechselstrom, Mobilfunk und UVC-Licht die Parameter angegeben. Bei den 12 eV dieses harten UV-Lichtes liegt die Grenze zu den „ionisierenden“ Strahlen, die hier nicht verzeichnet sind. Zusätzlich ist die Energie von 0,026 eV angegeben, welche das thermische Rauschen charakterisiert, d.h. die durchschnittliche Energie, mit der sich bei 37 °C die Moleküle thermisch bewegen.

finition hebt also auf den Mechanismus ab ohne dabei die Erwärmung zu berücksichtigen. Da jede Energieumwandlung aus Gründen der Thermodynamik letztlich in Wärme endet, ist eine Temperaturerhöhung schließlich unvermeidlich. Um ein technisches Beispiel zu nennen: Der Effekt eines Elektromotors besteht natürlich nicht in der Wärmelieferung, obgleich er sich während des Betriebes deutlich erwärmt.

Diese beiden Definitionen führen miteinander zu gegensätzlichen Einschätzungen: Dielektrophorese, zum Beispiel (Abb. 2), als biophysikalisch eindeutig „nicht-thermischer“ Effekt von HF-Feldern geht mit einer beträchtlichen Erwärmung des Systems einher, würde also entsprechend der konventionellen Definition „thermisch“ sein. Andererseits müsste man die molekularen Mechanismen der Wärme-rezeption vieler Tiere nach der allgemeinen Definition als „nicht-thermisch“ bezeichnen, denn ihre Schwellenwerte liegen zumeist unterhalb der Empfindlichkeit technischer Thermometer [Glaser 2005].

Mögliche Besonderheiten gepulster oder amplitudenmodulierter Felder

Es wurde eingangs bereits erwähnt, dass

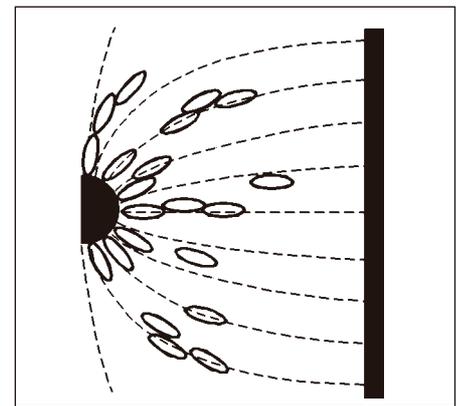


Abb. 2: Die dielektrophoretische Sammlung von Hefezellen in einem inhomogenen elektrischen Wechselfeld das zwischen einer abgerundeten (links) und einer flächigen (rechts) Elektrode ausgespannt wird. In Lösungen geringer Leitfähigkeit bündeln die Zellen das Feld, erhöhen die lokale Inhomogenität desselben und ziehen sich dadurch gegenseitig an. Je nach Frequenz und dielektrischen Eigenschaften kann die Dielektrophorese positiv (Bewegung in Richtung hoher Feldstärke) oder negativ (entgegengesetzte Bewegung) sein [Nach Glaser 2000].

zwischen der Wirkung hoch- und niederfrequenter Felder deutlich zu unterscheiden ist. Muskel- und Nervenerregungen erfordern niederfrequente Felder oder Gleichspannungspulse und sind ab 100 kHz kaum noch auslösbar. Dies liegt einmal an der dielektrischen Eigenschaft der Zellmembran, die spätestens ab 10 MHz kapazitiv überbrückt wird und zum anderen an der Refraktärzeit (die Zeit nach einem Reiz, in der nicht erneut auf einen Reiz reagiert werden kann) erregbarer Membranen, die in der Größenordnung von Millisekunden liegt [Glaser 1996, 2000].

Wenn demnach das Feld eines Mobiltelefons mit einer Frequenz im GHz-Bereich diese Prozesse nicht auslösen kann, dann bleibt die Frage, ob niederfrequente Effekte nicht vielleicht als Ergebnis einer Demodulation hochfrequenter Felder auftreten könnten (zu Grundlagen der Modulationsverfahren siehe Abschnitt 2.1.3). Wenn überhaupt, so könnte dies höchstens bei modulierten bzw. gepulsten Schwingungen erfolgen. Das wären zum Beispiel die Amplitudenschwankungen des UMTS-Signals oder die 217-Hz-Pulse im GSM-System.

Unter Beachtung der oben dargelegten Unterscheidung zwischen biophysikalischem Primärmechanismus und biologischen Folgereaktionen muss auch hier zwischen einer physikalischen und einer biologischen Demodulation unterschied-

den werden. In Abschnitt 3.1.3 wird erläutert, dass bei Einhaltung der geltenden Grenzwerte bisher keine der theoretisch denkbaren Demodulationsarten nachgewiesen wurde und auch theoretische Überlegungen eine Demodulation als sehr unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Bedenkt man, dass jedes Wellenpaket eines GSM-Pulses etwa eine Millionen Schwingungen enthält, also 10^6 Einzelereignisse, die jedes für sich eine molekulare Wirkung ausüben könnten, dann ist das modulierte Feld bezüglich des biophysikalischen Primäreffektes zu behandeln wie ein kontinuierliches Feld. Gibt es keinen Wirkungsmechanismus eines kontinuierlichen Feldes entsprechender Intensität und Frequenz, dann kann es auch keine biologische Modulation einer Pulsfolge geben, vorausgesetzt, man bezieht sich auf den SAR-Wert des Pulses selbst und nicht auf das zeitliche Mittel der Pulsfolge.

Übrigens hat kürzlich ein Vorschlag von Q. Balzano, mögliche Demodulationen von HF-Feldern in biologischen Systemen elektronisch nachzuweisen [Balzano 2002], zu einer kontroversen Diskussion geführt [Balzano 2003 a, b, Marino 2003, Adair 2003], die letzten Endes zeigte, dass trotz Einsatz von Hochqualitäts-Resonatoren („high-Q-quality“) diese Methode am thermischen Rauschen scheitert.

Biophysikalische Mechanismen nicht-thermischer Einwirkung: „ionisierende“ und „nicht-ionisierende“ Strahlung

Elektromagnetische Wellen und Strahlen überstreichen ein weites Frequenzspektrum, ausgehend von den niederfrequenten Schwingungen des industriellen Wechselstroms, über die Hochfrequenz der elektronischen Nachrichtenübertragung bis zu Wärmestrahlung, Licht und Röntgen- und Gammastrahlen. Dieses Spektrum kann als Abfolge verschiedener Frequenzen, Wellenlängen oder auch Quantenenergien dargestellt werden. Diese drei Parameter sind durch Naturkonstanten ineinander umrechenbar. Je nach Fragestellung interessiert die eine oder die andere Eigenschaft. Um z. B. zu klären, ob die Schwingungen in der Lage sind, Nerven oder Muskeln zu erregen, betrachtet man ihre Frequenz. Interessiert man sich für die Frage, wie wirksam die

Körperlänge eines Versuchstieres oder des Menschen als HF-Antenne sein könnte, so ist die Wellenlänge von Interesse. Bei einer Diskussion darüber, wie die Schwingung am Molekül angreifen könnte, ist wiederum die Quantenenergie der Strahlung von Bedeutung.

Die Quantenenergie ist also ein Qualitätsmaß einer elektromagnetischen Strahlung, genau wie Frequenz und Wellenlänge und darf nicht mit ihrer Intensität, in der Physik als Flussdichte oder Strahlungsleistungsdichte bezeichnet, verwechselt werden. Zur Veranschaulichung sei an ein Hagelwetter gedacht. Die Quantenenergie wäre dann vergleichbar mit der kinetischen Energie der einzelnen Hagelkörner, die sich aus ihrer Größe und Geschwindigkeit ergibt. Die Intensität der Strahlung würde dann der Intensität des Hagelschlags entsprechen, also etwa der Anzahl der Hagelkörner, die pro Sekunde einen Quadratmeter Fläche treffen. Die Entscheidung darüber, ob der Hagel eine Autoscheibe einschlagen kann, wird nicht durch die Dichte des Hagelschlags, sondern durch die Energie der einzelnen Hagelkörner bestimmt. Es sind große (energiereiche) Hagelkörner nötig, um das Glas zu durchschlagen.

Diese Überlegung führt uns zu der wichtigen Grenze zwischen dem Bereich der „ionisierenden“ und der „nicht-ionisierenden“ Strahlung. Es ist mindestens eine Quantenenergie von 12 eV (Elektronenvolt) erforderlich, um eine kovalente chemische Bindung zu brechen, d. h. aus einem Molekül ein Ion zu machen. Diese Grenze wird im Frequenzspektrum erst oberhalb der Funknutzung im „harten“ UV-Licht erreicht. Bei den noch kurzwelligeren Röntgen- und Gammastrahlen steigt die Quantenenergie weiter an und erreicht Werte von Millionen Elektronenvolt (MeV) und mehr.

Auf diesem Mechanismus basiert die Wirkung ionisierender Strahlung. Jedes einzelne absorbierte Energiequant kann prinzipiell zum Bruch einer chemischen Bindung führen, im ungünstigsten Fall zum Bruch eines DNA-Stranges. Dies erfolgt auch tatsächlich ständig durch den Einfluss natürlicher Radioaktivität im Körper, durch Höhenstrahlung etc. Der Organismus schützt sich davor durch ein nahezu perfektes System von Reparaturmechanismen. Trotzdem erhöht jede zu-

sätzliche Bestrahlung die Wahrscheinlichkeit einer molekularen Störung, die dem Reparatursystem entgangen ist und die sich als Krebsgeschwulst oder Missbildung äußert. Deshalb gibt es für die ionisierende Strahlung keinen Schwellenwert. Die Grenzwerte sind vielmehr an der natürlichen Strahlenbelastung orientiert und liegen mit Sicherheitsabstand darunter (Laut Strahlenschutzverordnung für die Allgemeinbevölkerung bei 1 mSv pro Jahr, angesichts natürlicher Belastung von ca. 2 mSv. Da sich genetische Defekte akkumulieren können, ist ferner nicht nur die Intensität der Strahlung von Bedeutung, sondern zusätzlich ihre Dauer bzw. das Integral der Dosis über die Lebenszeit.

Der Hinweis auf die Besonderheiten der Dosimetrie ionisierender Strahlung ist erforderlich, weil leider immer wieder unkritisch aus diesem Bereich auf nicht-ionisierende Strahlen extrapoliert wird. Wie aus **Abb. 1** ersichtlich, liegt bei den hochfrequenten Feldern des Mobilfunks die Quantenenergie um das Millionenfache unterhalb der 12-eV-Grenze. Der Bruch eines DNA-Moleküls ist deshalb nicht möglich. Wenn auch diese Aussage der Boltzmann-Statistik unterliegt, d. h. Wahrscheinlichkeitscharakter hat, so wird sie doch dadurch gestützt, dass die Stabilität der DNA den Stößen der thermischen Bewegung standhält, deren Energie nur etwa tausendfach unter der 12-eV-Grenze, aber immerhin noch ebenso weit über der des Mobilfunks liegt.

Das Postulat, auch die Wirkung der HF-Felder des Mobilfunks hätte keinen Schwellenwert und ihre Grenzwerte müssten folglich auf das Niveau unterhalb der Feldstärke der „Spherics“, der atmosphärischen Schwingungen, abgesenkt werden, entbehrt damit jeder Grundlage. Gleichermaßen ist die Annahme nicht haltbar, unerschwellige Effekte, z. B. die ständige, aber sehr schwache Exposition einer Person durch eine nahe Basisstation, könnten sich im Laufe der Zeit akkumulieren.

Andererseits erlauben es diese theoretischen Betrachtungen nicht, das Auftreten von DNA-Schäden generell auszuschließen. Auch wenn die Quantenenergie der nichtionisierenden Strahlung nicht ausreicht um DNA-Strang-Brüche direkt zu erzeugen, so ist doch prinzipiell denkbar, dass sie einen Einfluss auf die Repa-

raturprozesse haben könnte. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens nicht-reparierter Schäden durch natürliche Strahlung, sogenannter „spontaner“ Mutationen, könnte auf diese Weise erhöht werden. Hier muss das Experiment entscheiden, das allerdings bisher keine Effekte dieser Art reproduzierbar nachgewiesen hat [Vijayalaxmi and Obe, 2004, 2005, Challis 2005].

Nichtthermische Effekte starker hochfrequenter Felder

Wenngleich die Quantenenergie der HF-Felder des Mobilfunks bei weitem nicht ausreichen um chemische Bindungen zu brechen, so übt sie doch mit ihrem elektrischer Vektor zweifellos Kräfte auf geladene und polarisierbare Strukturen aus. Schon frühzeitig wurde festgestellt, dass sich Hefe- und andere Zellen unter dem Einfluss elektrischer Wechselfelder kettenförmig aneinander lagern. In stark inhomogenen Feldern findet eine Bewegung statt, die man, ist sie in Richtung höherer Feldstärke gerichtet, als positive, andernfalls als negative Dielektrophorese bezeichnet (**Abb. 2**) [Pohl 1978]. Ursache dafür ist die Polarisierung der Zellen durch das externe Feld. Da sich verschiedene Komponenten der Zelle mit unterschiedlichen Zeitkonstanten polarisieren lassen, ergeben sich komplizierte Frequenzspektren positiver und negativer Dielektrophorese.

Erzeugt man mit speziellen Elektroden-systemen rotierende Felder, so folgen die induzierten Dipole mit gewisser Verzögerung dieser Rotation. Es entsteht eine resultierende Kraft, die zu einer Rotation der Zellen führt. Diese, als „Elektrorotation“ [Glaser und Fuhr 1986] bezeichnete Methode erlangte einige Bedeutung in der modernen Biotechnologie.

Dielektrophorese und Elektrorotation sind echte „nicht-thermische“ Effekte, haben sie doch ihrer Entstehung nach nichts mit Wärme zu tun. Sie erfordern allerdings Feldstärken von über 10 kV/m, wodurch eine starke Wärmeentwicklung entsteht, die durch Thermostatierung begrenzt werden muss. Die Feldintensität liegt damit um viele Zehnerpotenzen über den gesetzlichen Grenzwerten. Dieses Phänomen wäre folglich für die in diesem Beitrag zu behandelnde Problematik uninteressant, wäre nicht nachgewiesen, dass Gewebszellen unterschiedlicher Art

in ihrer normalen Entwicklung selbst durch diese extrem starken Felder auch nach vielstündiger Applikation nicht beeinflusst werden [Fuhr et al. 1994]. Anderenfalls wäre ihr Einsatz in der Biotechnologie als Methode der Zell-manipulation nicht möglich.

Modelle zur Erklärung nicht-thermischer Effekte im Frequenz- und Intensitätsbereich des Mobilfunks

Überschlagsmäßige Berechnungen zeigen, dass Einflüsse hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf Ionen und Dipole in biologischen Strukturen verschwindend klein sind, vergleicht man sie mit dem thermischen Rauschen des Systems [Taylor 1981, Pickard u. Moros 2001, Adair 2002, Foster u. Repacholi 2004, Challis 2005]. Auch wenn es kein spezielles Sinnesorgan für diese Strahlen gibt, so sollte man dennoch spezielle Mechanismen der Verstärkung oder Rauschunterdrückung in Zelle und Organismus nicht von vornherein ausschließen. Zahlreiche Möglichkeiten wurden diesbezüglich in den letzten Jahrzehnten erwogen und durchgerechnet. Wir werden hier allerdings lediglich solche Hypothesen diskutieren, die sich auf mögliche Wirkungen hochfrequenter Felder beziehen.

Wie bereits erwähnt, münden prinzipiell alle Prozesse der Energieabsorption letztlich in eine Erwärmung des Systems. Die Frage lautet demnach zunächst: gibt es molekulare Veränderungen, die unmittelbar in irgendeine biologische Signalkaskade einmünden, gleichgültig, ob dies zu einem biologischen Effekt führt, der ohne Schaden kompensiert wird, oder ob irgendwelche gesundheitlich relevanten Konsequenzen daraus resultieren könnten. Prinzipiell lassen sich die vorgeschlagenen Modelle einteilen in solche,

- die eine additive Wirkungssteigerung vorsehen,
- die von einer Verstärkung durch sich aufschaukelnde Oszillationen ausgehen und schließlich
- die das Ereignis in einen molekularen Bereich verlagern, in dem es einem reduzierten thermischen Bombardement ausgesetzt ist.

Zunächst wäre zu fragen, ob nicht wenigstens Wasserstoff-Brückenbindungen beeinflusst werden könnten, deren Energie um das 10- bis 20-fache schwächer ist als diejenige kovalenter Bindungen, wenn

man gleichzeitig postuliert, dass es auch Multiphotonen-Anregungen durch die Quanten der GHz-Strahlung gäbe. Auf den ersten Blick ist jedoch zu sehen (**Abb. 1**), dass eine Vervielfachung der 4×10^{-6} eV der GHz-Schwingung diese auch einem um das 20-fache reduzierten 12 eV-Grenzwert nicht signifikant näher bringt. Pickard und Moros [2001] wiesen zudem nach, dass dieser Mechanismus für die Mobilfunk-Problematik auch deshalb auszuschließen sei, weil Multiphotonen-Übergänge nur im Frequenzbereich des Lichtes auftreten, höchstens noch in dem der Wärmestrahlung.

Zu einem ähnlichen Schluss kommt auch Prohofsky [2004]. Er betrachtet eine mögliche Beeinflussung intra-molekularer Bewegungen biologischer Makromoleküle, also Vibrationen oder Rotationen von Bindungen mit biologischer Relevanz durch die hochfrequenten Schwingungen von GHz-Feldern. Denkbar wären beispielsweise Einflüsse auf Prozesse biologischer Energieübertragung. Könnten sich nicht vielleicht Schwingungen von Ladungen und Dipolen in biologischen Makromolekülen durch hochfrequente Wechselfelder allmählich aufschaukeln und dabei Energie akkumulieren? Diesem Verhalten widersprechen zwei Umstände. Zum einen liegen die Frequenzen dieser Prozesse um das Hundert- bis Tausendfache über denen des Mobilfunks. Für Myoglobin (roter Muskelfarbstoff) berechnet Prohofsky z. B. eine akustische Eigenresonanz bei 240 GHz und auch für ein DNA-Molekül kommt er nicht weit darunter. Dies macht eine direkte Kopplung beider Frequenzen außerordentlich ineffektiv. Zum anderen verhindert die Dämpfung durch die umgebenden Wassermoleküle ein solches Aufschaukeln.

Letzteres ist ein Umstand, der prinzipiell gegen alle Hypothesen spricht, die auf dem Resonanzprinzip beruhen. Prominentes Beispiel dafür ist die viel diskutierte Theorie kohärenter Erregung („coherent excitations“) von H. Fröhlich [Fröhlich 1980, Fröhlich u. Kremer 1983]. Diese Vorstellung setzt die strenge Orientierung der Dipole funktioneller Membranproteine im statischen Feld der Zellmembran voraus, das unter physiologischen Bedingungen Werte von 10^7 V/m erreicht. Dadurch ist ein kohärentes Verhalten möglich. Sind diese Proteine außerdem funktionell ausgelenkt, so lassen sich Schwin-

gungen voraussagen, die mit einem äußeren Feld im Frequenzbereich von mehr als 10 GHz in Resonanz geraten könnten (Nähere Erläuterung siehe Haberland 1999). Vorausgesetzt wurden scharfe Resonanzbereiche, die man ursprünglich sogar bei wachsenden Hefezellen glaubte nachweisen zu können [Grundler u. Keilmann 1983, 1989]. Diese Resultate haben sich jedoch in Folge nicht bestätigt [Gos et al. 1997, 2000]. Unbestätigt blieben auch andere Experimente, bei denen entsprechende Resonanzen vermutet wurden [Jelinek et al. 1996, 2005, Hadjiloucas et al. 2002].

Wie bei Prohofsky [2004], so ergaben auch die Berechnungen anderer Autoren [Foster u. Baish 2000, Pickard u. Moros 2001, Adair 2002, 2003, Challis 2005], dass bedingt durch die wässrige Umgebung der Biomoleküle jede induzierte Oszillation sofort abgedämpft wird, so dass es zu keiner resonanten Aufschaukelung und damit Energie-Akkumulation kommen kann. Ein von Astumian vorgeschlagenes Ratschen-Modell [Astumian 1997, 2003], das allerdings vorwiegend für den niederfrequenten Bereich gedacht ist, scheitert an dem Umstand, dass einmal absorbierte Energie schneller wieder dissipiert, als sie sich durch einen neuen Akt der Absorption addieren könnte.

Eine Reihe von allerdings nicht reproduzierbaren Experimenten lenkten in den 80-er Jahren die Aufmerksamkeit auf die Rolle des Kalziums in möglichen Mechanismen der Wirkung sowohl nieder- als auch hochfrequenter Felder. Angeblich lösen Felder von 147 MHz, die speziell mit 16 Hz amplitudenmoduliert sind, in Hirnschnitten von Hühnern Kalzium-Signale aus und damit eine Kaskade biologischer Folgereaktionen [Bawin et al. 1978]. Diese Befunde sind sicher falsch, denn, abgesehen von methodischen Fehlern konnten sie trotz vieler Bemühungen anderer Laboratorien nie reproduziert werden [Merrit et al. 1982, Cranfield et al. 2001]. Leider werden diese Resultate bis heute mitunter immer noch unkritisch zitiert [Westerman u. Hocking 2004, Stevens 2004, Weinberger u. Richter 2002].

Diese Kalzium-Hypothese führte jedoch damals zu theoretischen Überlegungen über mögliche Mechanismen. A. Chiabrera zeigte an Hand quantenmechanischer Berechnungen, dass auch geringe Quanten-

energien ausreichen könnten, um im rauscharmen hydrophoben (wasserabstoßenden) Bereich der Kalzium-Bindungsstellen entsprechender Rezeptorproteine bestimmte Effekte hervorzurufen, insbesondere, wenn diese metabolisch ausgelenkt sind [Chiabrera et al. 2000]. Ein anderes Modell stammt von J. C. Thompson, der kooperative Effekte in quasikristallinen Strukturen der Membran für möglich hält [Thompson et al. 2000]. Letztlich erlauben alle diese Modelle jedoch keine konkreten Aussagen über Schwellenwerte und konnten auch experimentell nicht bestätigt werden (Kritik dieser und ähnlicher Modelle siehe: [Adair 2006]).

Thermische Effekte bei intensiver Exposition durch HF-Felder

Wie eingangs erwähnt, ist die Erwärmung biologischer Gewebe unter dem Einfluss hochfrequenter Felder seit über 100 Jahren bekannt und wird unter der Bezeichnung Diathermie-, bzw. Hyperthermie-Behandlung als Therapie genutzt. Die dabei verwendeten Frequenzen werden entsprechend der gewünschten Eindringtiefe variiert. Dabei geht man nicht von spezifischen Effekten der Felder aus, hat solche bisher auch nicht gefunden, sondern nutzt einfach die therapeutische Wirkung der Wärme. Natürlich werden dabei Feldintensitäten verwendet, die weit über denen liegen, die bei Mobiltelefonen auftreten können [Wust et al. 2002].

Ein seit langem bekanntes und experimentell gut untersuchtes Phänomen ist das Hören gepulster Hochfrequenzfelder [Frey 1961, Foster u. Fynch 1974, Chou et al. 1985, Lin 2002, Elder u. Chou 2003]. Ursache dieses Phänomens ist eine pulsierende Erwärmung von „hot spots“ im Kopf, was zu thermoelastischen Dehnungen und dem Entstehen von Druckwellen führt, die schließlich im Innenohr als Schall wahrgenommen werden. Für diesen Effekt sind jedoch Leistungsdichten erforderlich, die weit oberhalb der Grenzwerte liegen. Die Intensität der Pulse des Mobiltelefons reicht dafür nicht aus.

„Hot spots“ und mikrothermische Effekte
Schon in den 30-er und 40-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat man sich Gedanken darüber gemacht, ob im heterogenen Dielektrikum biologischer

Systeme nicht vielleicht Orte höherer Erwärmungen entstehen könnten [Rajewsky 1938]. Strukturen, die sich in Ionen- und Wassergehalt und damit der Impedanz (Wechselstrom-Widerstand) unterscheiden, wie etwa Knochen und Muskelgewebe, aber auch geladene Oberflächen, oder unterschiedlich polarisierbare Makromoleküle wie Proteine und Lipide, absorbieren frequenzabhängig die HF-Felder in unterschiedlicher Weise. Tatsächlich muss bei diesen Vorgängen jedoch nicht nur die Energieaufnahme betrachtet werden, sondern ebenso die Wärmeableitung. In den Organen des Körpers wird diese im Allgemeinen durch den Blutkreislauf reguliert [Foster et al. 1998, Foster u. Erdreich 1999]. Für künstliche Systeme, etwa Fetttropfchen in Wasser oder Wassertropfchen in Öl, kann man Gleichungen ansetzen, die die Wärmeableitung über die Oberfläche berücksichtigen, die bekanntlich bei kleineren Oberflächen relativ zum Volumen größer wird.

Setzt man am Modell einer Kugel die Geschwindigkeit einer Erwärmung durch Energieabsorption in Relation zur Abkühlung, so erhält man für die charakteristische Zeit der Temperaturveränderung eine Funktion, die umgekehrt proportional zum Quadrat des Radius verläuft (**Abb. 3**). Während eine 1 mm große Kugel noch eine Zeitkonstante der Temperaturveränderung von wenigen Sekunden aufweist, liegt dieser Wert bei 1 Mikrometer nur noch im Mikrosekundenbereich und fällt dann schnell weiter ab. Entsprechend wird auch die stationäre Temperaturdifferenz immer kleiner. Daraus wird geschlossen, dass es echte „hot spots“, also Regionen erhöhter Temperatur durch selektive Erwärmung im elektromagnetischen Feld, nur im Maßstab anatomischer Strukturen geben kann. Mikroskopische Bereiche unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften gleichen ihre Temperatur zu schnell mit der Umgebung ab [Schäfer u. Schwan 1943, Foster 1997, Foster et al. 1998, Foster u. Erdreich 1999, Laurence et al. 2003, Foster u. Glaser 2006]. Unter diesem Aspekt ist auch die Hypothese von J. L. Kruschvink zu betrachten. Dieser Autor verweist auf das Vorkommen von Ferrit-Kristallen in der Größenordnung von 50 nm, die er glaubt in verschiedenen Geweben, so auch im Gehirn des Menschen wenn auch in sehr geringer Konzentration nachgewiesen zu haben [Kirschvink et al 1992]. Diese Strukturen,

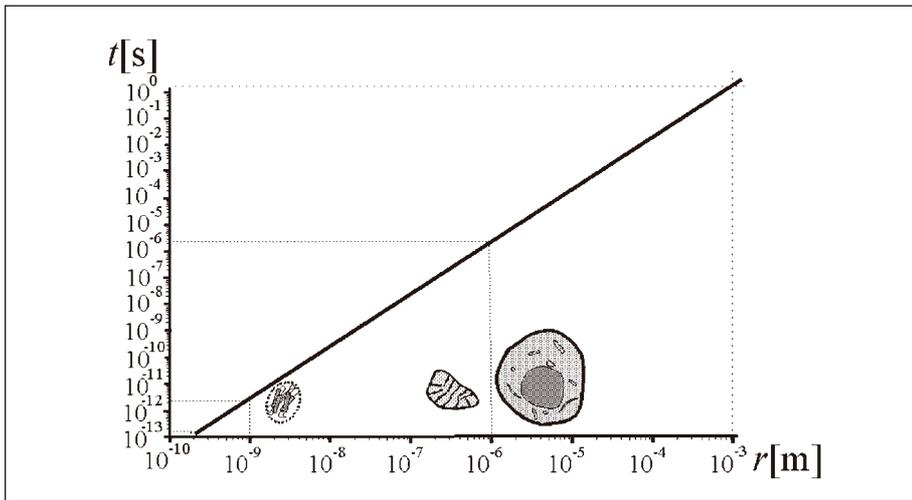


Abb. 3: Charakteristische Zeit der Temperaturänderung (t in Sekunden) kugelförmiger Körper mit unterschiedlichem Radius (r in Meter) nach dem Modell von Foster [1997]. Angegeben sind die Größenordnungen von Makromolekülen, Mitochondrien und Zellen.

den Magnetiten der Magnetobakterien ähnelnd, macht er im niederfrequenten Bereich unmittelbar für die Wirkung schwingender Magnetfelder, im hochfrequenten hingegen für Orte mikroskopischer Erwärmung verantwortlich [Kirschvink et al 1996]. Abgesehen davon, dass das Auftreten dieser Magnetite selbst noch nicht sicher nachgewiesen ist, sind sie nach der oben genannten Abschätzung zu klein, um tatsächlich effektiv zu sein [Challis 2005].

Diese Ansätze gründen allerdings auf phänomenologischen Parametern, wie Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Selbst die Temperatur ist physikalisch nur für „große“ Systeme definiert und kann in molekularen Dimensionen höchstens als „effektiver“ Parameter betrachtet werden (zu „effektiven“ Parametern in der Biophysik siehe Glaser 1996, 2000). Im Bereich einzelner Moleküle und in Hinblick auf die Verstärkerprozesse molekularer Reaktionen in biologischen Systemen löst sich der Temperaturbegriff in ein komplexes Geschehen von Vibrationen und Schwingungen auf und muss mit anderen Ansätzen bearbeitet werden. Dies knüpft an die Berechnungen von E.W. Prohofsky an, die im Abschnitt 2.3. erwähnt wurden [Prohofsky 2004].

Da sich auch die technische Chemie für die Möglichkeit interessiert, chemische Prozesse durch HF-Felder zu beeinflussen, gibt es eine Vielzahl von Publikationen speziell aus dieser Sicht. Einige Studien beschäftigen sich auch mit der Möglichkeit mikrothermischer Beeinflussung bio-

chemischer Reaktionen [Nölting 1998, Bohr u. Bohr 2000, Coptly et al. 2005]. Kürzlich konnte nachgewiesen werden, dass es unter dem Einfluss von HF-Feldern zu einer Monomerisierung des normalerweise als Dimer vorkommenden Enzyms Acetylcholin-Esterase kommen kann [Barteri et al. 2005]. Ein interessantes Experiment wurde an einem kleinen synthetischen DNA-Molekül durchgeführt, dem man ein 1,4 nm großes Goldkristall kovalent angeheftet hatte. Durch Felder im Frequenzbereich von 1 GHz gelang es, dieses Molekül selektiv thermisch zu aktivieren [Hamad-Schifferli et al. 2002]. Diese Publikationen zeigen, dass die Diskussion zum Thema selektiver thermischer Anregungen von Makromolekülen durch HF-Felder noch im Fluss ist und weitere Beachtung verdient.

Thermische Effekte und molekulare Thermometer

Bei der Diskussion zu Definitionen „nicht-thermischer“ Effekte (Abschn. 1.5) wurde die Empfindlichkeit biologischer Thermorezeption erwähnt. Seit langem kennt man im Tierreich Thermorezeptoren deren Empfindlichkeit offenbar noch unterhalb von 0,01 Grad liegt [Harris u. Gamow 1971, Neuweiler 2003, Schmitz u. Trenner 2003]. Auch Thermorezeptoren der menschlichen Haut weisen Empfindlichkeiten von weniger als 0,1°C auf [Hendler et al. 1963, Glaser 2005, Foster u. Glaser 2006]. Sie liegen allerdings etwa 0,2 mm tief im Gewebe. Dadurch sind sie gegen eine schnell wechselnde äußere Erwärmung abgepuffert, nicht jedoch gegen thermische Einflüsse von HF-Feldern.

Erst im letzten Jahrzehnt ist man dem Problem molekularer Mechanismen biologischer Temperaturmessung etwas näher gekommen. Bisher sind zwei völlig unterschiedliche Arten biomolekularer Thermometer bekannt. Zur einen Klasse gehören thermosensible RNA-Schalter („Riboswitches“), die besonders in Bakterien gefunden wurden. In verschiedenen Modifikationen sorgen diese für eine temperaturregulierte Expression bestimmter Proteine, u.a. auch der im Bereich der Wirkung von HF-Feldern immer wieder diskutierten Hitzeschockproteine [Lai 2003, Grimshaw et al. 2003, Narberhaus et al. 2006]. Die zweite Kategorie bilden spezielle Transportproteine in der Membran vieler Zellen, die zur Gruppe der TRP-Kanäle („transient receptor potential“) gehören [Xu 2002, Watanabe et al. 2002, Benham et al. 2003, Brauchi et al. 2006].

Die Besonderheit dieser Makromoleküle liegt darin, dass sie jeweils in einem kleinen Temperaturbereich von wenigen Grad eine definierte Strukturänderung erfahren, die ihre Funktion verändert. Während sich die Geschwindigkeit normaler chemischer und biochemischer Reaktionen bei einer Temperaturerhöhung von 10 Grad etwa verdreifacht (Q_{10} -Koeffizient), erreicht der Faktor bei diesen Molekülen im Übergangsbereich Werte von zum Teil bis über 20. Die entsprechenden Zellen enthalten viele solcher Moleküle unterschiedlicher Art, die jeweils verschiedene Temperaturbereiche abdecken. Ihre Konformationsänderung löst biologische Informationskaskaden aus, die sich bereits in jeder einzelnen Zelle und darüber hinaus über die vielen Zellen eines Thermorezeptors mitteln. Dies stellt offenbar einen effektiven Mechanismus der Rauschunterdrückung dar.

Wie in **Abb. 4** dargestellt, muss man sich die biologische Thermorezeption als ein mehrstufiges System der Informationsverarbeitung vorstellen. Die thermische Veränderung vieler Moleküle bestimmt die Reaktion einer einzigen thermosensiblen Zelle. Viele Zellen bedienen dann einen Thermorezeptor. Viele Thermorezeptoren wiederum, sowohl in der Haut als überall im Körper, senden ihre Impulse zum neuronalen Zentrum der Thermoregulation im Hypothalamus. Von dort aus wird gegebenenfalls ein Signal an das Großhirn weitergeleitet und erst dann eine Wärme- oder auch Kälteempfindung bewusst.

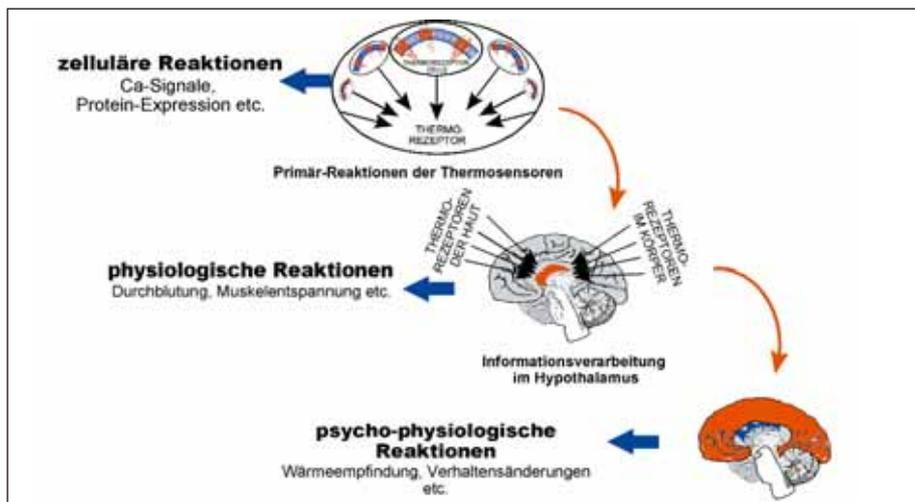


Abb. 4: Schematische Darstellung der Thermorezeption, ausgehend von den molekularen Rezeptoren der Membran, die sich sowohl in Zellen der Haut als auch in solchen im Inneren des Körpers befinden, über die Verarbeitung der Information im Hypothalamus bis zur bewussten Wärmeempfindung als Reaktion des Großhirns. Auf jeder Stufe erfolgt eine Auswertung mit möglichen Konsequenzen auf der entsprechenden Ebenen. So sind bei geringer lokaler Erwärmung viele Reaktionen möglich, ohne dass eine bewusste Wärmeempfindung folgt [nach Glaser 2005].

Entscheidend ist jedoch, dass auf allen Stufen des Systems bereits Reaktionsketten ausgelöst werden können, ohne dass das Signal auf der nächst höheren Stufe als „relevant“ gewertet wird. Spezielle Protein-Expressionen könnten eingeleitet werden, Durchblutungsänderungen induziert etc., ohne dass eine Wärmeempfindung bewusst wird.

Geht man nun davon aus, dass eine Diathermie-Erwärmung des biologischen Systems durch HF-Felder andersartig ist als eine Erwärmung von außen oder durch körperliche Aktivitäten von innen, also etwa das Schwitzen beim Laufen, so kommt man unmittelbar auf die eingangszitierte Feststellung aus dem Jahre 1946 zurück, wonach es sich bei der Wirkung starker HF-Felder auf den Menschen um „eine primär elektrische Allgemeinerwärmung des gesamten Organismus [handelt], die ohne thermometrisch grob nachweisbar zu sein, die Regulation vor eine eigentümliche Aufgabe stellt.“ [Schaefer u. Stachowiack 1946].

Unter diesem Aspekt werden auch Resultate verständlich, die als schwer reproduzierbare „nicht-thermische“ EEG-Änderungen publiziert wurden, oder als Effekte, die man durch verschiedene Psychotests ermittelte [Huber et al. 2002, Krause et al. 2000, 2004, 2006, Loughran et al. 2005, Curcio et al. 2005, u.a.]. Offensichtlich bedeutet die wenn auch geringfügige Erwärmung des Gewebes durch ein Handy am Ohr eine geringe Beein-

flussung des thermoregulatorischen Systems. Natürlich ist diese Reaktion vom physiologischen Zustand des Organismus abhängig und in der Messung deshalb unzuverlässig. Letztlich unterscheidet sie sich jedoch prinzipiell nicht von andersartigen Erwärmungen und ist deshalb als unbedeutende Alltagsreaktion zu verstehen. (Näheres zu diesem Aspekt siehe [Glaser 2005]).

Schlussfolgerungen

Die hier dargestellten Sachverhalte lassen sich in folgenden Thesen zusammenfassen:

- Trotz jahrzehntelanger Bemühungen gibt es bisher keine biophysikalisch vertretbare Vorstellung über eine mögliche nicht-thermische Wirkung hochfrequenter Felder im Intensitätsbereich gültiger Grenzwerte. Da auch experimentell derartige Wirkungen bisher nicht zweifelsfrei nachgewiesen wurden, können sie mit einiger Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.
- Wiederholt gemessene, allerdings schwer reproduzierbare Effekte neuronaler Aktivitäten unter dem Einfluss von Feldern des Mobilfunks, die von Experten zudem als gesundheitlich unbedenklich gewertet werden, sind als „Alltagsreaktionen“ auf lokale Erwärmungen zu betrachten. Dabei spielen offenbar auch lokale Reaktionen von Thermorezeptoren eine Rolle, die zu lokalen Durchblutungsänderungen führen können.

- Eine *physikalische* Demodulation modulierter bzw. gepulster HF-Felder im GHz-Bereich, also die Entstehung entsprechender niederfrequenter elektromagnetischer Schwingungen, ist in biologischen Systemen nicht vorstellbar und auch nicht nachgewiesen. Eine *biologische* Demodulation, also eine periodische niederfrequente Anregung eines biologischen Signalsystems, würde eine Primärwirkung voraussetzen, die jedoch im ersten Punkt der Schlussfolgerung ausgeschlossen wird. (siehe hierzu den weitergehenden folgenden Abschnitt)
- Da im Bereich geltender Grenzwerte ausschließlich thermische Einflüsse hochfrequenter Felder zu erwarten sind, erscheint trotz aller Kritik der SAR-Wert als brauchbares Maß für die wirksame Dosis. Im Gegensatz zur unmittelbaren Wirkung ionisierender Strahlung muss für die Wirkung im Frequenzbereich des Mobilfunks von einem Schwellenwert ausgegangen werden. Da es keinen Hinweis auf eine Akkumulation thermischer Wirkungen gibt, erscheint die Einführung einer zeitlichen Integration der Energieabsorption als Dosis-Größe unbegründet.
- Forschung erscheint notwendig, um die theoretisch postulierte Möglichkeit subthermischer Effekte auf molekularem Niveau zu belegen. Unter Nutzung etablierter Modelle von Molekular-Thermometern („Riboswitches“, TRP-Transportern und anderen thermosensiblen Molekülen), eventuell auch spezieller Thermorezeptoren von Tieren, sollte die HF-Wirkung gezielt untersucht werden.

3.1.3 Welche Demodulationsmechanismen hochfrequenter Felder in biologischen Systemen sind bekannt?

Roland Glaser, Lutz Haberland

Hochfrequente elektromagnetische Felder werden – um mit ihnen Informationen übertragen zu können – niederfrequent moduliert. Diese Modulationen liegen bei heutigen Mobilfunkanwendungen im Bereich von wenigen Hertz (Hz) bis einigen Kilohertz (kHz): beim GSM-Mobilfunk spielt zusätzlich die Pulsation des Feldes mit 217 Hz eine Rolle; die Mobilgeräte des TETRA-Systems (siehe Anhang 2 und 4) besitzen eine Modulation bei 17,65 Hz. Biologische Prozesse laufen auf Zeitskalen ab, die vom Nanosekundenbereich ($ns = 10^{-9} s$) bis zu Jahren reichen, einige auch mit Zeitkonstanten ähnlich der Pulsdauer und der Amplitudenmodulationen von Mobilfunksystemen. Eine Vielzahl dieser Prozesse, unter anderem im Gehirn (Stichwort EEG), ist zudem mit der Entstehung von niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern verbunden. Ist es somit nicht plausibel, einen Einfluss von Mobilfunk-Modulationen auf biologische Systeme zu erwarten?

Entscheidend ist die Frage, auf welche Weise diese Pulse bzw. Modulationen der Hochfrequenzfelder mit den niederfrequenten Prozessen im biologischen System wechselwirken könnten. Die elektromagnetischen Felder/Wellen/Strahlen im Mega- bis Gigahertzbereich ($10^6 - 10^{11}$ Hz), sind dadurch moduliert, dass sie in ihrer Amplitude bzw. Frequenz im niederfrequenten Bereich von $10^0 - 10^3$ Hz schwanken. Auf der biologischen Seite laufen Reaktionen bzw. Transportprozesse ab, bei denen elektrisch geladene Teilchen und Moleküle beteiligt sind. Liegt der Rhythmus dieser Prozesse im gleichen Frequenzbereich wie die Modulation der Hochfrequenzfelder, so ist Resonanz, also die Verstärkung oder Dämpfung des biologischen Prozesses durch die modulierten Felder prinzipiell vorstellbar. Aber „sieht“ der biologische Prozess überhaupt die Modulation im hochfrequenten Feld? Wird die Energie der Felder auf den Prozess übertragen, gibt es vielleicht sogar noch eine andere Art von „Informationsübermittlung“? Inwieweit sind die biologischen Prozesse überhaupt anfällig für äußere Störungen? Oder hat ein Effekt eine ganz andere Grundlage? Diese Fragen berühren direkt den biophysikalischen **Mechanismus**, den gepulste oder niederfrequent modulierte Felder des Mobilfunks vor jenen kontinuierlicher Felder auszeichnen könnten. Der derzeitige Kenntnisstand wird im folgenden kurz vorgestellt.

Die verschiedenen in der Technik verwendeten Felder und Modulationsarten werden in Abschnitt 2.1.3 beschrieben. Hier geht es um die Wirkung solcher

Felder im biologischen System. Lassen wir zuerst die Modulation beiseite und betrachten die hochfrequente Trägerfrequenz, eine periodische, sinusförmige Schwingung zwischen elektrischer und magnetischer Polarität. Sie wirkt, indem sie Kräfte auf die im Körper vorhandenen Ladungen ausübt, die in ihren Bewegungen dem Feldverlauf zu folgen versuchen und dadurch in Schwingung geraten. Mit Ladungen sind hier Ionen gemeint, aber auch Dipole (wie Wasser) oder Multipole (wie z. B. Proteine). Je höher die Anregungsfrequenz dieser Teilchen, desto geringer wird die Amplitude ihrer Schwingung, da sie aufgrund ihrer Trägheit dem Wechselfeld nicht mehr folgen können. Sie „vibrieren“ um ihren Mittelpunkt mit immer kleiner werdender Amplitude. Die Teilchen „reiben“ dabei an den Nachbarmolekülen, wodurch Wärme entsteht, der Hauptmechanismus der Wechselwirkung im hier betrachteten MHz- und GHz-Bereich.

Damit eine der Trägerfrequenz aufgeprägte Modulation im Körper wirksam werden kann, muß sie vom hochfrequenten Signal abgekoppelt – demoduliert – werden. Da es für eine Demodulation der Frequenz- oder Phasenmodulation in biologischen Systemen bisher keine Anhaltspunkte gibt, wird im folgenden nur die Amplitudenmodulation berücksichtigt. Die Pulsung sei als spezielle Art der Amplitudenmodulation einbezogen. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, wie eine solche Demodulation stattfinden könnte:

- Die **elektrische oder physikalische Demodulation** bedeutet, dass ein der Hochfrequenz aufgeprägtes elektrisches Signal seine Ursprungsform in Frequenz und Amplitude als elektrisches Signal zurückerhält. Es entsteht also ein niederfrequent schwingendes elektromagnetisches Feld, das den Amplitudenschwankungen oder der Pulsation (der Hüllkurve) des HF-Feldes folgt. Ein solcher Demodulationsschritt setzt im System ein nichtlineares Element voraus. Dabei bedeutet „nichtlinear“, dass das Ausgangssignal sich nicht proportional zum Eingangssignal verhält. Im Fall der elektrischen Demodulation wird das modulierte Signal gleichgerichtet, d. h. ab einer bestimmten Schwellenspannung kann nur die positive **oder** negative Halbwelle das Element passieren. In der Elektronik wird dafür normalerweise eine Diode verwendet. Durch nachgeordnete Widerstände und Kondensatoren (sogenannte RC-Glieder) wird das hochfrequente Trägersignal kurzgeschlossen und man erhält direkt das niederfrequente Modulationssignal (**Abb. 1**).

In biologischen Strukturen ist die Zellmembran aufgrund ihrer dielektrischen Eigenschaften als nichtlineares Element bekannt. Sie besitzt auch die Eigenschaften eines RC-Gliedes. Diese Gleichrichtereigenschaft ist allerdings nur in einem Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz wirksam, also nur bis zu derjenigen Frequenz, ab der die Membran für die Hochfrequenzfelder transparent wird. Im höheren Frequenzbereich verlieren die Proteine ihre Rolle als nicht-

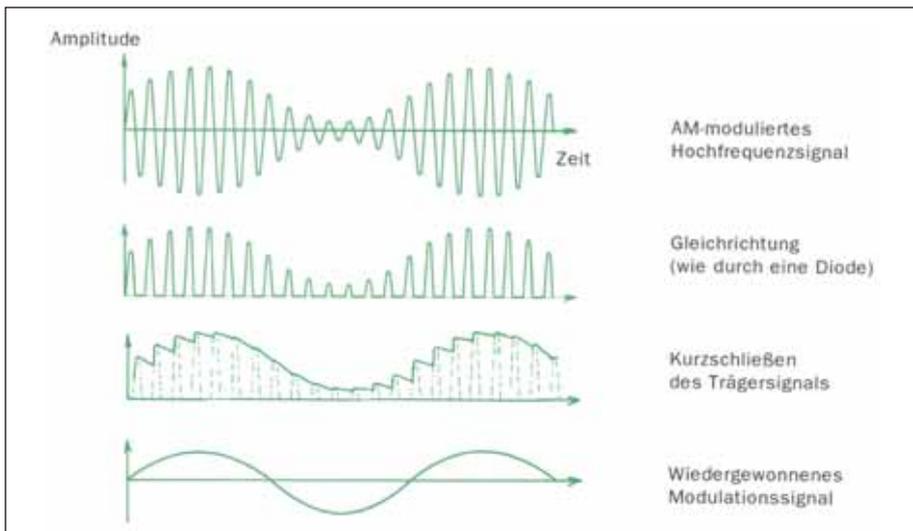


Abb. 1: Elektrische Demodulation am Beispiel der Amplitudenmodulation (AM)

lineare elektrische Bauelemente, der Membran fehlen somit dann die besonderen Diodencharakteristika, die eine Gleichrichtung bewirken könnten.

Jiri Silny beschreibt in seiner Übersichtsbroschüre zu Wirkungsmechanismen gepulster Funkwellen [Silny 2004] den selektiven Transport von Ionen durch Membrankanäle aufgrund der anziehenden bzw. abstoßenden Wirkung einer positiven bzw. negativen Halbwellen auf eine Ionenart. Dies führt nach einer gewissen Zeit zu einem Ladungsüberschuss dieser Ionenart in der Zelle und kann somit eine selbständige Erregung der Zelle bewirken: ein Gleichrichtereffekt ähnlich wie bei einer Diode. Da jedoch die Zeit für den Durchgang der Ionen durch die Membran 10^{-3} bis 10^{-6} Sekunden beträgt, die Dauer einer Halbwellen im Mobilfunkbereich aber nur ca. 10^{-8} bis 10^{-10} ist, wird dieser Mechanismus als unwahrscheinlich für den Mobilfunk-Frequenzbereich angesehen.

Eine rein mathematische Betrachtung der Membran als Gleichrichter unter moduliertem Hochfrequenzeinfluss – auch für den Mobilfunk-Frequenzbereich – wurde kürzlich von Iftekhar Ahmed auf einem Workshop in Zürich vorgestellt [Ahmed and Excell 2005; zitiert im Bericht zum COST 281-Workshop, FGF-Newsletter 1/2005]. Die Autoren fanden auch eine analytische Lösung des Problems, es gibt aber bislang keine Hinweise dafür, dass ihren Annahmen eine biologische Realität zugrunde liegt.

Aus diesen Sachverhalten ist insgesamt zu schließen, dass eine Demodulation amplitudenmodulierter oder gepulster Felder des Mobilfunks in biologischen Systemen im physikalischen Sinne des Wortes nach heutigem Kenntnisstand nicht vorkommt. Niederfrequente elektromagnetische Felder oder entsprechende Pulse können also auf diese Weise nicht entstehen [Challis 2005, Foster u. Repacholi 2004] und somit sind direkte Wirkungen niederfrequenter Felder und Ströme im Körper als Resultat von Demodulationsvorgängen nicht vorstellbar.

- Die **thermische Demodulation** beruht auf dem Wirkungsmechanismus hochfrequenter Felder, durch Anregung von Teilchenschwingungen Wärme im Körper zu erzeugen. Ist das Feld z. B. pulsmoduliert, wird auch nur während der Pulse der Körper erwärmt. Interessant wird es, wenn die Amplitude der Pulse hoch im Verhältnis zu ihrem zeitlichen Mittelwert ist, also wenn die Pulslänge sehr kurz im Vergleich zum zeitlichen Pulsabstand ist (geringes Tastverhältnis). Die dabei erreichten Puls-Feldstärken können die für die durchschnittliche Feldstärke geltenden Grenzwerte um das Vielfache übersteigen (ohne dass die durchschnittliche Feldstärke an die Grenzwerte heranreicht). Die Folge ist eine kurzzeitige Erwärmung, die allerdings aufgrund der unterschiedlichen aber charakteristischen dielektrischen Eigenschaften der Körperbestandteile unterschiedlich stark auftritt (Wasser wird z.B. schneller erwärmt als Knochen). Die mit der periodischen Erwärmung einhergehende Ausdehnung kann zu

thermoelastischen Wellen im Körper führen. Es werden mechanische Schwingungen erzeugt, die vom Ohr wahrgenommen werden können. Dies ist Ursache des „Mikrowellenhörens“. Anwendungen, die solche Pulse generieren, sind vor allem das Radar, sowie verschiedene Arten von UWB-(Ultra Wideband) Pulsen. In den Grenzwertempfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (siehe [SSK 1999]) sind diese Wirkungen berücksichtigt: Felder mit Pulsmodulationen, die mindestens das 32fache der durchschnittlichen Feldstärke bzw. mind. das 1000fache der mittleren Leistungsflussdichte erreichen, fallen unter gesonderte Bestimmungen. Für Mobilfunkgeräte sind solche Höreffekte nicht möglich: die maximalen gemessenen Feldstärken von Handys (Tastverhältnis bei GSM ist 1:8) bewegen sich im Bereich von etwa 10 bis 100 V/m und die vorherrschende Pulslänge bei GSM beträgt $577 \mu\text{s}$. Das Mikrowellenhören wurde jedoch erst ab Feldstärken von ca. 2000 V/m und Pulslängen kleiner als etwa $30 \mu\text{s}$ beobachtet.

- Eine Art von **mechanischer Demodulation** wirkt über die Polarisierbarkeit biologischer Membranen durch elektrische Felder. Bei genügend hohen Feldstärken gepulster Hochfrequenzfelder werden so starke Kräfte während der Pulsdauer in der Membran induziert, dass sich z. B. Löcher (Poren) in Zellmembranen bilden – der sogenannte „elektrische Durchschlag“ (engl.: „electrical breakdown“). Da die dafür nötigen Feldstärken im kV/m- bis MV/m-Bereich liegen und damit oberhalb der Grenzwerte, soll diese Demodulationsart hier nicht weiter behandelt werden.

Es existiert eine Anzahl weiterer Vorstellungen zu Demodulationsmöglichkeiten in biologischen Systemen, die auch unterhalb der Grenzwerte wirken sollen, doch sind diese hypothetischer Natur und offenbar nicht auf reale biologische Parameter anwendbar. Experimentell konnten entsprechende Vorgänge bisher nicht nachgewiesen werden.

Verwiesen werden soll auch auf Artikel von Lawrie Challis, sowie von Kenneth Foster und Michael Repacholi und dessen deutsche Aufarbeitung durch Roland Glaser [Challis 2005, Foster and Repacholi 2004, Glaser 2004].

In den 1970er und 1980er Jahren hatten mehrere Arbeitsgruppen mit etwas unterschiedlichem Versuchsdesign unter dem Einfluss amplitudenmodulierter Hochfrequenzfelder einen erhöhten Kalzium-Ausstrom aus Gehirngewebe gemessen. Insbesondere schien der Bereich um 16 Hz wirksam zu sein (nahe der Modulation der TETRA-Handgeräte). Neuere Ansätze, diese Versuche mit verbesserten Methoden zu wiederholen (allerdings mit anderen Trägerfrequenzen) konnten keinen (Demodulations-) Effekt finden. Versuche, diese Art von Demodulation zu erklären, bezogen sich in den älteren Studien meist auf Resonanzphänomene an Rezeptorbindungsstellen und Membrankanälen. Sie scheiterten jedoch daran, dass Störungen solcher Phänomene durch das thermische Rauschen und die Dämpfung durch das umgebende Medium nicht hinreichend berücksichtigt wurden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im biologischen System lediglich eine thermische Demodulation auftreten kann, die allerdings lediglich oberhalb der geltenden Grenzwerte als Mikrowellen hören wirksam werden kann. Eine elektrische Demodulation, also die Entstehung eines niederfrequenten Wechselfeldes ist im Frequenzbereich des Mobilfunks nicht vorstellbar und auch nicht nachgewiesen. Die Ergebnisse von Studien, die von modulations-spezifischen biologischen Effekten auch unterhalb der Grenzwerte berichten, ließen sich in den meisten Fällen nicht replizieren. Gute Übersichten findet man von Rainer Meyer und bei den Ergebnissen des COST 281-Workshops 2005 in Zürich sowie des FGF-Workshops 2006 in Rostock zum Thema Demodulation [Meyer 1999, Meyer 2003, Haberland 2005, Veyret 2006].

Fazit daraus: Gibt es einen bislang unbekanntem Demodulations-Mechanismus oder sind die erwähnten Studien fehlerhaft?

Grundsätzlich sind Demodulationen zu erwarten, wenn biologische Strukturen Nichtlinearitäten aufweisen. Dies ist z. B. der Fall, wenn sich mit steigender elektrischer Feldstärke oder Frequenz die Leitfähigkeit (bzw. die Dielektrizitätskonstante) einer biologischen Struktur ändert, oder wenn der Eintrag hochfrequenter EMF unterschiedliche Temperaturerhöhungen in verschiedenen Teilen des biolo-

gischen Systems bewirkt. Es wäre dann eine Art Sensor erforderlich, der diese Änderungen erfassen und für das biologische System wirksam machen könnte. Im Bereich der Mobilfunkfelder und der geltenden Grenzwerte konnte solch ein Mechanismus bislang noch nicht gefunden, aber auch nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Deshalb gehen eine Reihe von derzeit laufenden Forschungsprojekten weiterhin diesen Fragen nach. Erwähnt seien hier das Deutsche Mobilfunkforschungsprogramm, das sich im Mechanismus-Teil auch mit möglichen Demodulationen beschäftigt [Gimsa et al. 2003], und das britische „Mobile Telecommunications and Health Research“-Programm (MTHR), dessen Fokus unter anderem auf spezifischen Effekten des TETRA-Systems, aber auch allgemein auf biologischen Nichtlinearitäten liegt.

Die endgültige Antwort auf die Frage nach eventuellen modulationsspezifischen Wirkungen amplitudenmodulierter oder gepulster HF-Felder auch unterhalb der Grenzwerte steht also noch aus.

Literatur:

- Ahmed and Excell: Is a Rectifying Junction Essential for Demodulation of Modulated Waveforms in Tissue? Vortrag auf COST 281-Workshop in Zürich, Schweiz, 18. 2. 2005, <http://www.cost281.org/>
- Challis: Mechanisms for interaction between RF fields and biological tissue. *Bioelectromagnetics*. Suppl. 7, 2005, S98-S106
- Foster and Repacholi: Biological Effects of Radiofrequency Fields: Does Modulation Matter? *Radiation Research* 162, 2004, 219-225
- Gimsa, Habel und Lippert: Literaturstudie zum Thema: Untersuchung zu Wirkmechanismen an Zellen unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern der Mobilfunktechnologie. A Demodulation/Kommunikation. 2003. <http://www.emf-forschungsprogramm.de/>

- Glaser: Spielen Modulationen eine Rolle bei biologischen Effekten hochfrequenter Felder? *FGF-Newsletter* 4/2004, 18-22
- Haberland: Kurzbericht COST 281-Workshop „Do sinusoidal versus non-sinusoidal waveforms make a difference?“ *FGF-Newsletter* 1/2005, 4-8
- Meyer R (1999) In vitro und in vivo Studien zu biologischen Wirkungen von hochfrequenten Feldern. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission (SSK) Band 38. *Funkwendungen – Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen*. (Hrsg.) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Urban & Fischer, München, Jena, 58-102. <http://www.fgf.de/>
- Meyer: In vitro-Studien zu biologischen Wirkungen hochfrequenter Felder aus den Jahren 1997 bis 2002. *FGF-Edition Wissenschaft* 20, 2003. <http://www.fgf.de/>
- Silny: Gepulste Funkwellen. Wirkungsmechanismen gepulster Mikrowellen im Organismus. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004, <http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/>
- SSK: Deutsche Übersetzung der „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).“ International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Berichte der Strahlenschutzkommission* 23, 1999
- Veyret: Rapporteur's Report zum Workshop: „Vorgeschlagene Mechanismen für die Wechselwirkung hochfrequenter Felder mit lebender Materie – Demodulation in biologischen Systemen.“ Rostock, 11. – 13. September 2006'. <http://www.fgf.de/>

3.1.4 Ist der Sehapparat des Menschen durch gepulste elektromagnetische Felder des Mobilfunks beeinflussbar?

Frank Gollnick

Die Netzhaut menschlicher Augen (Retina) wird als Teil des Gehirns angesehen und ist anatomisch betrachtet ein Ausläufer des Vorderhirns. Es ist seit langem bekannt, dass regelmäßig gepulste visuelle Signale über die Augen und über die in Form von Nervenleitungen dahinter geschaltete „Sehbahn“ im Gehirn Effekte auslösen können, die bei bestehenden Krankheiten pathologisch sein können. So wird zum Beispiel fotosensiblen Epileptikern geraten, sich keinem Stroboskoplicht in Diskotheken auszusetzen und beim Fernsehen oder bei Videospiele bestimmte Regeln einzuhalten. Sogenannte „Magnetophosphene“ sind bekannte Lichtwahrnehmungen, die durch starke, von außen angelegte Magnetfelder im Experiment beim Menschen künstlich erzeugt werden können. Sie sind damit ein direkter Beweis, dass im Zentralnervensystem relativ schwache (induzierte) elektrische Felder grundsätzlich physiologische Effekte auslösen können.

Sind diese Tatsachen Grund genug anzunehmen, dass auch die „Pulsfrequenzen“ digitaler Mobilfunksignale womöglich über den Sehapparat Einfluss auf unser Gehirn nehmen können?

Der hier interessierende Bereich des elektromagnetischen Wellenspektrums

Auch das sichtbare Licht, für das die Augen des Menschen als Reizsensoren die größte Empfindlichkeit haben, gehört zum elektromagnetischen Wellenspektrum, wie auch die Signale von Mobilfunkgeräten. Die Wellenlängen und die damit direkt zusammenhängenden Wellenfrequenzen liegen allerdings in sehr unterschiedlichen Bereichen, die um mehrere Größenordnungen voneinander getrennt sind (Abb. 1).

Die Empfindlichkeit der Lichtrezeptoren in den Augen und die nachgeschaltete

neuronale Verarbeitung beginnen bei etwa 400 nm (Nanometer = Milliardstel Meter), entsprechend der Farbe Dunkelblau am Übergang zum Ultraviolettbereich, und enden bei etwa 750 nm, entsprechend der Farbe Dunkelrot am Übergang zum Infrarotbereich. In Wellenfrequenzen ausgedrückt liegt dieser Bereich zwischen 10^{14} Hz und 10^{15} Hz, also im PHz-Bereich (1 Petahertz = 10^{15} Hz). Dagegen liegen Mobilfunkfrequenzen bekanntlich im GHz-Bereich, das heißt im Bereich um 10^9 Hz bei Wellenlängen im Zentimeter- bis Meterbereich. Es liegen also fünf bis sechs Größenordnungen zwischen sichtbarem Licht und Mobilfunkfrequenzen.

Rund vier Größenordnungen liegen zwischen sichtbarem Licht und den etwas höherfrequenten Funkanwendungen, wie Radar und anderen Techniken im Mikrowellenbereich.

Somit ist es unmöglich, dass die *Trägerfrequenzen* der erwähnten Funkanwendungen in irgend einer Weise mit den Reizsensoren des Sehapparates wechselwirken und dort Einfluss nehmen – abgesehen von theoretisch möglichen Gewebeerwärmungen. Im vorliegenden Text geht es daher weniger um mögliche Auswirkungen der Trägerfrequenzen als um potenzielle Wechselwirkungen der nieder-

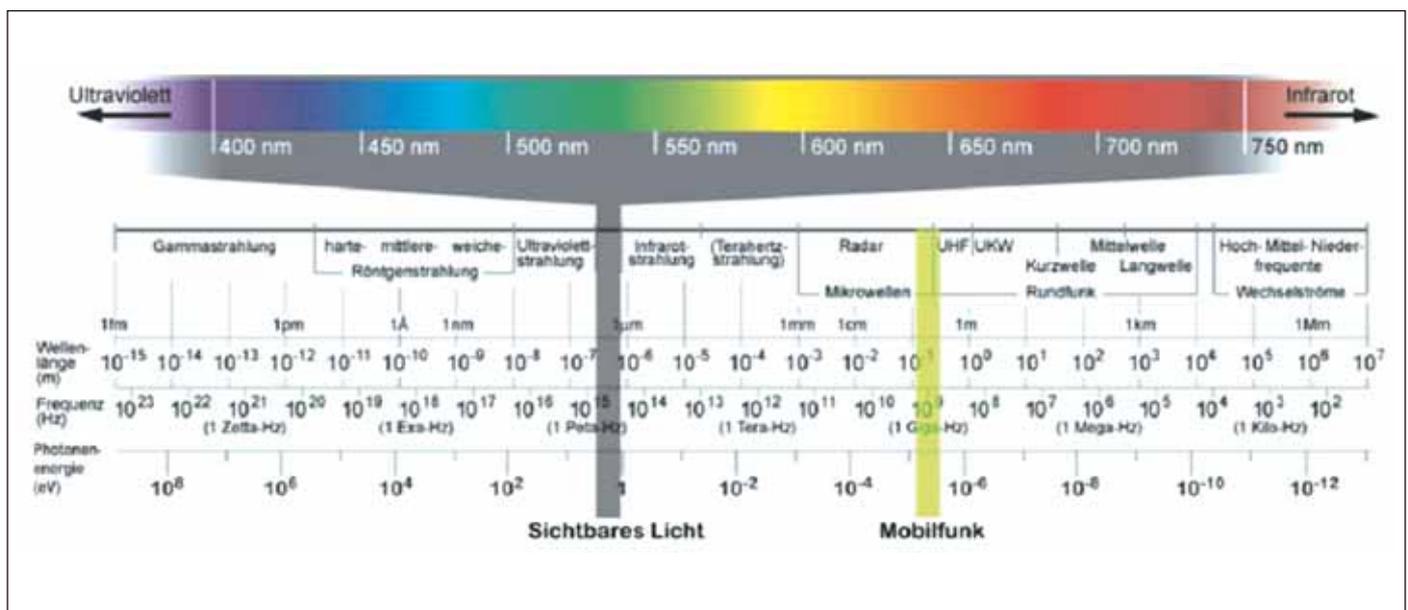


Abb. 1: Elektromagnetisches Wellenspektrum. Der Bereich des für den Menschen sichtbaren Lichts und der für den Mobilfunk genutzte Bereich sind hervorgehoben.

der Natriumkanäle in der Membran der Außenglieder der Rezeptorzellen führt.

Durch diese Veränderung des Natriumstroms durch die Zellmembran der Photorezeptoren kommt es bei Belichtung zu einer *Hyperpolarisation* des Membranpotenzials, bei Verdunklung zu einer *Depolarisation* (die elementaren Zusammenhänge hierzu wurden bereits in [1] dargestellt). Dieser Reaktionstyp weicht vom Verhalten der Rezeptorzellen anderer Sinnessysteme ab. Es kommt hier also ein *elektrisches* Signal in Form eines *Photorezeptorpotenzials* zustande, welches die Voraussetzung für eine differenzierte Reizweiterleitung über die angeschlossenen Nervensysteme bietet. Im Dunkeln be trägt das Membranpotenzial der Photorezeptormembran etwa -30 mV (Millivolt). Die Amplitude des Rezeptorpotenzials nimmt mit der Intensität des Lichtreizes zu und codiert somit in einem ersten Schritt verschiedene Helligkeiten oder Farbtintensitäten.

Da das Bild der Außenwelt bekanntlich durch den optischen Apparat des Auges verkleinert – wie in einer Kamera – auf die Netzhaut projiziert wird und weil die Rezeptorzellen dort in einer regelmäßigen Mosaikstruktur flächig angeordnet sind („Array“), kann man sich nun im Prinzip vorstellen, wie das Abbild der Außenwelt über Nerven-Aktionspotenzialserien verschiedener Frequenz durch Millionen von Nervenbahnen und durch neuronale Schaltstellen bis ins Gehirn übertragen und dort interpretiert wird (vergleiche zur Fortleitung von Reizen als Nervenimpulse nochmals [1] sowie Kap. 3.1.5).

Weiterleitung der Lichtsignale in das Gehirn

Die Fortleitung der Lichtreize in die entsprechenden verarbeitenden Zentren im Gehirn funktioniert im Prinzip genauso wie bei anderen sensorischen Reizen (erläutert in [1]). Hier wird es für die angesprochene Fragestellung interessant, denn hier kommen wieder relativ niederfrequente *Impulsserien* in Form von Aktionspotenzial-Serien ins Spiel, die den Code für die Signalweiterleitung in den Axonen der Nerven darstellen. Solche Impulsserien, die aus kurzfristigen, relativ starken Verschiebungen des Membranpotenzials der Nervenzellen bestehen, treten auf dem Weg der Signale zum Gehirn erstmals bereits im neuronalen Ge-

flecht der Netzhaut auf, wie in **Abb. 2** dargestellt. Hier wird es allerdings auch immer komplizierter, denn die vielen verschiedenen neuronalen Verschaltungsarten und Mechanismen in der Sehbahn und im Sehzentrum müssen die Unzulänglichkeiten der Augen als optischen Apparat kompensieren (Astigmatismus, sphärische und chromatische Abberation sowie Streulicht und natürliche Trübungen im dioptrischen Apparat hier nur als Stichworte). Das gesunde menschliche Auge hat von Natur aus wesentlich schlechtere optische Eigenschaften als eine gute Kamera, doch was die nachgeschalteten neuronalen Verarbeitungsprozesse daraus machen, ist bekanntlich mehr als ebenbürtig.

Man unterscheidet in der Netzhaut einen „direkten“ Signalfluss (Fotorezeptoren-Bipolarzellen-Ganglienzellen) und einen „lateralen“, also quer zur Lichteinfallrichtung laufenden Signalfluss von den Fotorezeptoren über die sogenannten Interneurone (Horizontalzellen, Amakrinen) zu den Bipolar- und Ganglienzellen ([4], vergleiche **Abb. 2**). Bei der Verschaltung dieser Signalflüsse kommt es teilweise zur „Gruppenbildung“, die „synaptische Konvergenz“ genannt wird: Im Außenbereich des Gesichtsfeldes (also in der Peripherie der Fovea centralis) laufen die Signale von etwa 1000 Stäbchenzellen in 20 bis 50 Bipolarzellen zusammen, welche die umgesetzten Signale an *eine* Ganglienzelle weitergeben. In der Mitte des Gesichtsfeldes (im Zentrum der Fovea) ist dieses Verhältnis, ausgehend von einer Zapfenzelle,

dagegen 1:1:1 (**Abb. 3**). Dieser für die hier behandelte Fragestellung wichtige Aspekt wird später noch einmal aufgegriffen.

Durch solche Mechanismen synaptischer Konvergenz entsteht funktionell eine Einteilung des Gesichtsfeldes in sogenannte „Rezeptive Felder“ (RF). Ein RF ist somit einem visuellen Neuron, also einer Nervenzelle, zugeordnet und bezeichnet einen Bereich aus dem Gesamtbild, das wir sehen (entsprechend einem bestimmten Feld auf der Netzhaut), welches zu einer (elektrischen) Aktivitätsänderung dieses Neurons führt. Man muss sich RFs sehr klein vorstellen (in der Peripherie der Netzhaut größer als im Zentrum), dennoch können sie in funktionell unterschiedliche Bereiche aufgeteilt sein: Das RF-Zentrum ist meist von einer *ringförmigen Peripherie* umgeben. RFs benachbarter Neurone überlagern sich. Wie in **Abb. 4** dargestellt, können Lichtreize in den RFs verschiedener Neuronentypen unterschiedliche, ja gegensätzliche, Reaktionsmuster in Form von Impulsserien auslösen, zusätzlich abhängig davon, welcher Teil des RFs belichtet wird.

Es dominiert dabei meist die aus dem RF-Zentrum ausgelöste Antwort. Die subjektive Helligkeit und die neuronale Impulsrate sind dabei immer linear (positiv oder negativ) miteinander korreliert. Stellt man sich nun vor, dass beim Sehvorgang eine Hell/Dunkel-Grenze über ein RF wandert oder eine Kontrastgrenze auf ein RF fällt, so kann man sich vorstellen, dass dieser hier beispielhaft angesprochene

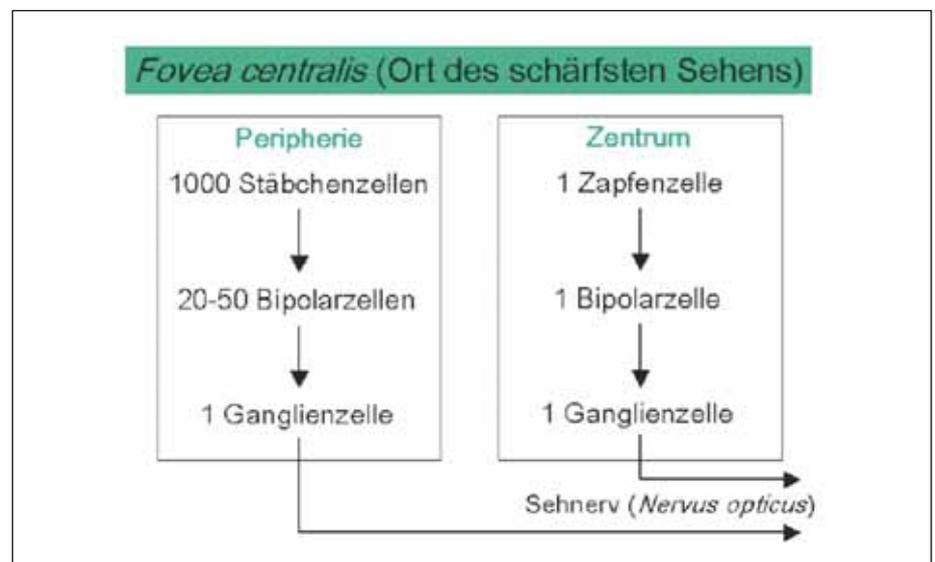


Abb. 3: Synaptische Konvergenz bei der Reizweiterleitung in der Netzhaut, vor allem in der Peripherie der Fovea centralis.

neuronalen Mechanismus, je nach Typ des Neurons mit seinem zugehörigen RF, letztendlich zu einer *Bildverbesserung* (z. B. Kontrast) wie auch zur *Wahrnehmung von Objektbewegung oder Eigenbewegung* führen kann.

Im entsprechenden Areal der primären Hirnrinde, in dem die wesentlichen Bildsignale über Axone geleitet eintreffen und verarbeitet werden (Area V1: Objekterkennung, Farbsehen, Bewegungssehen, Raumwahrnehmung), sind verschiedene Gewebezonen ganz unterschiedlich empfindlich gegenüber mehrerlei Reizqualitäten.

Abb. 5 zeigt schematisch einen quaderförmigen Gewebeausschnitt aus diesem Areal, in dem funktionelle Gruppen von Nervenzellen „säulenartig“ organisiert sind. Ein Teil reagiert besonders empfindlich (mit den dort dargestellten elektrischen Impulsserien in Form von Aktionspotenzialen) auf bewegte Kontrastgrenzen (**Abb. 5, A**), bestimmte Teile auf diffuses Licht *oder* Flickerlicht (**Abb. 5, B**), und wieder andere Teile auf bestimmte Farbwerte (**Abb. 5, C**, als Reaktion auf farbige Lichtpunkte, die im Experiment jeweils in das RF-Zentrum projiziert wurden).

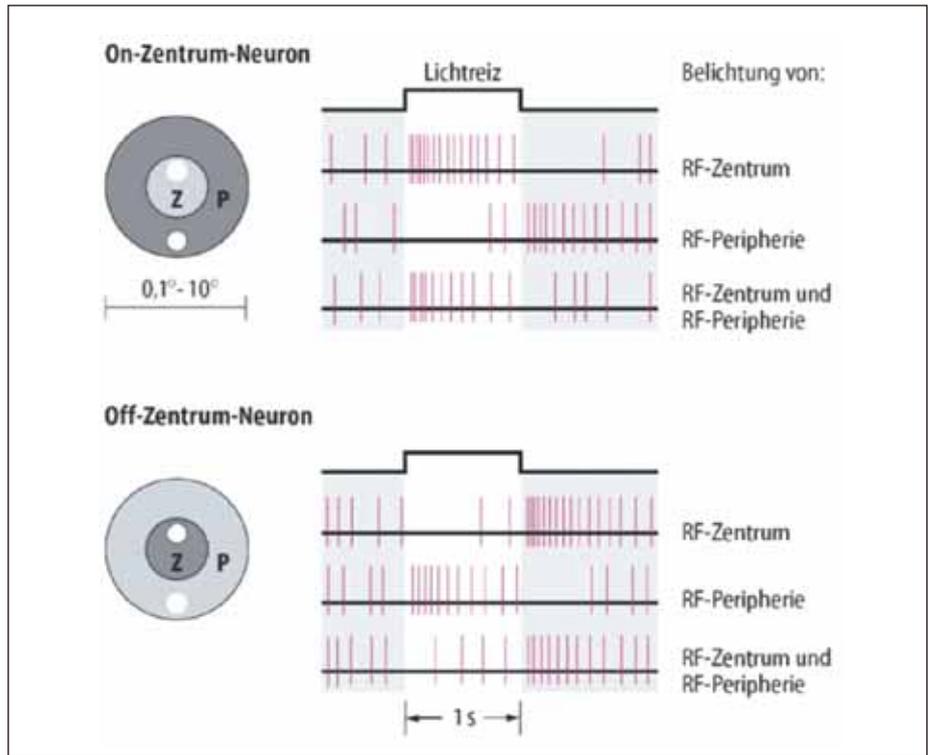


Abb. 4: Gegenätzliche fortgeleitete Impulsmuster aufgrund jeweils einer punktförmigen Belichtung der Zentren (Z) und/oder der Peripherien (P) von Rezeptiven Feldern (RF), die zu verschiedenen Neuronentypen gehören. Zum Beispiel löst eine Belichtung des RF-Zentrums beim On-Zentrum-Neuron eine hohe Impulsrate aus, beim Off-Zentrum-Neuron geschieht dies bei Belichtung der RF-Peripherie. (aus [4])

An dieser Stelle der Betrachtung und mit diesem letzten Beispiel kann der Gedanke aufkommen, dass der Sehvorgang durch die komplizierte mehrfache Umcodierung

der Sehbilder in Impulsserien auch beeinflussbar sein könnte für Störungen von außen oder (ungewollte) Modifikationen aus dem eigenen Körper. Die Frequenzen

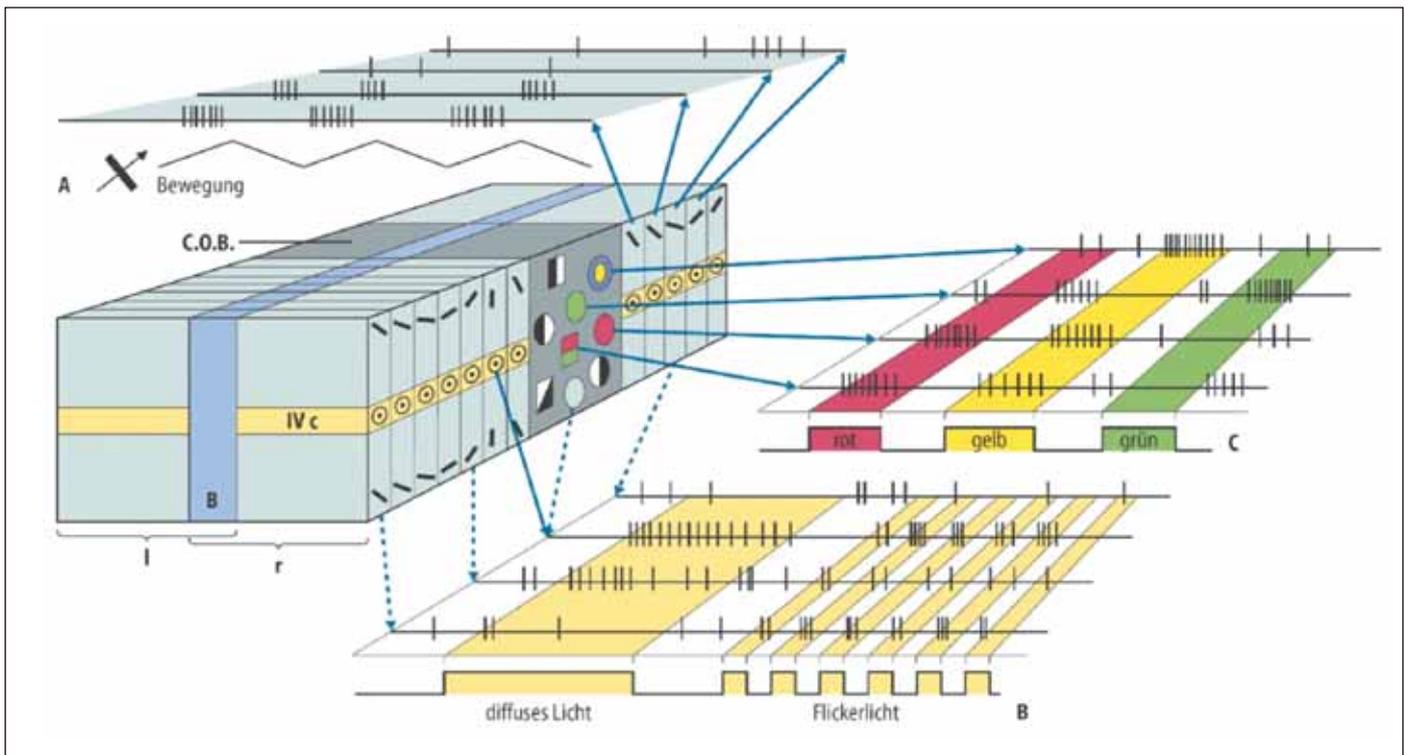


Abb. 5: Schema eines quaderförmigen Gewebeausschnitts aus der primären Sehrinde im Gehirn mit entsprechenden Impulsmustern, ausgelöst durch verschiedene optische Reize (A, B, C). Die speziellen elektrischen Umsetzungen der wahrgenommenen Reize treten getrennt in verschiedenen Gewebearealen auf und werden von unterschiedlichen funktionellen Nervenzellgruppen produziert. (aus [4])

der Impulsserien, die bei der neuronalen Verarbeitung in der Netzhaut und in der Sehbahn eine Rolle spielen, liegen normalerweise etwa im Bereich von 1 Hz bis 100 Hz, wie noch einmal am Beispiel der Verarbeitung einer Kontrastgrenze in **Abb. 6** gezeigt. Wie steht es also um die Empfindlichkeit des Sehorgans, auch gegenüber äußeren Pulsmustern in diesem Frequenzbereich, die das Auge erreichen?

Empfindlichkeit des Sehens

Es wurde oben bereits erwähnt, dass mit den Stäbchenzellen der Retina am empfindlichsten gesehen wird, zum Beispiel bei Sternenlicht. Da dieser Zelltyp aber *nicht* am Ort des schärfsten Sehens in der Netzhaut, der *Fovea centralis*, zu finden ist, sondern am dichtesten in der Peripherie der Fovea (siehe oben), ist das Zentrum der Fovea beim Menschen für das *Tageslichtsehen* spezialisiert. Im begrenzten Areal der Fovea, wo immer genau die Mitte des Bildes auf das wir blicken abgebildet wird, ist die Rezeptorzellichte an farbtüchtigen aber Helligkeits-unempfindlicheren Zapfenzellen am höchsten. Bei längerer Anwesenheit in dunkler Umgebung „gewöhnen“ wir uns bekanntlich nach und nach an die Dunkelheit und können zunehmend mehr erkennen. Dieser Mechanismus der „*Dunkeladaptation*“ findet bei den Stäbchenzellen sehr viel ausgeprägter statt als bei den Zapfenzellen und ist dort erst nach etwa 50 Minuten ganz beendet (bei Zapfenzellen bereits nach etwa 10 Minuten). Nach einem einstündigen Aufenthalt in völliger Dunkelheit kann die *Absolutschwelle des Sehens* eine Empfindlichkeit von etwa 1 bis 4 absorbierten Lichtquanten pro Rezeptorzelle und Sekunde erreichen [4]. Umgekehrt verläuft die *Helladaptation* wesentlich schneller im Sekunden- bis Minutenbereich. Bei den Prozessen spielen neben der Änderung des Gleichgewichts zwischen zerfallenem und unzerfallenem Sehfärbstoff (siehe oben) neuronale Mechanismen eine Rolle. So findet bei der Dunkeladaptation eine „Umschaltung“ des Sehens vom Zapfensystem zum Stäbchensystem statt, und die im Hellen teilweise gehemmten lateralen (also weiter von der Fovea centralis entfernten) Ganglienzellen werden aktiver. Dadurch dehnen sich die Rezeptiven Felder der retinalen Ganglienzellen (siehe oben) funktionell aus. Dies bedingt zwar eine Abnahme der Sehschärfe, aber

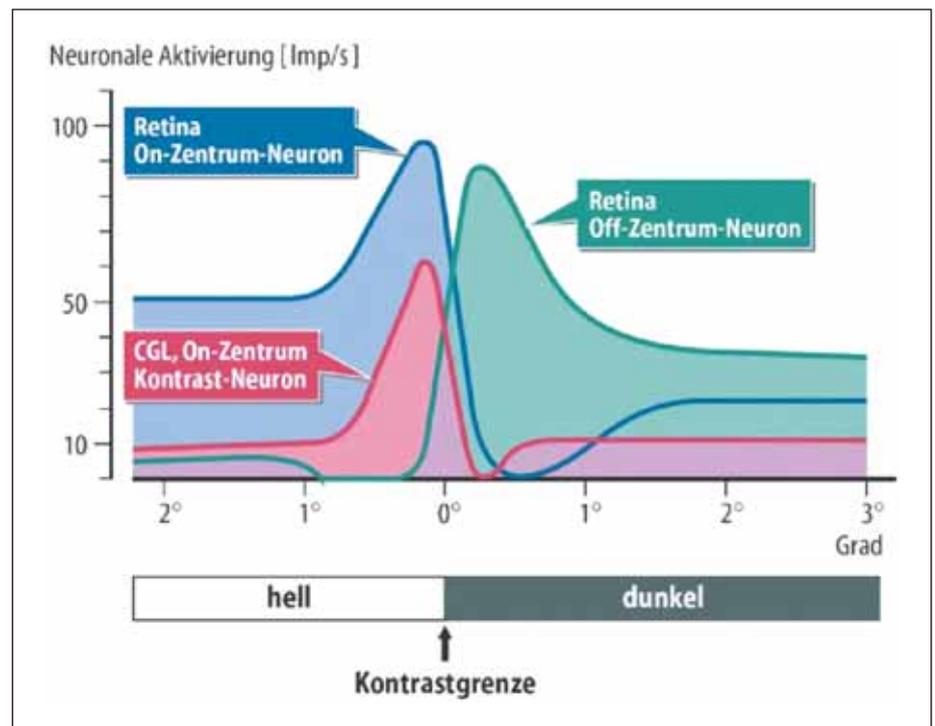


Abb. 6: Frequenzen der Impulsserien in drei verschiedenen Neuron-Typen bei der neuronalen Aktivierung durch eine Hell-/Dunkel-Grenze, die über die Rezeptiven Felder der unterschiedlichen Neuronen verläuft. Dargestellt sind die Impulsfrequenzen in Abhängigkeit vom Abstand (in Winkelgraden) von der Kontrastgrenze. CGL: Ein subkortikales visuelles Zentrum, also eine „Schaltstation“ der Sehbahn im Gehirn. (aus [4])

ein größerer Bereich der Netzhaut trägt jetzt zur Aktivierung einer weiterverarbeitenden Nervenzelle bei – Licht wird auf Kosten der Sehschärfe gesammelt.

Was den Sehfärbstoff betrifft, so findet bei ihm auch in völliger Dunkelheit ständig ein natürlicher *thermischer Zerfall* statt. Dies führt bei längerem Aufenthalt in dunklen Räumen oder auch im wachen Zustand bei geschlossenen Augen (und verstärkt bei hohem Fieber) zu Lichtwahrnehmungen ohne physikalisches Licht und ohne retinales Bild. Diese nicht pathologischen Erscheinungen reichen von schwachem Lichtnebel über rasch aufleuchtende Lichtpünktchen und bewegte undeutliche Strukturen von verschiedenen Graustufen bis hin zu farbigen Mustern, Gesichtern, Gestalten oder Szenen. Die Ausprägung ist natürlicherweise individuell unterschiedlich. Solche Phänomene sind von den hier später noch erwähnten Auswirkungen *inadäquater Reize* und von *pathologischen Lichterscheinungen* zu unterscheiden.

Die *zeitlichen Übertragungseigenschaften der Netzhaut* spielen beim Betrachten von Filmen und Bildschirmen heutzutage eine bedeutende Rolle. Alle damit zusammenhängenden Techniken benutzen visuelle

Muster, die aus schnell intermittierenden Bildern aufgebaut werden. Die *Flimmerfusionsfrequenz* oder „kritische Flimmerfrequenz“ (CFF) ist die Frequenzgrenze, bei der schnell wechselnde Lichtreize gerade *keinen* Flimmereindruck mehr hervorrufen. Diese klinisch messbare Grenzfrequenz ist abhängig davon, ob der Sehapparat hell- oder dunkeladaptiert ist. Im dunkeladaptierten Zustand beträgt die maximale CCF 22 bis 25 Lichtreize pro Sekunde. Sie steigt im Hellen entsprechend dem Logarithmus der Leuchtdichte, des Modulationsgrades und der gereizten Netzhautfläche bis maximal 90 Lichtreize pro Sekunde. Diese Gesetzmäßigkeiten gelten gleichermaßen für die Netzhaut wie auch für die weiterverarbeitenden Nervenzellen bis in die primäre Sehrinde im Gehirn. Hell/Dunkel-Wechselreize im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 15 Hz lösen eine besonders starke Aktivierung der Nervenzellen in der Retina und im visuellen Kortex aus. Es kommt dadurch zu einer subjektiven Helligkeitszunahme solcher Lichtreize [4]. Im Zusammenhang hiermit stehende *epileptische Anfälle* werden im nächsten Kapitel erwähnt.

Inadäquate Reizung, pathologische visuelle Erscheinungen und Epilepsie

Übt man im Dunkeln oder bei länger ge-

geschlossenen Augen mit dem Finger Druck auf den Augapfel aus (oder auch bei längerem „Augenreiben“), so entsteht ein Lichtschein oder ein Lichtnebel, der sich bei anhaltender Deformierung über die Netzhaut ausbreitet und von hellen, stationären Lichtpunkten oder von schwarz-weißen und auch bunten Lichtmustern begleitet bzw. zunehmend überstrahlt wird. Solche sogenannten „*Druckphosphene*“ oder „*Deformationsphosphene*“ entstehen, weil bei der Deformation des Augapfels die „Horizontalzellen“ in der Netzhaut (siehe **Abb. 2**) gedehnt werden und sich dadurch die Durchlässigkeit für Natriumionen in ihren Zellmembranen erhöht, was eine Depolarisation des Membranpotenzials bewirkt. Dadurch werden andere in Kontakt mit diesen Zellen stehende, weiterverarbeitende Nervenzellen aktiviert oder gehemmt. Dies bewirkt eine künstlich hervorgerufene Lichtwahrnehmung ohne die physikalische Einwirkung von Licht.

Ähnlich erklärt man sich heute auch die bereits um die vorletzte Jahrhundertwende beobachteten „*Magnetophosphene*“ oder „*elektrischen Phosphene*“ [5, 6]. Sylvanus P. Thompson beschrieb 1910, als er seinen Kopf im starken Magnetwechselfeld einer Helmholtz-Spule bewegte, „eine flimmernde Lichtwahrnehmung“, die „im äußeren Teil des Gesichtsfeldes am genauesten erkennbar“ war [7]. Hierbei müssen die angelegten Magnetfelder so stark sein, dass es dadurch entweder zu einer nennenswerten Verformung der Zellmembranen kommt oder dass Ionenströme durch die Membranen direkt bzw. über Einwirkung auf ihre Durchlassproteine beeinflusst werden. Man weiß heute, dass die sensitiven Elemente für eine solche elektromagnetische Reizung in den elektrisch erregbaren Ganglienzellen der Netzhaut liegen und nicht in den Photorezeptorzellen selbst. Der Effekt tritt nämlich auch im Falle einer Krankheit auf, bei der keine funktionierenden Fotorezeptoren mehr vorhanden sind (*Retinitis pigmentosa*), tritt aber nicht mehr auf, wenn eine funktionierende Retina fehlt (bei fortgeschrittenem chronischem *Glaukom*) [8]. Im Bereich niedriger Frequenzen bis 50 Hz wurde die von allen Frequenzen niedrigste Auslöseschwelle für Magnetophosphene bei 20 Hz festgestellt und mit etwa 10 mA/m² an der Membran der betreffenden Nervenzellen abgeschätzt (angelegte magnetische

Flussdichte: 5 mT [Millitesla]) [9]. Auch mit der diagnostisch und neuerdings therapeutisch eingesetzten klinischen Methode der Transkraniellen Magnetischen Stimulation (TMS) lassen sich elektrische Phosphene erzeugen. Hierbei werden jedoch nicht Elemente der Netzhaut mit einer starken Magnetspule von außen gereizt, sondern solche in der primären Sehrinde im Gehirn. Es entstehen bei dieser Methode lokal induzierte elektrische Felder von 50 – 100 V/m. Prinzipiell lassen sich auch die übrigen Elemente der Sehbahn, also der Sehnerv und andere afferente visuelle Nervenleitungen, mit sehr starken Feldern von außen elektrisch so reizen, dass die Wahrnehmung von Phosphenen eintritt. Von einigen Wissenschaftlern werden auch Kugelblitze für eine „neurophysikalische Illusion“ in Form magnetischer Phosphene gehalten, die allein durch das starke Magnetfeld eines in der Nähe einschlagenden gewöhnlichen Blitzes im Gehirn der Betrachter ausgelöst werden [10]. Hierfür spricht, dass es bis heute keine gesicherte fotografische oder filmische Dokumentation eines Kugelblitzes gibt sowie die Tatsache, dass physikalische Modelle das Verhalten zweifellos beobachteter Kugelblitze in *geschlossenen Räumen* nicht zufriedenstellend erklären können.

Auch bei *Migräne* können endogene, also ohne Licht von außen entstehende Lichterscheinungen („*Migränephosphene*“) auftreten. Diese meist als hell flimmernde, zickzackförmig strukturierte und gekrümmte Bänder wahrgenommenen Phosphene entstehen durch eine vorübergehende Regulationsstörung des Ionen gehaltes im Flüssigkeitsraum zwischen den Nervenzellen (Extrazellularraum) der primären Sehrinde im Gehirn. Schließlich gibt es sogenannte „*szenische visuelle Halluzinationen*“, die jeder aus seinen Träumen in der REM-Phase des Schlafes kennt. Außerhalb des Schlafes kommen „*pathologische visuelle Halluzinationen*“ im Verlauf von Psychosen, bei alkoholischem Delirium sowie beim Missbrauch bestimmter Drogen vor.

Oben wurde bereits erwähnt, dass durch Flimmerlicht bestimmter Frequenzen *epileptische Anfälle* ausgelöst werden können (Fotosensibilität). Dies ist bei ungefähr 0,025 % aller Menschen (= jedem Viertausendsten) und bei 5 % der Epilepsiepatienten der Fall [11]. Mädchen beziehungsweise Frauen sind 1,5 bis 2 mal

häufiger fotosensibel als Jungen beziehungsweise Männer [12]. Im klinischen Bereich wird das Risiko einer Anfallprovokation mit der Methode des EEG (Elektroenzephalogramm) im Frequenzbereich von 2 bis 60 Hz getestet, in dem auch viele Bildschirmwendungen liegen (Fernsehen, Computerarbeit, Videospiele). Es zeigt sich, dass Maxima der Hell-Dunkel-Reizung, die sich im EEG des Epilepsiepatienten durch besondere Gehirnwellen („*Krampfpotenziale*“) zeigen, im oben bereits erwähnten Frequenzbereich des Flimmerlichts zwischen 5 und 15 Hz auftreten. Für *partielle Epilepsien* gibt es jedoch keine gesicherten Hinweise auf eine Anfallsauslösung durch Bildschirmwendungen. Andere Faktoren als das reine, regelmäßig getaktete Flimmerlicht (erhöhte Konzentration bei Videospiele, sich schnell bewegende oder abwechselnde optische Muster) spielen ebenfalls eine Rolle. Dennoch gelten Fernsehgeräte, die mit einer Bildwiederholffrequenz von 100 Hz arbeiten, für Epilepsiepatienten allgemein als risikoärmer als solche, die mit den meist üblichen 50 Hz arbeiten [11].

In einer aktuellen wissenschaftlichen Publikation wird berichtet, dass im Tierversuch an Ratten, die durch Verabreichung einer Substanz epilepsieanfällig gemacht wurden, Krampfanfälle auch durch die Einwirkung von 900-MHz-Mobilfunkfeldern nach dem GSM-Standard ausgelöst werden [13]. Die Veröffentlichung lässt allerdings eine Reihe methodischer Fragen offen und kann damit nicht als starker Hinweis betrachtet werden (mangelnde Beschreibung des Versuchsaufbaus und der praktischen Versuchsdurchführung, ungeklärte Nebenwirkungen der Epilepsie-auslösenden Substanz auch ohne Mobilfunkfeld, Ungereimtheiten bei der Dosimetrie, implantierte Stahlschrauben als EEG-Elektroden am Kopf, die auch als Antennen wirken können und starke Feldüberhöhungen an den Spitzen erzeugen!). Auf das Thema Epilepsie wird im vorliegenden Dokument in Abschnitt 3.1.8 näher eingegangen. Weitere Aspekte in Bezug auf die genannte Publikation wurden im FGF-Newsletter bereits eingehend diskutiert [14].

Neuronale Netzwerke

Die weiter oben erläuterte „*synaptische Integration von Reizen*“ in sensorischen

Signalwegen und neuronalen Netzwerken erscheint im hier behandelten Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Man findet sie bei einigen Tierarten mit außergewöhnlichen sensorischen Fähigkeiten *in sehr ausgeprägter Form* verwirklicht. So können zum Beispiel manche Unterarten von Haien, Rochen und Stören oder auch die Schnabeltiere extrem kleine elektrische Felder, zum Teil über erstaunlich große Distanzen, mit besonderen Organen sensorisch erfassen [15]. Hierbei werden beispielsweise von Haien mit den sogenannten „Lorenzinischen Ampullen“ über größere Entfernungen die elektrischen Potenziale aufgespürt, die bei der Bewegung von Muskeln in Beutetieren entstehen. Die Empfindlichkeit der ganzen sensorischen Organe ist dabei jeweils sehr viel größer als die Empfindlichkeit der einzelnen, in ihnen befindlichen Sensorzellen. Vergleichbare Empfindlichkeiten findet man auch bei einigen Temperatursensor-Systemen von Säugetieren, die noch Unterschiede von 0,02 °C erfassen können [16].

An den Zellmembranen der Sensorzellen werden bei solchen Sensorleistungen durch die äußeren Felder primär nur geringste Veränderungen des Membranpotenzials im Bereich von ungefähr 200 nV (Nanovolt = Milliardstel Volt) erzeugt [16]. Das Ruhemembranpotenzial erregbarer Zellen beträgt allgemein etwa –80 mV (Millivolt = Tausendstel Volt), bei Fotorezeptorzellen wie erwähnt –30 mV. Es handelt sich also um eine nur etwa 0,0005-prozentige Änderung der normalen durchschnittlichen Membranpotenziale erregbarer Rezeptorzellen, die in den genannten besonderen sensorischen Organen mancher Tiere eine Reizantwort auslösen kann! Hinter diesen Leistungen stehen, wie man heute weiß, sehr effektive *Verstärkungs- und damit Rauschunterdrückungs-Mechanismen*, die auf neuronalen Netzwerken beruhen. Das Signal-Rausch-Verhältnis kann in solchen Systemen bei idealer Effizienz proportional der Quadratwurzel aus der Anzahl zusammenwirkender Neurone angenommen werden ($\text{Signal/Rausch} \propto \sqrt{N_{\text{Zellen}}}$) [16]. Immer wird hierbei angenommen, dass eine nennenswerte Anzahl „primärer Neurone“ ihre Signale an mehrere (aber eine insgesamt geringere Anzahl) „sekundärer Neurone“ weitergeben, diese ihre Signale wiederum mehrfach auf (noch weniger) „tertiäre Neurone“ über-

tragen und so weiter, bis ein verstärktes und aus dem Rauschen herausragendes Summensignal auf nur noch eine weiterleitende Nervenzelle, ein Ganglion, übertragen wird. Dabei können in der zweiten und den folgenden Ebenen zusätzliche Quervernetzungen mit eingebauten unterdrückenden oder freischaltenden Mechanismen eine zusätzliche Rolle spielen.

Solche neuronalen Verhältnisse findet man, wie weiter oben dargestellt, auch in der menschlichen Netzhaut wieder (vergleiche unter „Weiterleitung der Lichtsignale in das Gehirn“), nur nicht ganz so ausgeprägt wie in den genannten Spezialorganen mancher Tiere. Sucht man also nach dem durch äußere elektromagnetische Felder „beeinflussbarsten Glied“ in der Signalkette des Sehapparates des Menschen, so wäre das neuronale Netzwerk in der Retina zunächst an erster Stelle zu nennen. Dort insbesondere das für das Hell/Dunkel-Sehen zuständige Stäbchensystem in der Peripherie der Fovea centralis mit ausgeprägten „Rezeptiven Feldern“ und synaptischer Konvergenz. Hier, wo das Auge seine Aufgaben mit der größten Empfindlichkeit wahrnimmt, sollten die kleinsten Verschiebungen im Membranpotenzial der Rezeptorzellen genügen, um eine (neuronal verstärkte) Antwort in Richtung Gehirn weiterzuleiten. Allerdings sprechen die genannten Ergebnisse zu Magnetophosphenen dagegen, dass die größte Einflussnahme auf der Ebene der Fotorezeptoren selbst stattfinden kann (siehe oben). Vielmehr trifft dies demnach auf die Ebene der „sekundären Neurone“, in der Retina also die der Bipolarzellen und der Interneurone (siehe oben) zu. Ob diese allerdings direkt durch gepulste elektromagnetische Felder von Mobilfunkanwendungen beeinflusst werden können, steht auf einem ganz anderen Blatt.

Zusammenfassung der Fakten und die Frage nach einem direkten Einfluss der Trägersignale

Erst wenn alle hier zuvor erwähnten Eckdaten und Zusammenhänge zum physiologischen Vorgang des Sehens berücksichtigt sind (und dies ist nur ein kurz gehaltener Auszug aus den noch wesentlich komplexeren Zusammenhängen), kann man eine Einschätzung wagen, an welcher Stelle und wie möglicherweise eine Beeinflussung der Sehvorgänge

durch gepulste elektromagnetische Felder des Mobilfunks stattfinden könnte. Einige Eckdaten seien noch einmal zusammengefasst:

- Zwischen dem Frequenzbereich der elektromagnetischen Empfindlichkeit der Augen und den Trägerfrequenzen von Funkanwendungen liegen etwa 4 bis 6 Größenordnungen.
- Lichtreize werden, wie auch andere Sinnesreize, umcodiert und mehrfach neuronal umgesetzt, bis sie ins Gehirn gelangen.
- Die Frequenzen der Impulsreihen, die bei der neuronalen Verarbeitung in der Netzhaut und in der Sehbahn auftreten, liegen in der gleichen Größenordnung wie die niederfrequenten „Modulationsfrequenzen“ gepulster Funksignale.
- Die physiologische Absolutschwelle für die Wahrnehmung von Licht liegt bei 1 bis 4 absorbierten Lichtquanten pro Rezeptorzelle und Sekunde.
- Die mögliche Wahrnehmung verschiedener Lichtstärken reicht über 13 Größenordnungen von 10^{-6} bis etwa 10^7 cd/m².
- Es herrscht ständig ein natürlicher thermischer Zerfall des Sehfärbstoffs in den Rezeptorzellen, der in absoluter Dunkelheit als eine Art graues „Hintergrundrauschen“ wahrnehmbar ist (physiologisch: „Eigengrau“).
- Es gibt natürliche, pathologische und künstlich hervorgerufene Lichtwahrnehmungen ohne die Einwirkung physikalischen Lichts (Phosphene).
- Die niedrigste Auslöseschwelle für Magnetophosphene wurde bei 20 Hz-Reizung mit einer magnetische Flussdichte von 5 mT festgestellt (abgeschätzte 10 mA/m² an der Membran der betreffenden Nervenzellen)
- Bei der Transkraniellen Magnetischen Stimulation entstehen in der primären Sehrinde des Gehirns lokal induzierte elektrische Felder von 50 – 100 V/m, die die Wahrnehmung elektrischer Phosphene bewirken können.
- Die „Flimmerfusionsfrequenz“, ab der schnell wechselnde Lichtreize gerade keinen Flimmereindruck mehr hervorrufen, liegt – abhängig von der Umgebungshelligkeit – bei 22 bis 90 Hz.
- Ein maximaler Flimmereindruck tritt natürlicherweise bei Frequenzen von 5 bis 15 Hz mit einer überhöhten Wahrnehmung des Flimmerns ein. Insbesondere hier können bei 0,025 % aller

Menschen und bei 5 % der Epilepsiepatienten epileptische Anfälle ausgelöst werden (Fotosensibilität).

- In einer aktuellen Publikation, die viele methodische Fragen offen lässt, wird berichtet, dass im Tierversuch an epilepsieanfälligen Ratten Krampfanfälle durch GSM900-Mobilfunkfelder ausgelöst wurden.
- Durch synaptische Konvergenz entstehen in der Netzhaut „Rezeptive Felder“, in denen die Information von bis zu 1000 Rezeptorzellen an eine Ganglienzelle weitergeleitet wird.
- Die neuronalen Netzwerke in der Retina ähneln in Aufbau und Funktion solchen Netzwerken, die bei manchen Tieren durch Verstärkung und Rauschunterdrückung in Spezialorganen zu enormen sensorischen Leistungen führen.

Bei der Frage, ob es zu einer *direkten* Wechselwirkung zwischen den Trägerfrequenzen von Funkanwendungen und den empfindlichsten Elementen des Sehapparates kommen kann, hilft der Vergleich der möglichen Kraftwirkungen bei verschiedenen Strahlungswellenlängen, der bereits in [1] angestellt wurde. Dabei zeigt sich, dass die Photonenenergie von sichtbarem Licht zwischen 1,5 und 3,3 eV (Elektronvolt; Energieeinheit für Atome und Moleküle) liegt (vergleiche auch **Abb. 1**) und immerhin ausreicht, Moleküle wie das Rhodopsin zu verbiegen. 1 eV ist laut Definition die Energie, die ein mit einer Elementarladung geladenes Teilchen (zum Beispiel ein Elektron) erhält, wenn es durch die Spannung 1 Volt frei im Vakuum beschleunigt wird. Dagegen haben Wellen im Bereich von Funkanwendungen nur noch Photonenergien zwischen 0,00001 und 0,0001 eV, die im äußersten Falle der Radarwellen allenfalls noch dazu ausreicht, die thermisch bedingte natürliche Grundvibration von Molekülen geringfügig zu verstärken. Bei Berücksichtigung der unteren physiologischen Absolutschwelle der Wahrnehmung von 1 bis 4 absorbierten Lichtquanten pro Rezeptorzelle und Sekunde ist also ausgeschlossen, dass der Sehapparat auf diesem Wege einer Beeinflussung durch schwache Funkwellen alltäglicher Funkanwendungen unterliegen könnte.

Der ständige und natürliche thermische Zerfall des Sehfärbstoffs in den Rezeptorzellen, der bei absoluter Dunkelheit sogar eine Eigenwahrnehmung von

schwacher Helligkeit ohne äußeres Licht vortäuscht, dürfte angesichts der normalerweise vorkommenden Temperaturschwankungen im Körper als „Hintergrundrauschen“ wesentlich stärker sein als jegliche Temperaturerhöhung, die durch eingestrahlte Hochfrequenzfelder unterhalb der gültigen Grenzwerte am Ort der visuellen Reizentstehung maximal zustande kommen kann. So bleiben, wie bereits in [1], nur die theoretische Möglichkeit einer Demodulation niederfrequenter Spektralanteile der gepulsten Funksignale in biologischem Gewebe sowie die Frage nach den *Schwellenwerten* einer Wirksamkeit solcher (möglicherweise entstehenden) niederfrequenten Pulse auf das hier betrachtete visuelle System.

Schwellenwerte zur Auslösung nervlicher Reaktionen

Um eine gedankliche Annäherung hieran zu bekommen, betrachten wir noch einmal die elektrischen Phosphene: Sie sind – ohne Berücksichtigung einer eventuellen gesundheitlichen Relevanz – der einzige direkt wahrnehmbare Beweis dafür, dass elektromagnetische Felder einen visuellen Effekt und damit Feldeffekte im Zentralnervensystem des Menschen hervorrufen *können*. Außerdem machen die speziellen neuronalen Netzwerkeigenschaften die Netzhaut besonders empfindlich für physiologisch relativ schwache elektrische Felder. Und: Es gibt Wahrnehmungsüberhöhungen bei gepulstem Licht bestimmter Frequenzen. Wir haben es also bei der Netzhaut mit dem Teil des Zentralnervensystems zu tun, der absolut am empfindlichsten auf niederfrequente elektromagnetische Wellen (bzw. niederfrequente Pulsanteile solcher Wellen im Falle einer Demodulation) reagieren dürfte. Andere Gewebeabschnitte des Gehirns sind weniger reizbar, werden überwiegend durch spannungsgesteuerte Ionenkanäle ohne so ausgefeilte Verstärkungsmechanismen gesteuert und reagieren somit wahrscheinlich auch weniger empfindlich auf induzierte Felder.

Bei der Stimulation peripherer Nerven ist eine Potenzialverschiebung von 10 bis 20 mV erforderlich, um die Schwelle der Membran-Depolarisation, also eine Nervenreaktion, zu erreichen. Hierzu muss die induzierte Feldstärke im Gewebe etwa 5 bis 25 V/m betragen. Zwischen 10 Hz und 1000 Hz Stimulationsfrequenz bleibt die

Reaktion konstant [15]. Experimente an Probanden mit gepulsten 900-MHz- und 1800-MHz-Feldern (0,1 und 100 ms Pulsdauer, 100 W maximal applizierte Leistung), die auf die peripheren Nerven und die Skelettmuskeln der Testpersonen einwirkten, wurden so gedeutet, „dass die applizierten Mikrowellenpakete, falls überhaupt, nur einen Beitrag *unter ca. 4 mV* zur Membranspannung aufbauen können“ [2]. Geht man danach von 100-fach bis 400-fach schwächeren Ausgangsleistungen beim Gebrauch eines Mobiltelefons aus (und von noch viel schwächeren Feldern der Basisstationen), kalkuliert noch den Weg von der Handy-Antenne durch das feldabschwächende Gewebe bis zur Netzhaut, so dürfte nach einer groben Abschätzung in den dortigen Zellen allenfalls noch ein zusätzlicher Beitrag zum Membranpotenzial im Bereich einiger 100 nV entstehen, der nur noch für die Reizung der oben erwähnten Spezialorgane einiger Fische ausreichen würde. Da die Verstärkung durch neuronale Netzwerke in der Sehbahn bei weitem nicht so ausgeprägt ist wie bei den genannten Spezialorganen der Tiere (und auch nur im dunkel adaptierten Zustand maximal arbeitet), ist von daher nicht mit einer Beeinflussbarkeit durch Mobilfunkfelder unterhalb der gültigen Grenzwerte zu rechnen, selbst wenn eine Demodulation der niederfrequenten Spektralanteile vorkommen sollte.

Einige Experimente im Reagenzglas (*in vitro*) deuten allerdings auf niedrigere Schwellenwerte für die Auslösung schwacher Effekte induzierter elektrischer Felder *durch niederfrequente Stromintervalle unter 50 Hz* hin, als oben für die Stimulation peripherer Nerven angegeben. Demnach können Summenaktionspotenziale in Gehirngewebe durch angelegte elektrische Gleichstromfelder von nur 5 – 10 V/m verändert werden [17]. Die rhythmischen Aktivitäten von Neuronen in neuronalen Netzwerken im Säugtiergehirn können durch angelegte Felder unter 20 Hz schon mit einer induzierten elektrischen Feldstärke von 140_{rms} mV/m (Effektivwert) beziehungsweise 295_{pk} mV/m (Amplitudenspitzenwert) synchronisiert werden [18]. Ein Schwellenwert für die Interaktion elektrischer Felder im Niederfrequenzbereich (50 – 60 Hz) mit sphärischen oder langgestreckten Zellen, wie Neuronen, wurde *an theoretischen Rechenmodellen für solche Zellen* bei etwa

10 – 100 mV/m ermittelt [19] [20]. Oberhalb solcher Werte sei es möglich, durch extern induzierte Felder das natürlich vorhandene physikalische und biologische „Rauschlevel“ an Zellmembranen zu „übertönen“, das heißt, den Fluss von Ionen und kleinen Molekülen durch die Membranen zu beeinflussen. Es gibt, ebenfalls im Bereich von 100 mV/m und darunter, auch Hinweise auf eine Beeinflussung struktureller und funktioneller Eigenschaften *der Membranen selbst* durch die Einwirkung induzierter Niederfrequenzfelder [21] [22].

Aufgrund dieser und einer Reihe weiterer Erkenntnisse ging man bei der Festlegung der heutigen Grenzwerte für nichtionisierende Strahlung davon aus, dass der Schwellenwert für die Auslösung einer Zellreaktion durch schwache, induzierte elektrische Felder im Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 1000 Hz bei etwa 50 mV/m liegt, was einer induzierten Stromdichte von etwa 10 mA/m² in der direkten Umgebung der betreffenden Zellen entspricht [23]. Oberhalb dieser Grenze seien zunächst schwache Effekte vor allem auf das *Nervensystem* möglich. Die neuesten *in vitro*-Daten deuten dabei auf eine stärkere Wirksamkeit der *unteren Frequenzen* des genannten Bereiches hin.

Fazit

Somit ist theoretisch ausgeschlossen, dass bei Einhaltung der gültigen Grenzwerte für nichtionisierende Strahlung gesundheitlich wirksame Effekte durch gepulste Niederfrequenzfelder im Bereich 0 – 1000 Hz auftreten, weil die geringsten nach heutigem Kenntnisstand möglichen *direkten* Wirkungen an Zellen in den Richtlinien berücksichtigt wurden [24]. Bezogen auf die dargestellte besondere Empfindlichkeit der neuronalen Netzwerke in der Netzhaut und die Frage, ob eine Wirkung niederfrequent gepulster Hochfrequenzfelder im GHz-Bereich zumindest in diesem Gewebe möglich ist, läuft die Antwort – wie bereits in [1] angedeutet – allein auf die immer noch nicht klar bewiesene oder widerlegte biologische Demodulation der niederfrequenten Signalanteile an bestimmten Zellstrukturen oder in bestimmten Zellsystemen hinaus. Es ist nach wie vor unklar, wie stark die induzierten Felder in unmittelbarer Nähe der Zellen wären, wenn der Mechanismus einer funktionierenden Demodulation in lebendem Gewebe bei Funksignalen nachgewiesen werden könnte. Hier muss auf laufende Forschungsarbeiten verwiesen werden, die sich genau diesem Problem widmen [25, 26, 27, 28, 29]. Welche Bereiche demodulierter Pulsfrequenzen dann in Bezug auf das visuelle System des Menschen genauer betrachtet werden müssten, ist im vorliegenden Beitrag herausgearbeitet worden.

Ein ganz anderer Forschungsansatz, bei dem unlängst das visuelle System und die visuellen Verarbeitungsprozesse von Versuchspersonen unter der Einwirkung von kontrolliert erzeugten UMTS-Mobilfunkfeldern im Labor untersucht wurden, ergab keinerlei Einfluss, selbst nicht bei den stärksten verabreichten Funksignalen (SAR = 0,63 W/kg, über 1 Gramm gemittelt im Kortex des linken Temporallappens des Gehirns) [30].

Literatur/Internet-Links

Die Abbildungen 2 und 4 bis 6 wurden mit freundlicher Genehmigung von Springer Science and Business Media aus [4] entnommen.

- [1] Gollnick, F.: Gepulste Vorgänge im menschlichen Körper- Bieten sie Angriffspunkte für die Einwirkung gepulster elektromagnetischer Felder? Newsletter 1/2006, 14-24, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2006
- [2] Silny, J.: Pulsmodulierte Mikrowellen und ihre Wirkungen auf den Menschen. Newsletter 2/2006, 8-18, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2006
- [3] Elder, J.A.: Ocular effects of radio-frequency energy. Bioelectromagnetics Suppl. 6, S148-S161, 2003
- [4] Grüsser, O.-J., Grüsser-Cornehls, U.: Gesichtssinn und Okulomotorik. In: Schmidt, R.F., Thews, G., Lang, F.: Physiologie des Menschen. 28. Auflage, Berlin, Heidelberg [u.a.], Springer-Verlag, 2000
- [5] d'Arsonval, A.: Dispositifs pour la mesure des courants alternatifs de toutes fréquences. C.R.Soc.Biol.(Paris) 3:450-457, 1896
- [6] Beer, B.: Über das Auftreten einer objektiven Lichtempfindung im magnetischen Felde. Klin. Wochenschr. 15:108-109, 1902
- [7] Thompson, S.P.: A physiological effect of an alternating magnetic field. Proc R Soc Lond [Biol] B82:396-399, 1910
- [8] Lövsund, P. et al.: Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. Med. Biol. Eng. Comput. 18(6), 758-764, 1980
- [9] Lövsund, P. et al.: Influence on vision of extremely low frequency electromagnetic fields. Industrial measurements, magnetophosphene studies volunteers and intraretinal studies in animals. Acta Ophthalmol. 57(5), 812-821, 1979

- [10] Stenhoff, M.: Ball lightning: an unsolved problem in atmospheric physics. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999, zitiert in: Kendl, A.: Kugelblitze – Ein Phänomen zwischen Physik und Folklore. *Skeptiker* 2/2001, 65-69, 2001 (<http://www.gwup.org/skeptiker/archiv/2001/2/kugelblitze.html>)
- [11] Krämer, G.: Diagnose Epilepsie. S. 133, TRIAS Verlag in MVS Medizinverlage, Stuttgart, 2003 (<http://www.desitin.de/>)
- [12] Krämer, G.: Epi info – Leben mit Epilepsie: Fernsehen und Videospiele bei Epilepsie. S. 1 (<http://www.swissepil.ch/web/>)
- [13] Lopez-Martin, E. et al.: GSM radiation triggers seizures and increases cerebral c-Fos positivity in rats pretreated with subconvulsive doses of picrotoxin. *Neurosc. Lett.* 398, 139-144, 2006
- [14] Kröber, J. et al.: Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Anfallprovokation bei Personen mit Epilepsie. *Newsletter* 2/2006, 22-25, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/>, 2006
- [15] Saunders, R. D., Jefferson, J. G.: A Neurological Basis for ELF Guidelines. In: Proceedings of an ICNIRP International Workshop on EMF Dosimetry and Biophysical Aspects Relevant to Setting Exposure Guidelines, March 2006 in Berlin. *Health Physics*, 92 (6), 576-603, 2007
- [16] Adair, R.K.: Simple neural networks for the amplification and utilization of small changes in neuron firing rates. *PNAS* 98(13), 7253-7258, 2001
- [17] Jefferys, J.G.R.: Influence of electric fields on the excitability of granule cells in guinea-pig hippocampal slices. *J. Physiol.* 319, 143-152, 1981
- [18] Francis, J.T. et al.: Sensitivity of neurons to weak electric fields. *J. Neurosci.* 23, 7255-7261, 2003
- [19] Astumian, R.D. et al.: Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 92, 3740-3743, 1995
- [20] Weaver, J.C. et al.: Theoretical limits on the threshold for the response of long cells to weak extremely low frequency electric fields due to ionic and molecular flux rectification. *Biophys. J.* 75, 2251-2254, 1998
- [21] Sienkiewicz, Z.J. et al.: The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: II Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; NRPB R239, 1991
- [22] Tenforde, T.S.: Cellular and molecular pathways of extremely low-frequency electromagnetic field interactions with living systems. In: Blank, M. (Hrsg.): *Electricity and magnetism in biology and medicine*. San Francisco, CA; San Francisco Press, 1-8, 1993
- [23] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74, 494-522, 1998
- [24] Foster, K.R., Repacholi, M.H.: Biological effects of radiofrequency fields: does modulation matter? *Radiat. Res.* 162, 219-225, 2004
- [25] Mobile Telecommunications and Health Research (MTHR) Programme (Großbritannien): Zur Zeit laufendes Projekt „Nonlinear and Demodulation Mechanisms in Biological Tissue“. (<http://www.mthr.org.uk/>)
- [26] Ahmed, I. et al.: Is a square-law junction essential for demodulation of modulated waveforms in tissue? Abstract Book + Presentations COST281 Workshop „Do sinusoidal versus non-sinusoidal waveforms make a difference?“, Zürich, 2004 (<http://www.cost281.org/documents>)
- [27] Ahmed, I., et al.: Is a rectifying junction essential for demodulation of modulated waveforms in tissue? Abstract Book 'Bioelectromagnetics 2005', Dublin, Ireland, 289-291, 2005, (<http://www.bioelectromagnetics.org/>)
- [28] Balzano, Q. et al.: High Q doubly resonant cavity to detect nonlinear RF demodulation in biological cells. Abstract Book 'Bioelectromagnetics 2006', Cancun, Mexico, 537-539, 2006 (<http://bioelectromagnetics.org/doc/>)
- [29] Proposed Mechanisms for the Interaction of RF-Signals with Living Matter. Abstract Book, COST281 Workshop, Rostock, September 2006 (<http://www.cost281.org/documents>)
- [30] Schmid, G. et al.: No influence on selected parameters of human visual perception of 1970 MHz UMTS-like exposure. *Bioelectromagnetics* 26, 243-250, 2005

3.1.5 Erregungsleitung in Nerven – Angriffspunkt für elektromagnetische Felder?

Frank Gollnick

Einige der Vermutungen über nicht-thermische Wirkungen pulsmodulierter elektromagnetischer Felder auf den Menschen setzen voraus, dass die Felder die Erregungsleitung in Nervenzellen beeinflussen. Hierzu gehören zum Beispiel die Beeinflussung des Schlafs, Einflüsse auf Gedächtnis- und Reaktionsleistungen, allgemeine EEG-Veränderungen oder ein Einfluss auf vegetative Körperfunktionen. Gegenstand der vorliegenden Betrachtung ist, wie die Übertragung von Erregung innerhalb von Nervenzellen oder zwischen mehreren solcher Zellen funktioniert und ob hier grundsätzlich eine Beeinflussung durch schwache elektromagnetische Felder von Funkanwendungen realistisch ist, wenn keine Wärmewirkung im Spiel ist.

Arten der Erregungsleitung

Eine Erregungsleitung kann entweder langsam durch *Ionenflüsse in den Zellen* (rein „*elektrotonisch*“, nur über kurze Entfernung zum Beispiel in Rezeptor-, Ganglien- oder Muskelzellen) oder durch die schnellere *Fortleitung von sogenannten Aktionspotenzialen* in den Axonen von Nervenzellen (Nervenfasern) erfolgen. Bei der Erregungsleitung durch Aktionspotenziale unterscheidet man die „*kontinuierliche Erregungsleitung*“ (maximal 30 m/s) in marklosen Nervenfasern, die zum Beispiel die inneren Organe versorgen und die „*saltatorische Weiterleitung*“ (maximal 120 m/s, manchmal auch bis zu 180 m/s) bei den meisten Axonen von Wirbeltieren, die von einer Myelinscheide umhüllt sind („markhaltige Nervenfasern“).

Grundlegender Mechanismus der Auslösung einer Erregung

Grundlage dieser Vorgänge in erregbaren Zellen, und hier speziell in Nervenzellen, ist das bei der unerregten Zelle vorhandene „*Ruhepotenzial*“ (also eine elektrische „*Grundaufladung*“) von etwa -70 mV. Ein Reiz ist für eine Zelle eine von außen bewirkte Verschiebung dieses Potenzialwerts in Richtung positiverer Werte bis zu einem bestimmten Schwellenwert (etwa -50 mV) oder über ihn hinaus, bei dem die Zelle dann mit einem „*Alles-oder-Nichts*“-Mechanismus in Form eines Aktionspotenzials selbsttätig reagiert und somit in den erregten Zustand gerät. Der Reiz wird in der Regel erzeugt durch einen elektrischen Strom, der durch die Membran fließt. Dies bewirkt an dem für die Zelle eigenen Schwellenwert eine vorübergehende Öffnung spannungsaktivierter Natriumkanäle in der Zellmembran. Der durch das vorhandene Ungleich-

gewicht zwischen innerer und äußerer Natriumkonzentration bewirkte, massenhafte Einstrom von Natriumionen in die Zelle bei Öffnung der Kanäle leitet das Aktionspotenzial ein. Es läuft als Membranpotenzialverlauf in Form einer kurzfristigen Verschiebung („*Depolarisation*“) bis in den positiven Bereich und wieder zurück auf das Ruhenniveau von -70 mV ab. Die Dauer beträgt je nach Zelltyp 1 ms bis mehrere 100 ms, beim Nerv etwa 1 ms. Dabei sind außer dem anfänglichen Natrium-Ionenstrom auch Ströme von Kaliumionen in der Repolarisationsphase beteiligt.

Grundlegende Mechanismen der Erregungsleitung

Bei größeren und langgestreckten Zellen, wie den Nervenzellen (bis zu 1 m Länge beim Menschen), erfasst die kurze Depolarisation nur ein begrenztes Membranareal. Die Ionenverschiebungen in dem begrenzten Bereich der Zellmembran bewirken in den benachbarten Membranarealen eine „*Kettenreaktion*“, so dass sich die beschriebenen Vorgänge wiederholen und das Aktionspotenzial sich räumlich fortsetzt. Eine durch den Natriumionen-Einstrom depolarisierte Membranstelle depolarisiert also eine davor liegende, „*ruhende*“ Membranstelle durch den oben erwähnten elektrotonischen Mechanismus, wodurch dort nach Erreichen der Schwelle ein neues Aktionspotenzial ausgelöst wird und so fort. Weitergeleitet wird also nicht der initiale Reiz, sondern die daraus resultierende Erregung der Zelle. Daher muss man von „*Erregungsleitung*“ sprechen. Kennzeichnend für das fortgeleitete Aktionspotenzial ist, dass an jeder Stelle der Nervenfasern eine *vollständige* Erregung, ein Aktionspotenzial

gleicher Amplitude, abläuft. Die Erregungen der einzelnen Membranstellen sind aneinander gekoppelt über den Mechanismus der elektrotonischen Ausbreitung von Reizströmen entlang der Nervenfasern. Die elektrotonische Ausbreitung geschieht hier allerdings nur über sehr kurze Distanzen (maximal 2 mm bei saltatorischer Weiterleitung in markhaltigen Nervenfasern).

Die Impulsfortleitung im Nerv ist damit grundsätzlich anders als bei der Leitung von Spannungsimpulsen in technischen Stromleitungen, wie zum Beispiel dem Telefonkabel. Dort fließt der Strom von dem einen Pol einer Spannungsquelle an dem einen Kabelende entlang des Kabels zum anderen Pol der Spannungsquelle am anderen Kabelende. Die Amplitude des Spannungsimpulses wird durch den Widerstand des Kabels mit der Entfernung kleiner. Elektrophysiologisch ausgedrückt ist die Leitung im Telefonkabel rein elektrotonisch und damit verlustbehaftet. Beim fortgeleiteten Aktionspotenzial im Nerv dagegen liegen die Pole der Spannungsquellen in jedem Membranbezirk zwischen der Innen- und der Außenseite der Nervenfasern. Der meiste Strom fließt durch die Membran, also im wesentlichen *quer* zur Fortleitungsrichtung und nur über sehr kurze Strecken. Die Impulsleitung arbeitet hier praktisch verlustfrei, der Impuls wird immer wieder neu generiert.

Kontinuierliche und saltatorische Erregungsleitung innerhalb einer Nervenzelle

Wie oben bereits kurz erwähnt, unterscheidet man in Nervenfasern die kontinuierliche und die saltatorische

(„sprunghafte“) Weiterleitung der Erregung. Beide Arten dienen der schnellen Übertragung von internen Informationen im Körper. Die kontinuierliche Erregungsleitung findet in sogenannten „marklosen“ Nervenfasern statt, denen eine Myelinscheide (siehe unten) fehlt. Hier wird der Impuls durch den Nerv von Abschnitt zu Abschnitt übertragen, indem der vorhergehende Abschnitt ein Aktionspotenzial an den benachbarten, noch nicht erregten Abschnitt weiterleitet. Der vorhergehende Abschnitt ist bereits in der Repolarisationsphase, während der neu erregte Abschnitt schon seine Membrandurchlässigkeit für Natriumionen erhöht, um selbst ein Aktionspotenzial zu erreichen. Im Bereich der Plasmamembran ergeben sich dadurch lokale Stromschleifen.

In „markhaltigen“ Nervenfasern, zu denen die meisten Axone bei Wirbeltieren (also auch beim Menschen) gehören, findet die saltatorische Erregungsleitung statt (Abb. 1). Diese Nervenfasern sind von einer elektrisch isolierenden *Myelinscheide* umgeben, welche von den außen anliegenden Schwann'schen Zellen (im Zentralnervensystem von den Oligodendrozyten) gebildet wird. Im Abstand von 0,3 – 2 mm ist diese Ummantelung unterbrochen. Dort, in den sogenannten „*Ranvier-Schnürringen*“, bildet eine normale Zellmembran die Begrenzung des Nervs nach außen. Allerdings ist die Dichte der Natrium-Ionenkanäle in diesen Bereichen etwa 100 mal größer als bei marklosen Nervenfasern, was die Intensität der Natrium-Ionenströme durch solche Membranstellen drastisch erhöht. Zwischen den Schnürringen, im Bereich der *Internodien* der Myelinscheide, sind Membranen in vielen Schichten um die Nervenzelle „gewickelt“, was den Membranwiderstand kräftig erhöht. Aus dieser Anordnung ergibt sich eine wesentlich schnellere Leitungsgeschwindigkeit als bei den marklosen Axonen. In den Internodien fließt bei einer Potenzialänderung aufgrund der Isolierung praktisch kein Strom durch die Membran. Ein Aktionspotenzial an einem Ranvier-Schnürring breitet sich fast verlustlos elektrotonisch über das Internodium auf benachbarte Schnürringe aus. So wird die Leitungszeit über die Internodien eingespart, die Erregung „springt“ von Schnürring zu Schnürring. Verzögerungen entstehen nur an den Schnürringen, weil dort das elektrotonische Potenzial jedes Mal die Erregungsschwelle erreichen und eine

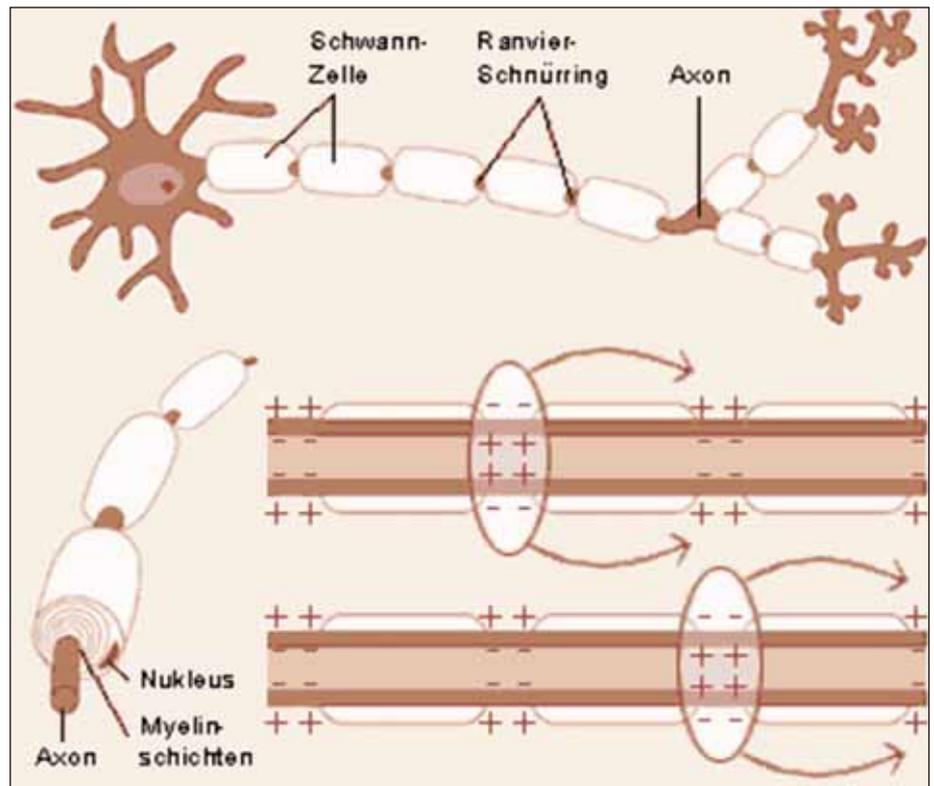


Abb. 1: „Markhaltige“ Nervenfasern (Axone) mit Myelinscheiden. Im Längsschnitt schematische Darstellung der „saltatorischen“ Erregungsleitung mit lokaler Ladungsumkehr an der Zellmembran. (Quelle: www.vcell.de)

Erregung einleiten muss. Die Verzögerung ist wegen der sehr hohen Dichte an Natriumkanälen aber nur kurz. Aus den beschriebenen Dimensionen ergibt sich, dass ein Nervenimpuls von 1 ms Dauer bei einer Geschwindigkeit von 120 m/s im Nerv eine Länge von 12 cm hat. Das heißt, beim Durchlauf eines Impulses sind mehr als 100 Schnürringe gleichzeitig in Erregung.

Weiterleitung der Erregung von Zelle zu Zelle

Hat ein elektrischer Impuls über das Axon die Endköpfchen der Nervenzelle, die Synapsen, erreicht, wird er an eine Drüsen-, Muskel- oder eine andere Nervenzelle weitergeleitet. Dazu wird aus winzigen Membranbläschen (*präsynaptische Vesikel*), die sich an der Zellmembran in den aktiven Zonen der Synapsen bilden, ein Überträgerstoff (Neurotransmitter, zum Beispiel das Azetylcholin) in den *synaptischen Spalt* (ein mit Plasma angefüllter Zwischenraum zwischen den beiden Zellen) ausgeschüttet. Dieser Vorgang dauert etwa eine Millisekunde und wird durch den (spannungsgesteuerten) Einstrom von Kalziumionen in die Zelle ausgelöst. Per Diffusion gelangt der Überträgerstoff durch den Spalt an die Membran der gegenüber liegenden Zelle, wo

sich spezifische Rezeptoren für den Stoff befinden. Die Bindung des Überträgerstoffs an die Rezeptoren verursacht die Öffnung bestimmter Ionenkanäle in der Zellmembran und entsprechende Ionenströme, wodurch in dieser Zelle eine Depolarisation des Membranpotenzials mit nachfolgendem Aktionspotenzial aufgebaut wird. Damit ist die Erregung von einer Zelle auf die andere weitergeleitet. Die Dauer des gesamten Vorgangs liegt im 1 – 2 Millisekunden-Bereich.

Die Wirkungsdauer der Überträgerstoffe wird durch spaltende Enzyme (zum Beispiel Cholinesterase), durch aktiven Wegtransport der Stoffe oder der gespaltenen Bestandteile in umliegende Zellen sowie durch Wegdiffusion begrenzt. Man kann berechnen, dass freigesetzter Überträgerstoff mit Zeitkonstanten im Bereich von 100 μ s (Mikrosekunden) aus dem synaptischen Bereich wegdiffundiert. Beim Aufbau der neuen Depolarisation mit nachfolgendem Aktionspotenzial kommen im Zusammenspiel eines Netzwerks vieler Nervenzellen räumliche und zeitliche Summationseffekte zum Tragen. Außerdem gibt es durch Stoffe, die im synaptischen Spalt eine verstärkende oder hemmende Wirkung auf die Rezeptoren haben (Agonisten bzw. Antagonisten) ent-

sprechende Effekte auf die Erregungsweiterleitung. Viele pharmakologische Wirkstoffe, körpereigene moderierende Stoffe, aber auch einige Drogen wirken auf diese Weise.

Quantelung bei der Übertragung von Zelle zu Zelle

Die genannten Überträgerstoffe werden in „Quanten“ freigesetzt, die dem Inhalt der präsynaptischen Vesikel entsprechen. Hierdurch ergibt sich auf der gegenüberliegenden Seite, der „Empfängerseite“ (man nennt diese „postsynaptisch“), ein zeitlich abgestufter Aufbau der postsynaptischen Membranpotenzialverschiebung, also der Depolarisation mit ihrem darauf folgenden postsynaptische Aktionspotenzial. Zum Beispiel an der Membran von Muskelzellen lassen sich mit empfindlichen Methoden entsprechende *Stromquanten* messen, die dem Acetylcholininhalt eines Vesikels entsprechen. Ein Vesikel enthält dabei einige zehntausend Acetylcholinmoleküle. Die Bereitstellung und Freisetzung von Überträgerstoff in Vesikeln gilt für alle bekannten chemischen Synapsen.

Umkodierung von Information in Aktionspotenzial-Serien

In den Nervenfasern werden nur Impulse in Form von Aktionspotenzialen weitergeleitet. Alle Information, die in Nerven über größere Entfernung übertragen werden soll, muss deshalb als Serie oder „Frequenz“ von Aktionspotenzialen „kodiert“ werden. An Rezeptoren, die Sinnesreize aufnehmen, kommt es zu relativ langsamen, anhaltenden Potenzialveränderungen, den „Sensorpotenzialen“. Auch an Nervenzellen summieren sich die durch synaptische Übertragung entstandenen Potenzialänderungen in der Zielzelle zu langsamen Änderungen des Membranpotenzials auf. Solche langsamen Potenzialänderungen müssen zur Informationsvermittlung in Nerven in Aktionspotenzialfrequenzen umgesetzt werden. Die Frequenz der entstandenen Impulse steigt dabei mit der Größe der ursprünglichen Depolarisation, zum Beispiel der des Sensorpotenzials, an. Die Impulsfrequenz kodiert damit unter anderem die Stärke eines Reizes.

Angriffspunkte für gepulste elektromagnetische Felder?

Man muss nun die entscheidende Frage stellen, wo es in dem bis hierhin beschrie-

benen Geschehen in Nervenzellen Angriffspunkte für die Einwirkung pulsmodulierter elektromagnetischer Felder geben könnte. Für *thermische* Wirkungen durch *starke* eingestrahlte Felder lässt sich dies jetzt relativ leicht ableiten. In dem oben Beschriebenen sind eine Reihe von chemischen beziehungsweise physikochemischen Reaktionsgleichgewichten im Spiel, die bekanntlich alle temperaturabhängig sind. So sind zum Beispiel die Geschwindigkeit des Durchtritts eines Natrium-Ions durch einen Ionenkanal an einem Ranvier-Schnürring oder die Geschwindigkeit der Bindung eines Acetylcholin-Moleküls an seinen spezifischen Rezeptor im Bereich einer Synapse in hohem Maße von der Umgebungstemperatur abhängig. Sollte es durch starke elektromagnetische Felder zu einer lokalen Temperaturerhöhung in den beschriebenen Bereichen kommen, so wäre es nicht verwunderlich, wenn dadurch die Erregungsweiterleitung etwas beschleunigt würde und es in Folge dessen zum Beispiel zu einer leicht verkürzten Reaktionszeit in einem Experiment kommen würde.

Solche plausiblen thermischen Wirkungen werden durch die gesetzlichen Grenzwerte für Funkanwendungen inklusive einer erheblichen Sicherheitsreserve definitiv ausgeschlossen [1, 2]. Dabei sind die Sicherheitsreserven für den zivilen Bereich der Allgemeinbevölkerung noch deutlich größer als für den militärischen und den Arbeitsschutzbereich. Mögliche minimale, lokale Temperaturerhöhungen, die sich auf den mikroskopischen Bereich (zum Beispiel an der Zellmembran) beschränken, können nach eingehenden Berechnungen durch die enorm schnelle Wärmeableitung in solchen Dimensionen nicht wirksam werden, wenn die Grenzwerte eingehalten werden [3, 4, 5]. In der Größenordnung von Zellen liegen die Zeitkonstanten für den Wärmeausgleich nach einer mikrothermischen Erwärmung im Millisekundenbereich, bei den noch viel kleineren synaptischen Vesikeln im Mikrosekundenbereich [6].

Eine manchmal geäußerte, alternative Idee für den *nichtthermischen* Bereich ist, dass die gepulsten „Wellenpakete“ eines digitalen Funksignals in der Lage sein sollen, in die beschriebenen Nervenimpuls-Serien einzukoppeln, sich mit ihnen irgendwie zu synchronisieren und

damit bei der Informationsübertragung in den Nerven Veränderungen hervorzurufen. Für diese Idee sind nach dem oben Dargelegten die folgenden Mechanismen besonders attraktiv:

- *Die Erregungsleitung in Form von Aktionspotenzialserien bestimmter Frequenz, also die Kodierung der Information in Impulsserien sowie*
- *die gequantelte Freisetzung der Überträgerstoffe an den synaptischen Überhängen.*

Genau diesen Punkt – „...einzukoppeln, sich mit ihnen irgendwie zu synchronisieren...“ – darf man sich jedoch nicht so einfach vorstellen, beziehungsweise muss man die Realisierbarkeit einer solchen Idee aus biophysikalischer Sicht fundiert hinterfragen. Es sollte in diesem Zusammenhang einmal deutlich gesagt werden: Nervenimpulse lassen sich von außen nicht so einfach beeinflussen, wie zum Beispiel die Stromimpulse in einer Telefonleitung! Dies liegt an dem grundsätzlich anders funktionierenden Fortleitungsmechanismus in den Axonen der Nervenzellen (siehe oben unter „Grundlegende Mechanismen der Erregungsleitung“ den Vergleich mit einer Stromleitung). Der Mechanismus beruht, anders als in Stromleitungen, auf einer „Alles-oder-Nichts-Erregung“ der einzelnen Membranstellen, die sich aneinander gekoppelt über den Mechanismus der elektrotonischen Ausbreitung entlang der Faser fortsetzt. Da die Pole der Spannungsquellen in jedem mikroskopisch kleinen, erregten Membranbezirk des Nervs zwischen der Zellinnen- und Außenseite liegen, müssen von den stromführenden Elementen, also von den Ionen, jeweils nur äußerst kurze Distanzen überwunden werden, allerdings über eine isolierende Membran hinweg, in der enorme interne, statische Feldkräfte herrschen (etwa 10.000.000 V/m, [5, 7]). Dieser Stromfluss, der zum fortgeleiteten Aktionspotenzial führt, ist nur möglich durch eine genau gesteuerte, kurze Öffnung verschiedener spezifischer Ionenkanäle in der Membran und deren ebenso gesteuerte Schließung. In diesen gesteuerten „Alles-oder-Nichts-Mechanismus“, bei dem im mikroskopischen Bereich enorme interne Feldkräfte eine Rolle spielen, können von außen eingebrachte Feldkräfte nur sehr schwer eingreifen. Das heißt, die induzierten Feldkräfte müssten dafür so groß sein, dass sie mit den inter-

nen Feldkräften in Konkurrenz treten würden.

Natürlich ist so etwas im Experiment realisierbar, wenn zum Beispiel über Metallelektroden mit einem Generator ein Reizstrom in ein Gewebe eingebracht wird. Auch in der Notfall- und Intensivmedizin macht man sich induzierte Felder, die von Generatoren mittels Elektroden im Körper erzeugt werden, zu Nutze, um Lebensvorgänge zu erhalten oder zu steuern. Mit normalen schwachen Funkfeldern, zum Beispiel aus Mobilfunkanwendungen, sind solche Eingriffe nicht möglich. Für *unmodulierte* Funk- und Mikrowellenfelder besteht nach neueren Berechnungen erst ab Intensitäten über 100 W/m^2 (entsprechend einer elektrischen Feldstärke von etwa 200 V/m) eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass sie physiologische Vorgänge durch athermische Mechanismen beeinflussen können [8].

Auch *pulsmodulierte* Funkfelder können erst ab diesen Intensitäten wirksam werden, und dann auch nur im Bereich der „Wellenpakete“, wenn also das gepulste Hochfrequenzsignal gerade eingeschaltet ist. Ein „Einkoppeln“, Synchronisieren“ oder „In-Resonanz-Geräten“ der gepulsten Felder in Nervensignale bzw. mit Nervensignalen unterhalb der genannten induzierten Feldstärke *am Ort des Geschehens* ist dagegen unrealistisch. Theoretisch denkbare Einwirkungen auf die gequantelte Freisetzung der Überträgerstoffe im Bereich der Synapsen oder auch bei den motorischen Endplatten an Muskelzellen sind nur im *thermischen* Bereich realistisch, wenn es also durch die Felder zu mikroskopischen, *wirksamen* Erwärmungen kommen würde. Nach heutigem Wissen ist jedoch auch dies bei Feldstärken unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte ausgeschlossen, weil die eventuell zusätzlich im System erzeugte Wärme sehr gering ist und in mikroskopischen Dimensionen nicht lange genug am möglichen Wirkungsort verbleibt (siehe oben) und außerdem, weil die überall vorhandenen Wassermoleküle mögliche Wärmewirkungen, zum Beispiel auf die Ionenbewegung, zusätzlich stark abdämpfen [9]. Weitere Ausführungen zu diesen Aspekten finden sich im vorliegenden Dokument in den Teilen 3.1.1 bis 3.1.4.

Die eingangs gestellte Frage, ob bei der Erregungsübertragung in Nervenzellen oder zwischen mehreren solcher Zellen grundsätzlich eine Beeinflussung durch schwache elektromagnetische Felder von Funkanwendungen realistisch ist, kann nach heutigem Wissen bei Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte klar mit „Nein“ beantwortet werden.

Literatur/Internet-Links

- [1] Foster, K.R.; Erdreich, L.S.: Thermal models for microwave hazards and their role in standards development. *Bioelectromagnetics* 20, 52-63 (1999)
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74, 494-522, (1998)
- [3] Laurence, J.A., McKenzie, .DR., Foster, K.R.: Application of the heat equation to the calculation of temperature rises from pulsed microwave exposure. *J. Theor. Biol.* 222, 403-405 (2003)
- [4] Foster, K.R. and Schwan, H.P.: Dielectric properties of tissues – a review. K. R. Foster and H. P. Schwan, in: *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Radiation*, C. Polk and E. Postow, eds. CRC Press, Second Edition. (1995)
- [5] Glaser, R.: Biophysikalische Primärreaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder: Zusammenfassung und Überblick über den aktuellen Stand. *Newsletter* 3/2006, 10-21, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/> (2006) (Literaturverzeichnis hierzu nur online, siehe <http://www.fgf.de/>)
- [6] Glaser, R. in: Gollnick, F.: *Erhitzte Gemüter*. *Newsletter* 3/2006, 4-6, ISBN 0949-8745, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., <http://www.fgf.de/> (2006)
- [7] Glaser, R.: *Biophysics*. Springer, Berlin Heidelberg New York (2000)
- [8] Adair, R.K.: Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 24, 39-48 (2003)
- [9] Adair, R.K.: Vibrational resonances in biological systems at microwave frequencies. *Biophys. J.* 82, 1147-1152 (2002)

3.1.6 Einfluss von DECT-Telefonen auf den Menschen – Aktuelle Studien im Fokus

Frank Gollnick

DECT-Telefone werden verdächtigt, gesundheitliche Schädigungen hervorzurufen. Ob dieser Verdacht zurecht besteht, wurde durch Sichtung aktueller Forschungsberichte und Stellungnahmen von Expertengremien überprüft. Der niederländischen Gesundheitsrat, der eine umfassende Bewertung Anfang 2007 veröffentlicht hat, kommt zu dem Ergebnis, dass es keine wissenschaftlich fundierten Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Felder von DECT-Telefoneinrichtungen gibt. Auf Details und Hintergründe wird im Folgenden eingegangen.

Eine wissenschaftlich fundierte Beurteilung ist aus den vorliegenden Forschungsarbeiten abzuleiten. Die folgenden wissenschaftlichen Studien liegen zum Thema DECT-Telefone vor:

- Eine *epidemiologische Fall-Kontroll-Studie der deutschen INTERPHONE-Arbeitsgruppe* um Joachim Schüz wurde in zwei Publikationen im Rahmen des internationalen INTERPHONE-Forschungsprogramms veröffentlicht [1, 2]. Eine dieser Veröffentlichungen befasst sich ausschließlich mit dem Hirntumorrisiko in Verbindung mit DECT-Basisstationen.
- Daneben findet man etwa 20 weitere *epidemiologische Publikationen*, in denen das Thema „Schnurlostelefone und Krebsrisiko“ unter anderem behandelt wird. Fast alle stammen jedoch aus derselben schwedischen Arbeitsgruppe um Lennart Hardell und Kjell Hansson Mild (bzw. es sind hierauf bezogene Publikationen). Diese Arbeitsgruppe führte seit 1990 nach eigenen Angaben sechs Fall-Kontroll-Studien mit unterschiedlichen Tumoren als biologische Endpunkte durch, wobei in den Bevölkerungsbefragungen die Nutzung analoger und digitaler Schnurlostelefone sowie die von Mobiltelefonen berücksichtigt wurde [3].
- Etwa 15 *Laborstudien* – zumeist In-vitro-Studien – lassen sich identifizieren, in denen Felder aus dem DECT-Standardfrequenzbereich 1880 bis 1900 MHz zur Anwendung kamen.
- Das deutsche nova-Institut erstellte im Jahr 2001 im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis90/Die Grünen ein „*Gutachten zur Feststellung der Belastung durch hochfrequente elektromag-*

netische Strahlung durch schnurlose Telefone nach dem DECT-Standard“ [4].

- Zwei weitere wissenschaftliche Studien liefern Ergebnisse aus reinen Feldstärkemessungen an DECT-Anlagen ohne direkten biologischen Bezug [5, 6].

Aus den oben genannten Resultaten der deutschen INTERPHONE-Teilstudie geht hervor, dass kein erhöhtes Hirntumorrisiko mit der Benutzung von Schnurlostelefonen nach dem DECT-Standard in Verbindung gebracht werden kann, auch nicht, wenn die DECT-Basisstation nahe am Bett aufgestellt war und das Telefon länger als fünf Jahre benutzt wurde. Allerdings konnten in der Studie nur geringe Fallzahlen untersucht werden, was das Ergebnis nicht sehr gewichtig macht [2].

Auch aus den Einzelpublikationen der genannten schwedischen Arbeitsgruppe geht nicht klar hervor, welche der gezeigten Datensätze auf welchen Studien beruhen. Die Autoren kommen jedoch in einem im Oktober 2006 veröffentlichten Review-Artikel, hauptsächlich über die eigenen Studien, zu dem Schluss, dass „...für alle untersuchten Telefontypen ein erhöhtes Hirntumorrisiko, vor allem für Akustikusneurinom und bösartige Hirntumore, festgestellt wurde“ [3]. An der methodischen Korrektheit und der Interpretation der Einzelergebnisse meldeten allerdings Fachleute und sogar die schwedische Strahlenschutzbehörde massive Zweifel an. Die vielen bei der Datenanalyse zum Vergleich gebildeten Untergruppen „*machen es statistisch wahrscheinlich, dass Zufallseffekte als wahre Effekte gedeutet wurden*“, so die Behörde [7]. Außerdem seien Ergebnisverzerrungen durch die Auswahl der Befragten („*selection and information bias*“) sehr wahrscheinlich.

Weiterhin wurden die nötigen statistischen Korrekturen für „multiples Testen“ vermisst.

In einem 2003 veröffentlichten umfangreichen Review-Beitrag über „Krebs, Mutationen und genschädigende Wirkungen durch elektromagnetische Felder“ für den Bereich von Bevölkerungserhebungen [8] zogen die Autoren den Schluss, dass über alle Publikationen betrachtet keine davon „*einen verlässlichen und statistisch eindeutigen Hinweis auf Krebsinitiation oder Promotion durch chronische Exposition in Hochfrequenzfeldern der mobilen Kommunikation liefert*“. Dies gelte auch für Studien, die sich unter anderem mit dem Hirntumorrisiko bei Benutzung von Schnurlostelefonen beschäftigten.

Die oben erwähnten Laborstudien, in denen 1880 – 1900-MHz-Felder angewendet wurden, sind insgesamt für die Beurteilung eines biologischen Einflusses bei der Benutzung von DECT-Telefonen wenig hilfreich. Keine davon hatte ausdrücklich das Ziel, die Auswirkungen von DECT-Telefonen zu untersuchen. Dem entsprechend wurden andere Pulsmuster verwendet als die bei Schnurlostelefonen übliche 100 Hz-Pulsfrequenz. In drei der Laborstudien wurden *unmodulierte* 1900-MHz-Signale getestet. Hierbei ergab sich in zwei Untersuchungen einer Arbeitsgruppe kein messbarer Effekt auf menschliche weiße Blutkörperchen (Leukozyten) [9, 10] während in der dritten Studie ein signifikanter Wachstumseffekt bei den dort untersuchten Wasserlinsen, einer Wasserpflanzenart, gefunden wurde [11]. Bei diesem Effekt kann es sich wegen der verwendeten ungepulsten Signale selbstverständlich nicht um den Einfluss einer Modulation handeln.

In dem genannten Gutachten des nova-Instituts aus dem Jahr 2001 [4] werden die in Büros und Wohnräumen gemessenen Leistungsflussdichten von DECT-Basisstationen den Grenzwerten verschiedener Institutionen und Länder gegenübergestellt. Dabei beziehen sich die wiedergegebenen Werte auf die maximale Pulsleistung (Spitzenwert, der 100 mal pro Sekunde für jeweils 368 Mikrosekunden auftritt), welche beim DECT-Signal etwa 30 mal größer ist als der zeitliche Mittelwert der Leistungsflussdichte. Alle gemessenen Pulsspitzenwerte (in 0,2 bis 4 m Abstand von einer Basisstation, mit und ohne dazwischen liegendem Hindernis) erreichten maximal 2 % des gesetzlichen Grenzwerts für den betreffenden Frequenzbereich, der bei 9,5 W/m² (für 1900 MHz) liegt. Die Bewertung der eigenen Messungen in dem Gutachten orientiert sich an der 100-fach niedriger liegenden Grenzwertempfehlung des nova-Instituts und mündet in entsprechenden Vorsorgeempfehlungen. Eine begründende, wissenschaftliche Ableitung für die niedrigere Grenzwertempfehlung wird, zumindest in der frei zugänglichen Kurzfassung, nicht gegeben.

Die aktuellste wissenschaftliche Bewertung der Forschung zu möglichen Effekten von DECT-Telefonen wurde Anfang 2007 vom niederländischen Gesundheitsrat veröffentlicht [12]. In diese umfassende Bewertung flossen neben dem hier bereits erwähnten Material und den beiden oben genannten Studien zu Feldstärkemessungen auch wissenschaftliche Veröffentlichungen ein, die sich nicht mit DECT-Signalen, sondern mit GSM-1800- und GSM-900-Signalen befassten. Für den Gesundheitsrat waren hierbei besonders solche Studien interessant, die einen Unterschied zwischen gepulsten und un gepulsten Feldern untersuchten. Die Auswertung der erwähnten Berichte zu den Feldstärkemessungen [5, 6] ergab, dass nur im Bereich weniger Zentimeter vor einer DECT-Basisstation und während eines laufenden Telefonats die gesetzlichen Grenzwerte (59,6 – 59,9 V/m) erreicht oder leicht überschritten werden. Die Feldstärkewerte fallen mit zunehmendem Abstand zur Basisstation steil ab und liegen im normalen Nutzungsabstand unter 1 V/m. Die genannten Feldstärkewerte sind eigentlich für die erst bei normalem Nutzungsabstand gegebene Fernfeldbedingung ausgelegt. Die für den

Kopfbereich bestimmten maximalen SAR-Werte bei Benutzung eines DECT-Telefons lagen bei 0,019 bis 0,052 W/kg und damit vierzig- bis hundertfach unter dem entsprechenden Teilkörper-Grenzwert von 2 W/kg.

Die niederländische Kommission zieht aus ihrer Bewertung des wissenschaftlichen Materials folgende Schlüsse [12]:

- „Die normale Benutzung der DECT-Technik führt nicht zu einer Überschreitung der Expositionsgrenzwerte.
- Es gibt keine Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang zwischen DECT und Hirntumoren (allerdings auch wegen der zu dünnen Datenlage).
- Aufgrund der Daten und wegen des fehlenden Nachweises eines Mechanismus, der eine größere Effektivität gepulster Felder erklären könnte, ... gibt es keine Hinweise, und es ist unwahrscheinlich, dass DECT-Signale unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte einen nachteiligen Effekt auf die Gesundheit haben.“

Literatur/Internet-Links

- [1] Schüz J, Böhler E, Schlehofer B, Berg G, Schlaefer K, Hettlinger I, Kunna-Grass K, Wahrendorf J, Blettner M: Cellular phones, cordless phones, and the risks of glioma and meningioma (Interphone Study Group, Germany). *Am. J. Epidemiol.* 163 (6), 512-520 (2006)
- [2] Schüz J, Böhler E, Schlehofer B, Berg G, Schlaefer K, Hettlinger I, Kunna-Grass K, Wahrendorf J, Blettner M: Radio-frequency Electromagnetic Fields Emitted from Base Stations of DECT Cordless Phones and the Risk of Glioma and Meningioma (Interphone Study Group, Germany), *Radiat. Res.* 166, 116–119 (2006)
- [3] Hardell L, Hansson Mild K, Carlberg M, Soderqvist F.: Tumour risk associated with use of cellular telephones or cordless desktop telephones. *World J. Surg. Oncol.* 4, 74 (2006)
- [4] Nießen P, Bathow, M, Karus, M: Gutachten zur Feststellung der Belastung durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung durch schnurlose Telefone nach dem DECT-Standard. Erstellt im Auftrag der Bundestags-Fraktion Bündnis90/Die Grünen in Berlin, nova-Institut, Hürth, 2001. Kurzfassung unter dem Titel „Elektrosmog durch schnurlose DECT-Telefone“, *Elektrosmogreport* 8(3):1-2 (2002)
- [5] Kühn S, Lott U, Kramer A, Kuster N: Assessment of human exposure to electromagnetic radiation from wireless devices in home and office environments. Vortragspräsentation beim WHO-Workshop 'Base stations & wireless networks: Exposures & health consequences', 15.-16. Juni 2005, WHO in Genf, zitiert in [13]. <http://www.who.int/>
- [6] Schmid G, Lager D, Preiner P, Überbacher R, Neubauer G, Cecil S: Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Projektabschlussbericht im Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF), ARC Seibersdorf research GmbH, Report Nr. ARC-IT-0126 (2005), zitiert in [13]. <http://www.emf-forschungsprogramm.de/>
- [7] John D. Boice JR, McLaughlin JK: Epidemiological studies of cellular telephones and cancer risk – A review. Stockholm, Swedish Radiation Protection Authority, pp. 22-23 (2002) <http://www.ssi.se/>
- [8] Heynick LN, Johnston SA, Mason PA: Radio frequency electromagnetic fields: Cancer, mutagenesis, and genotoxicity. *Bioelectromagnetics Suppl.* 6, S74-S100 (2003)
- [9] McNamee JP, Bellier PV, Gajda GB, Miller SM, Lemay EP, Lavalley BF, Marro L, Thansandote A: DNA damage and micronucleus induction in human leukocytes after acute in vitro exposure to a 1.9 GHz continuous-wave radiofrequency field. *Radiat. Res.* 158 (4): 523 – 533 (2002)

- [10] McNamee JP, Bellier PV, Gajda GB, Lavallee BF, Marro L, Lemay E, Thansandote A: No evidence for genotoxic effects from 24 h exposure of human leukocytes to 1.9 GHz radiofrequency fields. *Radiat. Res.* 159 (5): 693 – 697 (2003)
- [11] Tkalec M, Malaric K, Pevalek-Kozlina B: Influence of 400, 900, and 1900 MHz electromagnetic fields on *Lemna minor* growth and peroxidase activity. *Bioelectromagnetics* 26 (3): 185 – 193 (2005)
- [12] Health Council of the Netherlands. Electromagnetic fields: Annual Update 2006. The Hague: Health Council of the Netherlands, 2007; publication no. 2007/06. <http://www.healthcouncil.nl/>

3.1.7 Gepulste Hochfrequenz in der Radartechnik, Biologische Auswirkungen

Eduard David, Siegfried Eggert, Andreas Wojtysiak

Eine technische Anwendung, die beispielhaft für die Charakterisierung von gepulsten hochenergetischen Strahlen immer an erster Stelle genannt wird, ist RADAR. In Abschnitt 2.2.2 wurde darauf bereits mit einem historischen Rückblick, der Beschreibung der technischen Funktion und der praktischen Anwendungsfälle eingegangen. Hier geht es um die Arten der von Radar erzeugten Strahlung und die Auswirkungen auf die biologischen Systeme.

Strahlungsarten an Radargeräten

Radarsendergeräte erzeugen zur Informationsübertragung Hochfrequenz (HF)-Strahlung, die über Hohlleiter zur Sendeanenne geleitet wird. Ungewollt entsteht zugleich in Senderöhren Röntgenstrahlung – eine Störstrahlung, die ab einer Beschleunigungsspannung von fünf kV auftaucht, nicht über die Antenne abgestrahlt wird und damit nur den Bereich im direkten Umfeld der Sendergeräte betrifft. Außerdem kann Strahlung von radioaktiven Stoffen in Röhren und Leuchtfarben ausgehen. Solche Leuchtfarben wurden jahrzehntelang verwendet, um in den abgedunkelten Radarbedienräumen die Tasten der Geräte sichtbar zu machen.

Die auftretenden Strahlungsarten sind zu unterscheiden in ionisierende und nicht ionisierende Strahlung. Die Röntgenstörstrahlung und die radioaktive Strahlung gehören zur ionisierenden Strahlung, das hochfrequente Radarsignal ist nicht ionisierend. Beide Arten wirken auf unterschiedliche Weise auf Materie: Ionisierende Strahlung ist in der Lage, chemische Bindungen zu zerstören, nicht ionisierende kann das nicht. Allerdings kann sie Materieteilchen in Schwingung und Bewegung versetzen – was einer Erwärmung gleichkommt.

Bei der ionisierenden Strahlung muss man ferner zwischen stochastischen – also zufallsbedingten – und deterministischen Strahlenwirkungen unterscheiden. Da ein Strahlungsquant ionisierender Strahlung schon fähig ist eine chemische Bindung zu brechen, dies aber noch keine Auswirkung auf das biologische System haben muss, nennt man die Risiken bei geringen Belastungen stochastische Risiken. Diese können Krebs oder andere Krankheiten hervorrufen; die Wahrscheinlichkeit dafür kann man aber nur ab-

schätzen. Sie nimmt mit der Intensität und Dauer der Exposition zu, das heißt, das Risiko summiert sich. Zur Begrenzung stochastischer Gefährdungen werden zeitbezogene Grenzwerte angegeben, etwa Höchstdosen pro Jahr. Schädigungen können prinzipiell aber schon bei einer weit darunter liegenden Dosis eintreten.

Im Unterschied dazu gilt für deterministische/nichtstochastische Wirkungen, dass ein Schaden ausschließlich beim Überschreiten bestimmter Grenzen (Schwellwert) ausgelöst wird. Dazu zählen alle akuten Strahlenwirkungen wie Hautverbrennungen, Erbrechen sowie Blutbildänderungen.

Für nichtionisierende Strahlung ist diese Wirkungsklassifizierung nicht angebracht. HF-Strahlung bewirkt eine Erwärmung des Körpers, die bei Überschreitung einer bestimmten Strahlungsintensität zu Schädigungen wie z. B. Verbrennungen führen kann. Den Grad der Erwärmung – egal, ob schädlich oder unschädlich – kann man berechnen und damit vorhersagen. Somit besteht kein Grund im Bereich der nichtionisierenden Strahlung stochastische Wirkungen einzuführen. Es sei denn, man ginge davon aus, dass Belastungen unterhalb der Schwellen für schädliche Erwärmungen gesundheitsschädigende Wirkungen hätten und sich eventuell auch aufsummierten. Eventuelle Anhaltspunkte für solche nicht-thermischen Wirkungen werden im Folgenden mit behandelt.

Mögliche Belastungen lassen sich also in folgende Formen unterteilen:

- **ungepulste HF-Strahlen** (etwa vom Beleuchtungsradar und einer sich drehenden Antenne abgestrahlt) zählen zu den Belastungen für die Grenzwerte festgelegt wurden, bei deren Unterschrei-

tung keine Gesundheitsrisiken bekannt sind.

- **gepulste HF-Strahlen** werden ebenfalls nach diesen Grenzwerten beurteilt. Bei ihrer Grenzwertfestlegung werden unterschiedliche Berechnungsformeln zugrunde gelegt, um den Effektiv-Wert des Energieeintrags zu berechnen.
- **Röntgenbremsstrahlung** entsteht, wenn die Elektronen auf die Anode treffen und einen Teil ihrer Energie als Röntgenstrahlung abgeben (tritt auf in Elektronenröhren der Radargeneratoren mit mehr als 30 000 Volt Anodenspannung). Diese Strahlung zählt zu den ionisierenden Strahlen und hat eine (kumulierende) Dosiswirkung, die wir auch zu den stochastischen Wirkungen zählen. Üblicherweise sind diese Röhren so abgeschirmt, dass keine Röntgenstrahlung nach außen gelangt. Menschen in der Umgebung von Radargeräten sind daher nicht davon betroffen, mögliche Gesundheitsschäden werden nur für Radarmechaniker diskutiert, die häufig am geöffneten Generator in der Nähe einer nicht abgeschalteten Generatorröhre arbeiten mussten. Messungen der Bundeswehr haben allerdings ergeben, dass die Strahlenbelastung unterhalb der in der Strahlenschutzverordnung angegebenen Personendosis liegt, bei der das Tragen eines Dosimeters vorgeschrieben ist. Früher trat Röntgenbremsstrahlung auch an Sichtschirmen der Bedieneinheiten aus, womit eine Exposition des damaligen Bedienpersonals verbunden war.
- **radioaktive Strahlung** (Alpha-Strahlen = Korpuskularstrahlung, Beta-Strahlen = Elektronenstrahlen, Gamma-Strahlen = ultra-hochfrequente elektromagnetische Strahlung, auch Höhenstrahlung genannt; kommt u. a. beim Atomzerfall vor) gibt es in alten Anzeigen mit Leuchtfarbe. Diese sendet eine sehr

schwache radioaktive Strahlung aus (wie die Leuchtzifferblätter früherer Armbanduhren). Diese Exposition vor früheren Geräten muss als Sonderfall des Bedienpersonals an diesen Geräten betrachtet werden.

Wärmewirkungen

Es ist allgemein bekannt, dass Mikrowellen erwärmende Wirkung auf wasserhaltige Strukturen haben. Der Mensch erzeugt selbst Wärme, die aus den verschiedenen Stoffwechselfvorgängen stammt. So hat der Skelettmuskel unter optimalen Bedingungen einen Wirkungsgrad von maximal 33 %, d. h. 2/3 der für die Kontraktionsarbeit verbrauchten Energie (z. B. Muskelglykogen) wird als Wärme frei. Diese wird durch Abstrahlung, Ableitung und Verdunstung von Schweiß nach außen abgegeben. Der menschliche Körper ist homoiotherm, er ist also in der Lage, Wärme so geregelt abzugeben, dass er seine Körperkerntemperatur auf 37 °C konstant halten kann. Dabei kann der Körper bei Arbeit bis zu 5000 Kcal pro Tag abgeben. Im Ruhen sind dies nur 1600 Kcal. Der Mensch kann also eine erhebliche Wärmezufuhr verkraften.

Die gültigen EMF-Grenzwerte muten ihm weniger als 1 % davon zu, und das liegt knapp unter der Grenze der Bemerkbarkeit. Für den zivilen Bereich gilt für Deutschland auf Grund umfangreicher Untersuchungen verschiedener Institutionen die Aussage, dass in öffentlich zugänglichen Bereichen in keinem Fall die Grenzwerte (mittlere Leistungsdichte) für berufliche Exposition ($S = 5 \text{ mW/cm}^2$) noch die für die allgemeine Bevölkerung ($S = 1 \text{ mW/cm}^2$) überschritten oder auch nur annähernd erreicht werden. Obwohl einige Organe, wie z. B. das Auge, wegen geringer Durchblutung schlechter gekühlt werden, ist hier eine schädliche Wärmewirkung nur unter Extrembedingungen bekannt, wie z. B. bei Glasbläsern der Glasbläserstar (Linsentrübung). Akute Effekte durch HF-Strahlung werden ab Intensitäten von ca. 100 mW/cm^2 erwartet. Auch wenn bekannt ist, dass häufige Erhitzung, etwa der Speiseröhre, zu Krebs führen kann, sind die zugelassenen Wärmeeinstrahlungen nicht in der Lage, die nötige Erwärmung zu erzeugen.

Es gilt auch bei Kritikern von elektromagnetischen Expositionen weithin als akzeptiert, dass die heutigen Grenzwerte sicher

vor Gesundheitsrisiken durch Wärmewirkungen (thermische Wirkungen) schützen. Somit konzentrieren sich die derzeitige öffentliche Diskussion und die Forschung auf so genannte athermische oder nichtthermische Effekte der Hochfrequenzfelder.

Nichtthermische Wirkungen

In Ermangelung einer allgemein akzeptierten Definition von athermischen oder nichtthermischen Wirkungen werden hierunter jene Effekte gefasst, die sich nicht mit einer allgemeinen Erwärmung im biologischen System erklären lassen. In diesem Zusammenhang wird gerade die Pulsung häufig als wichtiger Expositionsfaktor eingestuft. Wie in den Beiträgen 3.1.1 bis 3.1.4 näher erläutert, konnte bisher kein primärer Wirkmechanismus für nichtthermische Effekte schlüssig aufgezeigt oder gar durch Experimente belegt werden.

Mikrowellenhören

Von verschiedenen Seiten wird glaubhaft berichtet, dass starke gepulste Radarfelder Hör-Wahrnehmungen auslösen. In der Fachwelt wird dieses Phänomen oft den nichtthermischen Effekten zugeordnet. Man unterstellt, dass die Mikrowellen-Pulse über eine pulssynchrone Erwärmung des Schädelinhaltes im Rahmen eines thermoelastischen Effektes Schwingungen auslösen, die sich dann auf Gehirnstrukturen übertragen und dort auf noch nicht geklärte Weise zu Erregungen führen. Wenn diese Erregung im Hörzentrum des Gehirns erfolge, dann führe dies zu akustischer Wahrnehmung.

Richtig an dieser Hypothese ist die Existenz des thermoelastischen Effektes, der zur Schwingung der Schädelkalotte führt. Der daraus resultierende Mechanismus des Knochenleitungshörens ist schon lange bei den Audiologen bekannt. Dabei überträgt sich die Schwingung auf die Innenohrflüssigkeit (Perilymphe), was zur Auslenkung der Basilar-Membran führt und damit die akustischen Sinnesrezeptoren (Haarzellen) wie beim normalen Hörgang bewegt. Das Phänomen des Mikrowellenhörens lässt sich also auf den thermoelastischen Effekt und den normalen physiologischen Vorgang des Knochenleitungshörens und damit nicht auf eine direkte Einwirkung auf das Hörzentrum des Gehirns zurückführen. Es handelt sich damit auch streng genom-

men nicht um eine nichtthermische Wirkung.

Auf das Phänomen „Hören gepulster Hochfrequenzfelder“ wird auch im Abschnitt 3.1.2 eingegangen.

Reizeffekte

Aus dem niederfrequenten Bereich sind Reizwirkungen auf Nerven, Muskeln und Sinnesorgane (z. B. Elektrophosphene am Auge) bekannt. Sie sind von 0 bis 30 kHz beschrieben, allerdings nur für sehr hohe Feldstärken.

Wiederum muss betont werden, dass die Molekülstruktur im biologischen System massebehaftet ist und nicht beliebig schnell ihre Konformation bei externen Einflüssen verändern kann. Hochfrequente Felder sind daher normalerweise nicht in der Lage, Erregungen auszulösen.

Vereinzelte traten dennoch in Studien Reizwirkungen durch kurze starke Hochfrequenzimpulse auf. Diese konnten jedoch bisher immer auf die bereits bekannten Effekte Wärmewirkung oder elektromagnetischer Durchschlag des Mediums zurückgeführt werden. Beispielsweise sind neuerdings aus den USA schmerzauslösende Effekte durch starke Radarimpulse (Painbeam, Verwendung als nichttödliche Waffe) bekannt geworden. Diese könnten als reizauslösend bezeichnet werden, bei genauerem Hinsehen geht der Effekt aber auf eine extrem kurze Erwärmung zurück, die einen Hitzeschmerz auslöst.

Im Rahmen von Gerichtsverhandlungen über Versorgungsschäden durch Radar wird immer wieder auch auf die Parallelität zur Auslösung von Elektrosensibilität in der Kommunikationstechnik hingewiesen. Hier wie dort gibt es aber, wie ausführliche Untersuchungen gezeigt haben, kein einheitliches und charakteristisches Krankheitsbild zur Elektrosensibilität.

Krebsrisiko

Krebspromotion oder -kopromotion ist eine der am häufigsten genannten Befürchtungen über die Wirkung von elektromagnetischen Feldern und Radarstrahlung allgemein. Sehr oft werden Leukämie (krebserregende Vermehrung der weißen Blutkörperchen) und Krebsstod als Folge von Radarstrahlung zitiert. Dies beruht

auf Daten epidemiologischer Studien aus Kanada, den USA und Polen aus den 80er und 90er Jahren. Dabei wurden Polizisten mit Handradargeräten zur Geschwindigkeitsmessung bzw. militärische Radartechniker untersucht. Die Ergebnisse sind nicht einheitlich und wurden anscheinend auch nie repliziert. Die Deutsche Radarkommission 2003 kritisiert u.a. methodische Probleme (vor allem bei der Expositionsbestimmung) in diesen Arbeiten, und insbesondere in der polnischen Studie fachliche Fehler. Sie rät deshalb insgesamt zu einer vorsichtigen Bewertung der Studienergebnisse.

Untersuchungen zur Mortalität von Radarmechanikern (David et al 2002) haben keinen Unterschied zur Sterblichkeitsrate von anderen Mechanikern bei der Bundeswehr gezeigt. Nach Forstreuter (2005/06) unterscheidet sich das Auftreten verschiedener Krebsarten bei den Radarmechanikern nicht wesentlich von denen bei anderen Mechanikern.

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Radarsignale, die zu den gepulsten Hochfrequenzfeldern im Mikrowellenbereich gehören, thermische Wirkungen entfalten, wenn sie genügend Energie aufweisen. Dieser Effekt zeigt eine spezifische Wirkung, wenn das Tastverhältnis Spitze zu Pause ungünstig ist, wie es bei den gepulsten Radarsignalen oft der Fall ist. Dann ist der Effektivwert der abgestrahlten Leistung zwar klein, der Spitzenwert aber sehr hoch. Dies ist allerdings bei der Festlegung der Grenzwerte berücksichtigt, so dass dieser Effekt bei Einhaltung der Grenzwerte keine gesundheitlichen Auswirkungen hat.

Die Förderung von Krebserkrankungen wird häufig dem Radar zugesprochen, ohne dass jedoch diese Hypothese bezüglich der HF-Felder durch belastbares Datenmaterial gestützt werden kann. Der scheinbare Zusammenhang resultiert aus der Vermischung von Expositionen mit ionisierenden und nichtionisierenden Strahlen, ihrem prinzipiellem Auftreten bei der Erzeugung des Radarsignals und ihrem realen Beitrag zu der Expositionssituation des Einzelnen.

Inwieweit gepulste HF-Felder wie Radar andere als nur thermische Effekte haben, ist weiterhin Inhalt von Untersuchungen,

woraus aber nicht der Schluss gezogen werden kann, dass die Tatsache ihrer Beforschung schon ihre Existenz belegt.

Literatur

Bernhardt, J.H. (2002): Gesundheitliche Aspekte niederfrequenter Felder der Stromversorgung, Dtsch Ärztebl 2002, 99: A: S. 1898 - 1910.

Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik BGFE (2001): BG-Regeln, BGR B11, Elektromagnetische Felder.

Buddecke, E. (1980): Grundriß der Biochemie. Lehrbuch für Studierende der Medizin, Zahnmedizin und Naturwissenschaften, Walter de Gruyter Berlin – New York, S. 371 - 372.

David, E.; an der Heiden, W.U.; Reißweber, J.; Pfothauer, M. (1991): „Epidemiologische Studien zu den Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf den Menschen“, Dtsch Ärztebl – Ärztliche Mitteilungen, 88. Jahrgang/Heft 10 A: S. 753 - 758.

David, E.; Reißweber, J.; Wojtysiak, A.: Untersuchungen über die Erfassung des gesundheitlichen Risikos von Bundeswehrangehörigen im Arbeitsbereich Radar im Zeitraum 1956-1985 (Studie zur Analyse der Mortalität), Zentrum für Elektropathologie der Universität Witten/Herdecke

David, E.; Reißweber, J.; Wojtysiak, A.; Pfothauer, M. (2002): Das Phänomen der Elektrosensibilität, Umweltmed Forsch Prax 7 (1), S. 7 - 16.

Deutsche Radarkommission (2003). Bericht der Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früheren Radareinrichtungen der Bundeswehr und der NVA (Radarkommission). http://www.bfs.de/bfs/fue_beiiraee/radar/abschlussbericht.html/radar_abschlussbericht.pdf

Finkelstein MM., Cancer incidence among Ontario police officers. Am J Ind Med. 1998 Aug;34(2):157-62.

Forstreuter, C., (2005/06): Untersuchung zu Art und Häufigkeit von Neoplasien bei Radarmechanikern der deutschen Bundeswehr, Dissertation, Universität Witten/Herdecke

Groves FD, Page WF, Gridley G, Lisimaque L, Stewart PA, Tarone RE, Gail MH, Boice Jr JD, Beebe GW, Cancer in Korean war navy technicians: mortality survey after 40 years. Am J Epidemiol 2002; 155 (9): 810 - 818

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) (2000): Extrapulmonale Krebserkrankungen Wismut am 12. Februar 1998 in Hennef, BK-Report, Berufskrankheiten-Forum (Jacobi-Studien II und III), HVBG Sankt Augustin, ISBN: 3-88383-536-6.

International Radiation Protection Association (IRPA) (1990): Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields, Health Phys. 58, S. 113 - 122.

Peier, D. (1990): Grundlagen der Feldtheorie, in: Haubrich, Hans-Jürgen: Sicherheit im elektromagnetischen Umfeld, Berlin - Offenbach: VdE-Verlag, ISBN 3-8007-1700-X, S. 7 - 21.

Polk, C. (1986): CRC-Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, C. Polk and E. Postow, eds. Boca Raton, Florida.

Reilly, J.P. (1992): Electrical Stimulation and Electropathology, with chapters contributed by Hermann Antoni, Cambridge University Press for Library of Congress.

Reißweber, J.; David, E.; Pfothauer, M. (1992): Untersuchungen über psychologische Aspekte bei der Wahrnehmung von Magnetophosphenen und Elektrophosphenen, Biomed. Technik 37, S. 42 - 45.

Reiter, R.J.; Lerchl, A. (1992): Regulation of Mammalian Pineal Melatonin Production by the Electromagnetic Spectrum, in: Melatonin, Biosynthesis, Physiological Effects, and Clinical Applications, edited by Hing-Sing Yu and Russel J. Reiter, CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, S. 108 - 127.

Robinette CD, Silverman C, Jablon S, Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am J Epidemiol* 1980; 112 (1): 39 - 53

Seidel HJ (1995): Umweltmedizin, Fakten und Informationen für einen verantwortungsvollen Umgang mit Umwelt und menschlicher Gesundheit, Georg Thieme Verlag Stuttgart – New York 1996.

Sommer, Th. u.a. (2001): Die Bundeswehr und ihr Umgang mit Gefährdungen und Gefahrenstoffen, Bericht des Arbeitsstabes. http://gruppen.tu-bs.de/studver/StudResK/bericht_uran.pdf

Szmigielski S, Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Sci Total Environ* 1996; 180 (1): 9 - 17

3.1.8 Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Anfallprovokation bei Personen mit Epilepsie

Gabriele Berg, Kristina Heyer, Jasmin Kröber, Bernd Pohlmann-Eden, Inka Schürmann

Bei Epilepsie handelt es sich um eine chronische neurologische Erkrankung, bei der durch eine Überaktivität des Gehirns aufgrund unterschiedlicher Reizeinflüsse Anfälle ausgelöst werden können. Im folgenden Beitrag soll anhand vorliegender Versuchsergebnisse und Studien diskutiert werden, ob und inwieweit elektromagnetische Felder – insbesondere die des Mobilfunks – Einfluss auf diese Krankheit nehmen können.

Pulsung in der Natur: Spiel von Licht und Schatten

Die Epilepsie ist mit einer weltweiten Prävalenz (Möglichkeit des Auftretens) von 0,5 – 1 % die häufigste chronische neurologische Erkrankung (Sridharan 2002). Die Lebensqualität wird bei therapieresistenten Epilepsiekranken deutlich durch den Schweregrad der Anfälle sowie die Anfallshäufigkeit eingeschränkt (Baker et al. 1998). Die Kenntnis der auslösenden Faktoren sowie eine darauf abgestimmte Behandlung bzw. Prävention sind für epilepsiekranken Menschen daher von immenser Bedeutung, um Anfälle weitgehend zu vermeiden oder deren Verlauf zu lindern.

74 Millionen Menschen besaßen im Jahr 2005 in Deutschland laut den Informationen des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik ein Mobiltelefon (Abendroth 2005). Von Interesse erscheint daher die Frage, ob die Nutzung von Mobiltelefonen Anfälle bei Epilepsiekranken auslösen kann.

Die Wirkung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern aus dem Mobilfunkbereich auf die menschliche Gesundheit wird in vielen Veröffentlichungen diskutiert (Repacholi 2001). Allerdings gibt es bis heute kaum wissenschaftliche Hinweise über einen möglichen Zusammenhang zwischen der Nutzung von Mobiltelefonen und der Anfallprovokation bei Epilepsiekranken. Im Folgenden werden die bisher vorhandenen Kenntnisse zu diesem Themengebiet dargestellt.

Nach einer Definition der „Internationalen Liga gegen Epilepsie“ ist Epilepsie eine „Störung des Gehirns, die durch eine dauerhafte Neigung zur Entwicklung

epileptischer Anfälle gekennzeichnet ist (Fisher et al. 2005)“. Dabei versteht man unter Epilepsie eine Gruppe unterschiedlicher Krankheiten, deren Gemeinsamkeit in einer krankhaft erhöhten Anfallsneigung besteht. Ein epileptischer Anfall ist ein vorübergehendes Auftreten von krankhaften Befunden und/oder Symptomen aufgrund einer krankhaft überhöhten oder gleichzeitigen Nervenaktivität im Gehirn.

Nervenzellen weisen an der Zellmembran eine Ladungstrennung oder elektrische Spannung zwischen dem Zellinneren und der extrazellulären Umgebung auf (Polarisation). Bei der Erregungsleitung wird eine lokale Depolarisation (Aktionspotential, d. h. ein zeitweiser Zusammenbruch der Ladungstrennung) über die Nervenfaser hinweg weitergeleitet. Epileptische Aktivitäten sind durch eine innerhalb von Sekunden auftretende gleichzeitige Depolarisation vieler Nervenzellen charakterisiert. Zugrunde liegende Faktoren können dabei eine höhere Dichte erregender Nervenzellkontakte ebenso wie eine Konzentrationsveränderung der Transportboten im zentralen Nervensystem (Neurotransmitter) sein. Bei epilepsiekranken Personen vermutet man einen pathologisch hohen Einstrom positiv geladener Calciumionen in die Zellen, die indirekt das Entstehen und die Aufrechterhaltung paroxysmaler (anfallsartiger) Depolarisationen begünstigen. Während Aktionspotenziale eine Dauer von etwa einer Millisekunde aufweisen, wird diese Zeitspanne bei paroxysmalen Depolarisationen weit überdauert (Köhling 1998). Fokale Anfälle gehen dabei von einem begrenzten Teil des Gehirns aus, während bei generalisierten Anfällen sofort das gesamte Gehirn involviert ist (Fisher et al.

2005). Eine differenzierte Signalverarbeitung der von außen kommenden Reize ist während eines epileptischen Anfalls stark beeinträchtigt. Außerdem werden unwillkürliche Reaktionen beim betroffenen Menschen ausgelöst, die sich seiner bewussten Kontrolle entziehen.

Es werden eine Reihe von auslösenden Ursachen für epileptische Anfälle diskutiert. Dabei sind diese abzugrenzen von den begünstigenden Aspekten zur Manifestation einer Epilepsie. Zunächst seien Störungen im Schlaf-Wach-Rhythmus bzw. Schlafmangel bei einzelnen Epilepsieformen genannt (Oguni 2004). Weiterhin können visuelle Faktoren Anfälle auslösen. Dazu zählen Flickerlicht/TV, Video-Spiele, Augenschließen, gestreifte Wände, gestreifte Kleidung und reflektiertes Sonnenlicht von Schnee oder Wasser oder unterbrochenes Sonnenlicht durch Schatten von Bäumen während einer Autofahrt (Kasteleijn-Nolst Trenite et al. 2004). Ebenfalls wird berichtet, dass kognitive Leistungen wie z. B. Sprechen, linguistische Aktivität, Stottern, aber auch Erinnerung bzw. Konzentration in Einzelfällen Anfälle provozieren können (Helmstaedter et al. 1992; Matsuoka et al. 2005). Auch auditive Signale z. B. beim Musikhören können Anfälle bei Personen mit einer Epilepsie hervorrufen (Wieser et al. 1997). Es wird zunächst in Einzelfallberichten sogar von telefoninduzierten Anfällen sowohl bei Telefonaten im Festnetz als auch mit dem Mobiltelefon berichtet (Michelucci et al. 2004). Weiterhin werden Alkohol (Bartolomei 2004), Stress, Müdigkeit (Nakken et al. 2005), heißes Wasser, z. B. beim Baden, Duschen, Haarewaschen (Satishchandra 2003), Zähneputzen (Koutroumanidis et al. 2001), Hypoglykämie/Hyperglykämie (Pierelli et al. 1997), plötzliche oder un-

erwartete Bewegung (Pierelli et al. 1997) und Hyperventilation (Guaranha et al. 2005) als Auslöser für epileptische Anfälle diskutiert.

Die Wirkung von gepulsten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf das menschliche Gehirn ist inzwischen durch zahlreiche Studien untersucht worden. Zusammenfassend präsentieren sich die Ergebnisse der Studien als sehr heterogen. Trotz der Heterogenität stimmen die Studien weitgehend darin überein, dass die Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern allenfalls leichte Effekte im Sinne einer schlaffördernden Wirkung hervorruft. Ein Anstieg der Leistungsdichte im Alpha-Band des EEGs vor oder während des Schlafes wird von nahezu allen Studien bestätigt (Mann & Röschke 2004; Loughran et al. 2005; Huber et al. 2002, 2003). Veränderungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder im Wach-EEG wurden von Curcio et al. (2005) in einer randomisierten kontrollierten Studie beobachtet. Der Effekt zeigte sich dabei stärker, wenn die Probanden während des EEGs der Strahlung ausgesetzt waren als kurz davor. Hamblin et al. (2006) fanden keine signifikanten Ergebnisse im Hinblick auf den Einfluss von Handynutzung auf das Wach-EEG, speziell auf die auditiven Hirnregionen. Obwohl viele Studien Veränderungen der bioelektrischen Gehirnaktivität durch hochfrequente elektromagnetische Felder zeigen konnten, kommen fast alle Autoren zu dem Schluss, dass sich bei den geringfügigen Veränderungen vermutlich keine gesundheitliche Beeinträchtigung für eine gesunde Bevölkerung ergibt. Allerdings ist der Zusammenhang noch nicht umfassend bei erkrankten Personen, wie z. B. Personen mit Epilepsie, untersucht worden. Lediglich Jech et al. (2001) berichten von einer geringfügigen Verkürzung der Reaktionszeit und Verminderung von Schläfrigkeit bei Narkolepsiepatienten unter Exposition mit einem 900 MHz-GSM-Signal.

Eine aktuelle Publikation berichtet eine Anfallprovokation durch GSM-Felder bei anfälligen Ratten (Lopez-Martin et al. 2006). Bei den Ratten wurde durch eine entsprechende Dosis PicROTOXIN eine erhöhte Krampfbereitschaft erzeugt. Wenn diese Ratten zwei Stunden lang GSM-Feldern mit einer Frequenz von 900 MHz ausgesetzt waren, erlebten sie im Gegensatz zu den nicht exponierten picROTOXIN-behandelten Ratten Anfälle. Allerdings muss angefügt werden, dass die Expositionsverhältnisse nicht klar und nachvollziehbar beschrieben wurden. Unklar bleibt weiterhin, wie sich die Immobilisierung der Ratten in Plexiglasröhren bzw. wie sich eine Wärmezufuhr durch das hochfrequente elektromagnetische Feld auf die Anfallneigung auswirkt. Die Autoren folgern, dass GSM-Felder Anfälle bei medikamentös sensibilisierten Ratten auslösen können und dass diese Möglichkeit auch bei epilepsiekranken Menschen, die Mobiltelefone nutzen, untersucht werden sollte. Dabei handelt es sich jedoch um eine Fragestellung, die nicht leicht zu beantworten ist, da viele anfallauslösende Faktoren eng mit der Aktivität des Telefonierens verbunden sein können – unabhängig davon, ob es ein Mobiltelefon oder ein kabelgebundenes Telefon ist. Empfohlen werden sollte daher eine differenzierte Betrachtung möglicher anfallauslösender Faktoren durch das mobile Telefonieren.

Literatur

- Abendroth L (2005): „In Deutschland sind mehr als 74 Millionen Handys im Umlauf.“ Stand: 18.02.06, <http://www.izmf.de/>
- Baker G A, Gagnon D, McNulty P (1998): „The relationship between seizure frequency, seizure type and quality of life: findings from three European countries.“ *Epilepsy Res* 30 (3): 231-40.
- Bartolomei F (2004): „[Epilepsy induced by alcoholism.]“ *Epileptic Disord* 6 Suppl 1: 77-84.
- Curcio G, Ferrara M, Moroni F, D’Inzeo G, Bertini M, De Gennaro L (2005): „Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness.“ *Neurosci Res* 53 (3): 265-70.
- Fisher R S, van Emde Boas W, Blume W, Elger C, Genton P, Lee P, Engel J, Jr. (2005): „Epileptic seizures and epilepsy: definitions proposed by the International League Against Epilepsy (ILAE) and the International Bureau for Epilepsy (IBE)“ *Epilepsia* 46 (4): 470-2.
- Guaranha M S, Garzon E, Buchpiguel C A, Tazima S, Yacubian E M, Sakamoto A C (2005): „Hyperventilation revisited: physiological effects and efficacy on focal seizure activation in the era of video-EEG monitoring.“ *Epilepsia* 46 (1): 69-75.
- Hamblin D L, Croft R J, Wood A W, Stough C, Spong J (2006): „The sensitivity of human event-related potentials and reaction time to mobile phone emitted electromagnetic fields.“ *Bioelectromagnetics*.
- Helmstaedter C, Hufnagel A, Elger C E (1992): „Seizures during cognitive testing in patients with temporal lobe epilepsy: possibility of seizure induction by cognitive activation.“ *Epilepsia* 33 (5): 892-7.

- Huber R, Treyer V, Borbely AA, Schuderer J, Gottselig JM, Landolt HP, Werth E, Berthold T, Kuster N, Buck A, Achermann P (2002): „Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG.“ *J Sleep Res.* Dec;11(4):289-95.
- Huber R, Schuderer J, Graf T, Jutz K, Borbely AA, Kuster N, Achermann P (2003): „Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: Estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate.“ *Bioelectromagnetics.* May;24(4):262-76.
- Jech R, Sonka K, Ruzicka E, Nebuzelsky A, Bohm J, Juklickova M, Nevsimalova S (2001): „Electromagnetic field of mobile phones affects visual event related potential in patients with narcolepsy.“ *Bioelectromagnetics.* Oct;22(7):519-28.
- Kasteleijn-Nolst Trenite D G, Van Der Beld G, Heynderickx I, Groen P (2004): „Visual stimuli in daily life.“ *Epilepsia* 45 Suppl 1: 2-6.
- Köhling R (1998): „Basismechanismen epileptischer Aktivität – 002.“ Stand: 30.04.06, 2006
<http://www.izepilepsie.de/cweb/design/home.icom?id=32>.
- Koutroumanidis M, Pearce R, Sadoh D R, Panayiotopoulos C P (2001): „Tooth brushing-induced seizures: a case report.“ *Epilepsia* 42 (5): 686-8.
- Lopez-Martin E, Relova-Quinteiro J L, Gallego-Gomez R, Peleteiro-Fernandez M, Jorge-Barreiro F J, Ares-Pena F J (2006): „GSM radiation triggers seizures and increases cerebral c-Fos positivity in rats pretreated with subconvulsive doses of picrotoxin.“ *Neurosci Lett* 398 (1-2): 139-44.
- Loughran S P, Wood A W, Barton J M, Croft R J, Thompson B, Stough C (2005): „The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep.“ *Neuroreport* 16 (17): 1973-6.
- Mann K, Roschke J (2004): „Sleep under exposure to high-frequency electromagnetic fields.“ *Sleep Med Rev* 8 (2): 95-107.
- Matsuoka H, Nakamura M, Ohno T, Shimabukuro J, Suzuki T, Numachi Y, Awata S (2005): „The role of cognitive-motor function in precipitation and inhibition of epileptic seizures.“ *Epilepsia* 46 Suppl 1: 17-20.
- Michelucci R, Gardella E, de Haan G J, Bisulli F, Zaniboni A, Cantalupo G, Alberto Tassinari C, Tinuper P, Nobile C, Nichelli P, Kasteleijn-Nolst Trenite D G (2004): „Telephone-induced seizures: a new type of reflex epilepsy.“ *Epilepsia* 45 (3): 280-3.
- Nakken K O, Solaas M H, Kjeldsen M J, Friis M L, Pellock J M, Corey L A (2005): „Which seizureprecipitating factors do patients with epilepsy most frequently report?“ *Epilepsy Behav* 6 (1): 85-9.
- Oguni H (2004): „Diagnosis and treatment of epilepsy.“ *Epilepsia* 45 Suppl 8: 13-6.
- Pierelli F, Di Gennaro G, Gherardi M, Spanedda F, Marciani M G (1997): „Movement-induced seizures: a case report.“ *Epilepsia* 38 (8): 941-4.
- Repacholi M H (2001): „Health risks from the use of mobile phones.“ *Toxicol Lett* 120 (1-3): 323-31.
- Satishchandra P (2003): „Hot-water epilepsy.“ *Epilepsia* 44 Suppl 1: 29-32.
- Sridharan R (2002): „Epidemiology of epilepsy.“ *Epilepsia* 82 (T. 6): 664-670.
- Wieser H G, Hungerbuhler H, Siegel A M, Buck A (1997): „Musicogenic epilepsy: review of the literature and case report with ictal single photon emission computed tomography.“ *Epilepsia* 38 (2): 200-7.

3.2 Schnellschuss oder wissenschaftliche Qualität? Verwirrende Vielfalt der Forschungsaktivitäten

Basis wissenschaftlicher Erkenntnis ist die Forschung. Will man also zu beobachteten oder vermuteten Effekten die genauen Ursachen und Wirkungsweisen kennen, zum Beispiel um einen angemessenen Umgang damit abzuleiten, insbesondere um sich die natürlichen Effekte zunutze zu machen, ohne dadurch Schaden zu nehmen, so muss man intensiv in Forschungen einsteigen, d. h. die Effekte in ihrem gesamten Umfang in wissenschaftlicher Qualität analysieren.

Zum Thema Mobilfunk gibt es bereits eine sehr große Zahl an Forschungsarbeiten und –ergebnissen mit mehr oder weniger guter wissenschaftlicher Qualität.

Die Beurteilung der gewollten und besonders auch der ungewollten Effekte elektromagnetischer Felder und die weitere Forschung konzentrieren sich daher auf Teilthemen bzw. Sichtweisen, zu denen noch nennenswerte Unsicherheiten bestehen.

Ein solches Teilthema, die Besonderheiten gepulster Felder, ist Gegenstand dieses Buches. In diesem Abschnitt wird zunächst der Versuch unternommen, anhand der einzelnen vorliegenden speziellen Studien einen umfassenden Überblick zu geben über den Stand der Erkenntnisse zu besonderen Wirkungen der Pulsung.

Ergänzt wird diese Übersicht durch die Darstellung der aktuellen Diskussion zu einer weiteren speziellen Betrachtung, die unter dem Begriff „Mechanismen“ zusammengefasst wird und den vollständigen Ursache-Wirkungs-Weg erfassen will.

3.2.1 Literaturanalyse zu experimentellen biomedizinischen Studien über Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder unter besonderer Berücksichtigung des Unterschieds zwischen „gepulsten“ und „ungepulsten“ Feldern

Wilma Dubois, Frank Gollnick, Margarita Simeonova

Die vorliegende Literaturanalyse hatte das Ziel, experimentelle, biomedizinische Studien, die sich explizit der Frage nach der Wirkung pulsmodulierter Felder (PW, pulsed wave = „gepulste Welle“) im Vergleich zu nicht pulsmodulierten Feldern (CW, continuous wave = „kontinuierliche Welle“) widmeten, zu recherchieren und auszuwerten. Dabei wurde überprüft, ob die in dieser wissenschaftlichen Literatur aufgezeigten biologischen Effekte elektromagnetischer Felder (Frequenzbereich 0,35 – 300 GHz) je nach Anwendung pulsmodulierter bzw. nicht pulsmodulierter Felder unterschiedlich waren. In den entsprechenden Studien wurde biologisches Material wie Zellen, Gewebeproben und Pflanzen sowie Tiere und Menschen untersucht.

Im Fokus der Analyse stand *nicht* zu ermitteln, in welchen Studien die Auslösung eines messbaren biologischen Effekts durch die Einwirkung der Felder *an sich* beschrieben wird, sondern in welchen *Effektunterschiede* unter PW- und CW-Bedingungen oder das Auftreten eines Effekts unter nur *einer* dieser Bedingungen festgestellt wurden.

Die Herkunft der Studien nach Ländern und Arbeitsgruppen, die technischen Aspekte sowie verschiedene biologische Endpunkte wurden berücksichtigt bzw. gesondert betrachtet. Ziel war es hier, Parameter aufzudecken, die möglicherweise besonders empfindlich auf eine Pulsung elektromagnetischer Felder ansprechen. Dabei sollten erkennbare Tendenzen herausgefiltert werden und eventuell vorhandene Forschungslücken aufgezeigt werden.

Im vorliegenden Buch wird eine Kurzfassung der Literaturanalyse vorgestellt, während die vollständige Literaturanalyse als umfassendes eigenes Werk zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht wird. Alle im folgenden Text genannten Literaturzitate beziehen sich auf die Literaturliste im Anhang zu diesem Buch (A9).

Methoden

Die experimentellen Studien, in denen man die Auswirkungen von CW und PW mit Trägerfrequenzen zwischen 350 MHz und 300 GHz untersuchte, wurden in zwei Datenbanken recherchiert:

EMF-Database

von Information Ventures, USA

(<http://infoventures.com/emf/database/>) und

EMF-Portal

des FEMU am Universitätsklinikum der RWTH Aachen

(<http://www.emf-portal.de>).

Wegen der beträchtlichen Anzahl der Studien – bei begrenzter Zeit und begrenztem Budget für die Auswertung – konnten nur die Abstracts (Kurzzusammenfassungen) der Publikationen analysiert werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die in den meisten Fällen ausgewerteten, redaktionell erweiterten Abstracts aus der EMF-Database wesent-

lich umfangreicher sind und mehr Detailinformationen enthalten als die üblichen, frei verfügbaren Abstracts aus den Originalpublikationen. Die für die Analyse relevanten Informationen wurden vor Beginn der Auswertung genau definiert und dann, sortiert nach den folgenden Hauptkategorien, aus den Abstracts extrahiert und in Form einer Excel-Tabelle aufgelistet:

- Bibliografische Daten
- Expositionsparameter, inklusive aller Daten zum Expositionstyp und zum technischen experimentellen Design
- Biologische Parameter
- Detaillierte Aufschlüsselung der jeweils beobachteten Effekte, die explizit infolge von CW vs. PW auftraten.

Nach Übertragung der relevanten Details aus den Publikationen in die Excel-Tabelle wurden die Daten anhand einer vordefinierten Strategie verglichen und dabei verschiedenen Querschnitts- und The-

menanalysen unterzogen. Dies geschah sowohl unter technischen als auch unter biologischen Gesichtspunkten, jeweils mit Blick auf die Expositionsbedingungen „CW“ bzw. „PW“. Besonderes Augenmerk wurde auf den Energieeintrag unter CW und PW innerhalb eines Experimentes, auf die Grenzwertnähe der angewandten Feldstärken sowie auf die Angaben hinsichtlich thermischer oder athermischer Versuchsbedingungen gelegt.

Hierbei wurden Studien als höher relevant eingestuft (n=47 Studien von 163), bei denen sowohl

- der Energieeintrag unter CW und PW gleich war (n=108 von 163) als auch
- die Feldstärken im Bereich bzw. unterhalb der derzeit geltenden Grenzwerte lagen.

Entsprechend wurden Ergebnisse der Studien mit geringerer Relevanz bewertet, in denen

- ungleiche Energieeinträge unter CW- und PW-Exposition innerhalb eines Experiments auftraten,
- ausschließlich mit Feldstärken oberhalb der derzeit geltenden Grenzwerte exponiert wurde,
- eindeutig thermische Versuchsbedingungen vorlagen oder
- die Abstracts wichtige Informationen über relevante Parameter (z. B. Modulationsfrequenz) nicht enthielten.

Hinsichtlich folgender Aspekte und Themenschwerpunkte wurden die Abstracts analysiert und verglichen:

Aspekte

- Zeitraum, Land, Autorengruppe
- Frequenzen, Pulsweite
- Art und Dauer der Exposition
- Energieeintrag
- Grenzwertnähe
- Temperatur
- Studientyp
- Untersuchungsobjekt
- Körpersystem
- Biologischer Endpunkt

Biologische Themen

- Nervensystem
- Genotoxizität
- Verhalten (des Individuums/ Lebewesens)
- Bluthirnschranke
- Membranfunktion
- Embryo
- Leukozyten
- Enzyme
- Melatonin
- Hitzeschock-Proteine
- Krebserkrankungen

Insgesamt wurden 163 „peer-reviewed“ (von unabhängigen Fachexperten begutachtete) Publikationen aus dem Zeitraum 1967 bis Januar 2006 (Ende des Auswertzeitraums) gefunden, die den genannten Selektionskriterien entsprechen. Der größte Anteil dieser Studien stammt aus den USA und Kanada (46 %), gefolgt von Europa (34 %) und Russland incl. UdSSR (12 %).

Abb. 1 zeigt die zeitliche Verteilung der Publikationen in Bezug auf ihre Herkunft. Der überwiegende Anteil der amerikanischen Studien wurde in dem Zeitraum von 1975 bis 1988 publiziert, während in Europa ab 1992 vermehrt Forschungsergebnisse zu der vorliegenden Fragestellung veröffentlicht wurden. Im Gegen-

satz zu den Studien aus Italien und Ungarn zeigen fast alle deutsche Studien (8 von insgesamt 9) keinen Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen auf. In Italien und Deutschland wurde neben den USA (hier ab den 90er Jahren) am häufigsten ausschließlich unterhalb oder im Bereich der derzeit gültigen Grenzwerte exponiert.

In **Abb. 2** ist die Anzahl der Studien entsprechend ihrer Herkunft gegenüber den untersuchten Trägerfrequenzen dargestellt. Einige deutliche Gipfel sind zu erkennen. Am häufigsten wurden die Trägerfrequenzen 0,9 GHz (n=30) und 2,45 GHz (n=38), gefolgt von 1,3 GHz (n=5), 1,8 GHz (n=5), 2,8 GHz (n=6) und 3,0 GHz (n=7) eingesetzt.

In **Abb. 3 a** wurden die in den Studien eingesetzten Trägerfrequenzen in Abhängigkeit vom Erscheinungsjahr aufgetragen. Mit Hilfe der dreidimensionalen Darstellung ist die Anzahl der jeweiligen Studien (Höhe der Pyramiden) und somit die Häufigkeit des Einsatzes einzelner Trägerfrequenzen im Verlauf der betrachteten Jahre zu erkennen. Den am häufigsten untersuchten Trägerfrequenzen wurden technische Anwendungen zugeordnet (Farbringe). Die zeitliche und geografische Verteilung der in der analysierten Literatur verwendeten Frequenzen spiegelt die Verbreitung der Funk- und Mikrowellen-Technologien wider. Überwiegend wurden in den Studien die Expositionsbedingungen an die Bedingungen angepasst, unter denen Menschen in

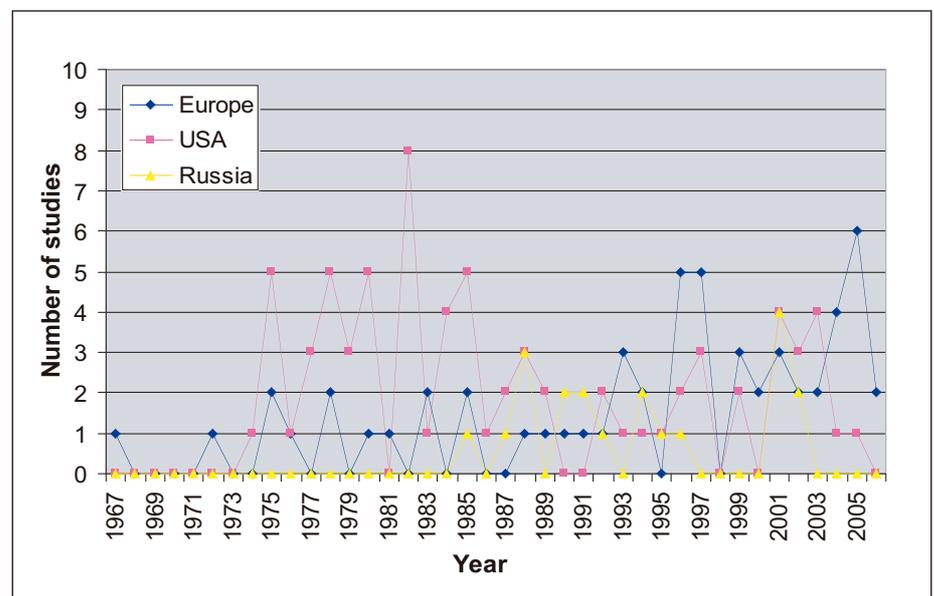


Abb. 1: Verteilung der Publikationen aus Europa, den USA (+ Kanada) und Russland (+ frühere UdSSR) nach dem Erscheinungsjahr.

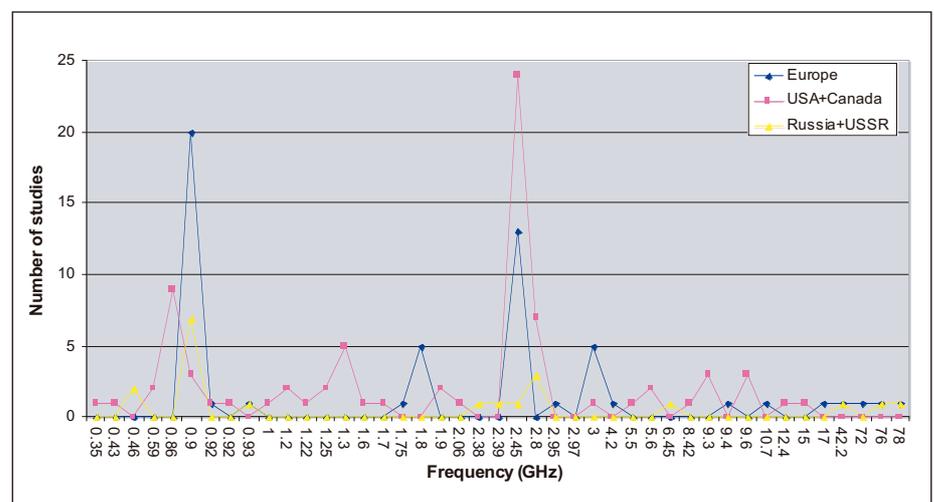


Abb. 2: Verteilung der Publikationen aus Europa, den USA (+ Kanada) und Russland (+ frühere UdSSR) nach der untersuchten Trägerfrequenz.

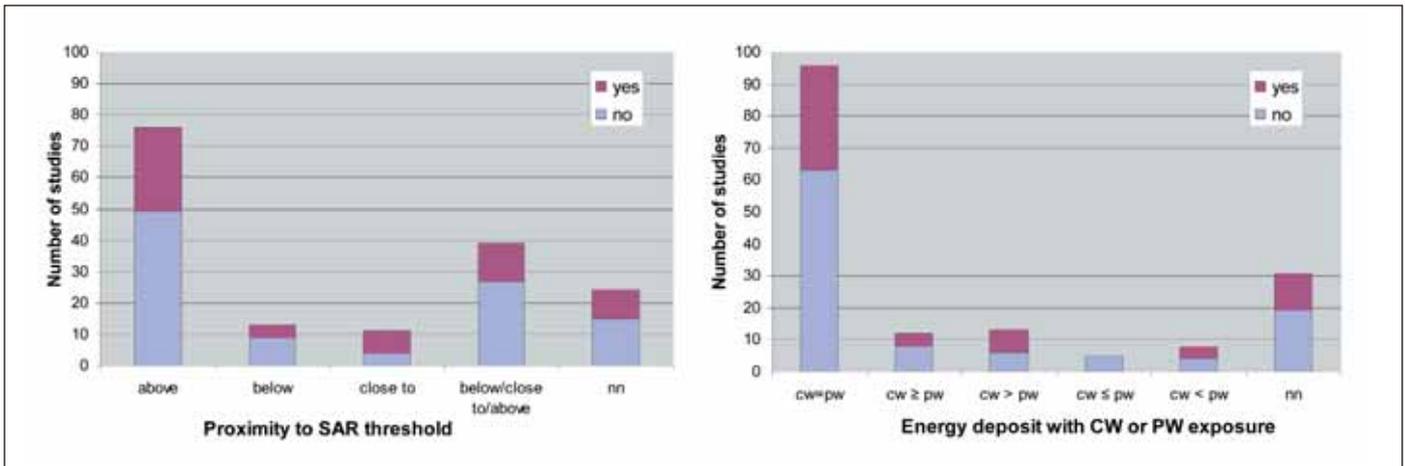


Abb. 5: Anzahl der Studien mit und ohne (yes/no) Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen, nn = Abstracts ohne Angaben zu diesen Parametern
 Abb. 5a (links): abhängig von der Grenzwertnähe der in den Studien eingesetzten Felder: oberhalb/unterhalb/im Bereich der Grenzwerte (above/below/close to)
 Abb. 5b (rechts): abhängig vom gleichen oder ungleichen Energieeintrag unter CW- und PW-Bedingungen.

In den Abb. 5a und b ist die Anzahl der Studien entsprechend der Grenzwertnähe (Abb. 5a) sowie dem relativen Energieeintrag innerhalb eines Experiments unter CW bzw. PW Bedingungen (Abb. 5b) dargestellt. Für jede Gruppe ist der Anteil an Studien, die unterschiedliche Effekte zwischen CW und PW aufwiesen, anhand der Farbgebung markiert. In den Tabellen 1 und 2 sind die markanten Werte der Abb. 5a und b herausgestellt.

In Studien, die keinen Unterschied zwischen CW und PW beschrieben, wurden unter niedrigen Feldstärken deutlich weniger häufig biologische Effekte beobachtet (in 36 % der entsprechenden Studien) als unter hohen Feldstärken (in 62 % der entsprechenden Studien).

Abb. 6 zeigt einen Überblick über „Temperaturkontrollen während der Experimente“ abhängig vom jeweiligen Studientyp („in vivo“/„in vitro“/„in vivo -> in vitro“ [in vivo exponiert, in vitro untersucht]) (Abb. 6a) und von den „thermischen bzw. athermischen Versuchsbedingungen“ (Abb. 6b), jeweils in Verbindung mit der Aussage, ob unterschiedliche Effekte unter CW- und PW-Bedingungen beobachtet wurden. Die Unterscheidung in „thermische“ bzw. „athermische“ Versuchsbedingungen beruht ausschließlich auf den von den Autoren getroffenen Aussagen (n=57).

Tabelle 3 liefert markante Werte zu den Abb. 6. Daraus ist ersichtlich, dass in 48 % der Studien, in denen die Autoren die beobachteten CW-PW-Effektunterschiede „athermisch“ eingestuft haben, dies nicht durch Temperaturkontrolle verifiziert

Energieeintrag (SAR oder Leistungsflussdichte)	von allen 163 Studien		
	gesamt		Effektunterschied CW / PW beobachtet %
	Anzahl	%	
oberhalb der Grenzwerte	76	46,6 %	35 %
unterhalb der Grenzwerte	13	7,9 %	42 %
im Bereich der Grenzwerte	11	6,7 %	
sowohl oberhalb, unterhalb, als auch im Bereich der Grenzwerte	39	24,0 %	31 %
keine Angaben	23	14,8 %	38 %

Tabelle 1: verwendete Energieeinträge in den Studien

Studien mit Angaben zum Energieeintrag	von allen 163 Studien		von den Studien mit Angaben zum Energieeintrag ergab sich ein mit Effektunterschied bei CW / PW in %
	Anzahl	%	
gesamt	108		30 %
Energieeintrag bei CW und PW unterschiedlich	19		47 %

Tabelle 2: Energieeintrag und Effekt-Unterschiede

(oder die Kontrolle im Abstract nicht erwähnt) wurde.

Am häufigsten wurden Temperaturkontrollen in in vitro-Studien (72%, n=49 von insgesamt 68 in vitro-Studien) beschrie-

ben. Hierbei wurde die Temperatur überwiegend im externen Medium und nur selten im Versuchsobjekt selbst, wie z.B. einer Gewebeprobe, gemessen, oder es wurde nur eine bestimmte Temperatur in der Umgebung des Objektes eingestellt.

In vivo- (n=52) und in vivo -> vitro-Studien (n=37) wurde weniger häufig eine Temperaturkontrolle beschrieben (insgesamt in 30.3%, n=27 von 89 in vivo und in vivo->vitro Experimenten). Diese wurde überwiegend in Form von Temperaturmessungen im Enddarm, Dickdarm oder Unterhautgewebe der exponierten Untersuchungsobjekte durchgeführt.

Generelle Ergebnisse

In 73 % der insgesamt 163 Studien wurde dem Feldeinfluss ein biologischer Effekt zugeschrieben (unabhängig von CW- oder PW-Bedingungen). In 37 % der insgesamt 163 Studien waren die Effekte unter Feldeinfluss bei CW- und PW-Bedingungen gleich. Bei 36 % der insgesamt 163 Studien wurden unterschiedliche Effekte durch CW bzw. PW hervorgerufen. Dies konnten sein:

- Unterschiedlich starker Effekt,
- Effekt *nur* bei CW oder PW,
- Gegensätzliche Effekte unter CW und PW
- Veränderung der Art des Effekts unter PW gegenüber CW

Wenn unterschiedliche Wirkungen unter CW- und PW-Bedingungen auftraten, zeigten sich die Effekte überwiegend (65 %) unter PW, bzw. sie wurden unter PW verstärkt.

CW-PW-Effektunterschiede traten bei gleichen Energieeinträgen unter CW und PW in knapp 30 % der Studien auf und bei ungleichen Energieeinträgen in knapp 50 % der Studien. Unter athermischen Versuchsbedingungen gemäß Autorenangabe wurde häufiger eine unterschiedliche Wirkung von CW und PW beobachtet als unter thermischen Bedingungen (Abb. 6b).

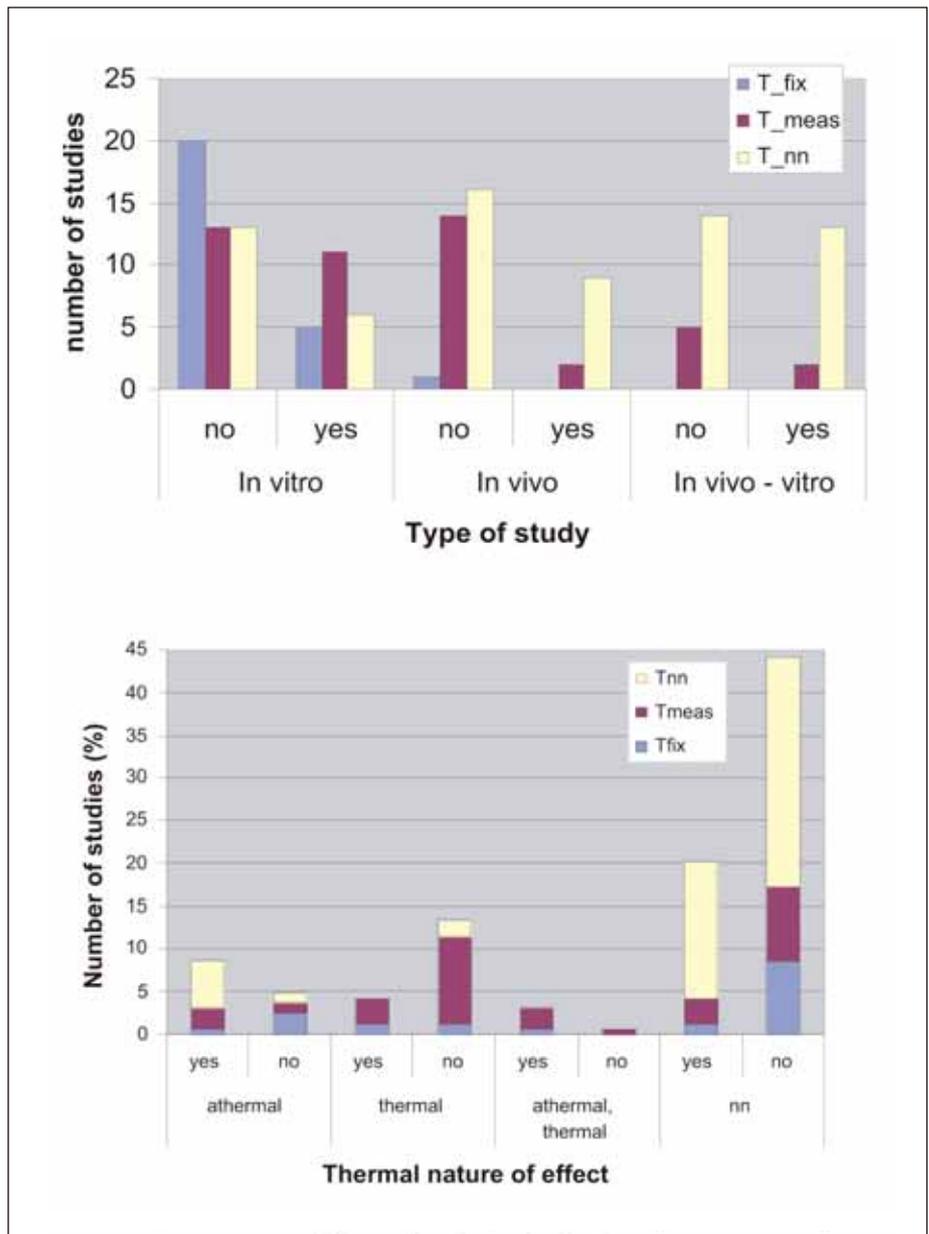


Abb. 6: Durchführung einer Temperaturkontrolle (T_fix = eingestellt, T_meas = gemessen, T_nn = keine Kontrolle/keine Angabe)
 Abb. 6a (oben): nach Studientypen (in vitro, in vivo, in vivo -> vitro)
 Abb. 6b (unten): nach der thermischen Art der Effekte, die laut Autorenangaben durch die angewandten Felder hervorgerufen wurden (athermisch, thermisch, athermisch + thermisch, keine Angaben).
 Für jeden Studientyp bzw. jede Art Effekt ist die Menge der Studien getrennt aufgetragen, je nachdem, ob ein Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen gemessen wurde oder nicht (yes/no).
 Beachte: In Abb. 6b wurde die Anzahl der Studien als Prozentsatz dargestellt bezogen auf alle analysierten Publikationen (n=163).

Art des gefundenen Effekts	von insgesamt 163 Studien					
	athermisch		thermisch		thermisch oder athermisch	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
	21	13 %	30	18 %	6	3,7 %
Temperaturkontrolle beschrieben	davon		davon			
	11	52 %	25	85 %		

Tabelle 3: Klassifizierung der Studien nach Temperaturabhängigkeit

Ein Zusammenhang zwischen (laut Autoren) thermischen und athermischen Bedingungen und der Feldstärke der tatsächlich eingesetzten Felder konnte in der vorliegenden Analyse oft nicht festgestellt werden. So wurden z. B. in 12 der 21 Studien, die nach Aussage der Autoren athermische Versuchsbedingungen aufwiesen, ausschließlich oberhalb der Grenzwerte exponiert und in nur 1 Studie ausschließlich unterhalb oder im Bereich der Grenzwerte. Entsprechendes wurde umgekehrt auch bei Studien beobachtet, die laut Autor unter thermischen Versuchsbedingungen durchgeführt worden waren. Von den insgesamt 30 Studien, in denen ausschließlich unterhalb oder im Bereich der Grenzwerte exponiert wurde, wurde in nur 1 Studie das Vorliegen athermischer Bedingungen und in 2 Studien das Vorliegen thermischer Bedingungen vom Autor erwähnt. Eine Begriffsverwirrung herrscht möglicherweise insofern, als von manchen Autoren unter „athermischen“ Bedingungen nur eine als ausreichend erachtete Kühlung verstanden wird, ohne dass eine Temperaturmessung am Objekt durchgeführt wurde.

Aus den in den Experimenten eingesetzten Feldstärken kann somit offenbar nicht ohne Weiteres auf athermische bzw. thermische Versuchsbedingungen geschlossen bzw. auf die Aussage der Autoren vertraut werden.

Von einzelnen Parametern abhängige Ergebnisse

Einzelne Parameter, die zweifelsfrei in direkten Zusammenhang mit einer gehäuft auftretenden unterschiedlichen Wirkung von CW und PW gebracht werden könnten, wie z. B. bestimmte Träger- und Modulationsfrequenzen, Expositionsschemata (kontinuierliche oder intermittierende Exposition; akute, zeitlich begrenzte oder chronische Exposition), Studientyp, Untersuchungsobjekte etc., konnten sowohl bei der Betrachtung der gesamten Datenbasis als auch bei ausschließlicher Betrachtung der als „höher relevant“ eingestuften Studien (s.o.) nicht eindeutig ermittelt werden.

Es zeigten sich jedoch erwähnenswerte Tendenzen. Beispielsweise traten Unterschiede bezüglich der Wirkungen von CW und PW unter den Trägerfrequenzen 0,9 GHz, 1,8 GHz und 2,45 GHz häufiger auf als bei 1,3 GHz und 2,8 GHz sowie

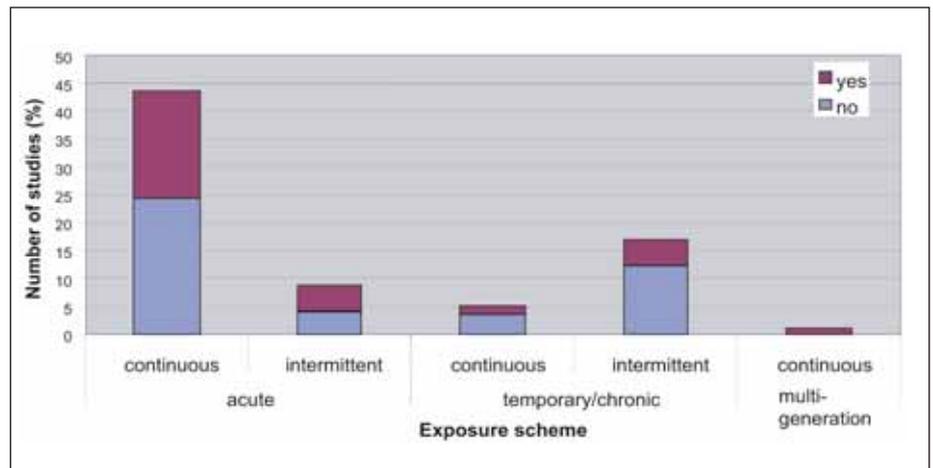


Abb. 7: Anteil der Publikationen (in % von allen 163) mit („yes“) und ohne („no“) gemessenem Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen in Abhängigkeit von Art (kontinuierlich, intermittierend) und Dauer (akut, zeitlich begrenzt/chronisch, über mehrere Generationen) der Exposition.

(unabhängig von der Trägerfrequenz) auch unter der Modulationsfrequenz von 16 Hz. Außerdem zeigten sich CW-PW-Unterschiede häufiger in Experimenten mit akuter Feldexposition als in solchen mit längerfristiger Exposition (Abb. 7). Dabei ist jedoch zu beachten, dass nur halb so viele Studien mit längerfristiger als mit kurzfristiger Exposition vorliegen, wodurch sich der Prozentsatz bezüglich „temporary/chronic“ (zeitweilig/dauerhaft) schon bei minimal veränderten Absolutzahlen erheblich stärker verschiebt als bei den kurzfristig exponierten Studien mit der größeren Datenbasis.

Bei einem relativ hohen Anteil der „in vivo“-Studien wurde oberhalb der Grenzwerte exponiert, während in „in vitro“-Studien deutlich häufiger nahe oder unterhalb der Grenzwerte exponiert wurde. Bei den „in vitro“-Studien wurde außerdem häufiger mit gleichen Energieeinträgen bei CW und PW gearbeitet. In 34 % der „in vitro“-Studien wurde ein CW-PW-Effektunterschied beschrieben. Der geringere Prozentsatz an in vivo-Studien, die einen Unterschied zwischen CW und PW aufweisen (29 %), könnte vor diesem Hintergrund als Folge einer „Effektsättigung“ interpretiert werden. So könnte es sein, dass auftretende biologische Effekte aufgrund hoher Feldstärken bereits unter CW als auch unter PW so stark ausgeprägt waren („gesättigt“ waren), dass bei diesen Studien kein Unterschied mehr zwischen CW und PW ermittelt werden konnte. Hierfür spräche auch der vergleichsweise große Anteil an Studien ohne Unterschied zwischen CW und PW, bei denen biologische Effekte auftraten. Außerdem ist die

Beobachtung interessant, dass ein relativ großer Anteil (63 %) der hier vorliegenden „in vivo“-Studien in früheren Jahren (1967-1990) durchgeführt wurde (gegenüber nur 41 % der „in vitro“-Studien in diesem Zeitraum), während 38 % der hier zusammengetragenen „in vitro“-Studien ab dem Jahr 2000 durchgeführt wurden (gegenüber nur 23 % der „in vivo“-Studien).

Aufgrund der zu kleinen Datenbasis kann diesen Trends keine große Bedeutung beigemessen werden. In der Auswahl weiterer Forschungsvorhaben sollten sie jedoch verstärkt berücksichtigt werden. Bezüglich der Trägerfrequenzen lagen die Schwerpunkte in den 163 Studien eindeutig bei 0,9 GHz und 2,45 GHz. Weiterer Forschungsbedarf bestünde hier für andere relevante Trägerfrequenzen, die sich aus technischen Anwendungen ergeben.

Erwähnenswerte Tendenzen bei biologischen Systemen

Abb. 8 zeigt einen Überblick über die innerhalb der 163 Studien betrachteten Körpersysteme bzw. Untersuchungssysteme. Im Rahmen der „in vivo“-Studien wurden insgesamt 11 verschiedene Körpersysteme sowie ganze Organismen untersucht (Abb. 8a). Bei den „in vivo->in vitro“-Studien und den „in vitro“-Studien wurden die Studien auf Grund ihrer geringen Anzahl pro Körpersystem zunächst in verschiedene Untersuchungssysteme unabhängig von den Körpersystemen eingeteilt (z. B. „Ganzkörper“, „Organ“, „Blut-Hirn-Schranke (BBB)“, „Zellen“, „Zellkultur“, „histologischer Schnitt“ etc.). Erst damit bestand

die Möglichkeit, einzelne Untersuchungssysteme zu erkennen, bei denen es gehäuft zu unterschiedlichen Effekten zwischen CW und PW gekommen sein könnte. In der weiteren Auswertung wurde dann jede Studie innerhalb der Gruppe eines Untersuchungssystems einem Körpersystem zugeordnet. Im Rahmen der Gesamtauswertung wurden dagegen die Körpersysteme meist übergreifend über die Studientypen betrachtet.

Das am häufigsten untersuchte Körpersystem war das Nervensystem mit insgesamt 39 Studien. (10 „in vivo“-Studien, 15 „in vivo -> in vitro“-Studien, 11 „in vitro“-Studien, 3 „in situ“-Studien, ohne Berücksichtigung weiterer 10 Studien zur Blut-Hirn-Schranke). Abgesehen von den „in vivo“- und „in vivo -> vitro“-Studien zum „whole organism“ („Ganzkörper“, 19 Studien, davon 7 [37%] mit Unterschied zwischen PW und CW, davon bei 5 Studien Effekte durch PW *verstärkt*) wurden unabhängig vom Studientyp das sensorische System, das kardiovaskuläre (Herz-Kreislauf-) System und das Immunsystem mit jeweils 11-14 Studien am häufigsten untersucht. In 30,7% (n=4) der Studien zum sensorischen System, in 50% (n=6) der Studien zum kardiovaskulären System und in 91% (n=10) der Studien zum Immunsystem wurden keine *biologischen Effekte* beobachtet.

Demgegenüber zeichnete sich beim **Nervensystem** eine überdurchschnittliche Empfindlichkeit gegenüber EMF ab. In 87% (n=34 von 39) dieser Studien wurden biologische Effekte aufgrund von EMF beobachtet (zum Vergleich: in 73% bzgl. aller 163 Studien). In 43,5% (17 von 39) der Studien wurde eine unterschiedliche Wirkung von CW im Vergleich zu PW beobachtet (zum Vergleich: in 36% bzgl. aller 163 Studien). Auf der Grundlage der als „höher relevant“ eingestuften Studien zum Nervensystem (n=8 von 39) beschrieben 75% (n=6) der Studien Effekte aufgrund von EMF (in zwei Fällen allerdings nur unter thermischen Bedingungen), 25% (n=2 von 8) davon zeigten Unterschiede zwischen CW und PW, dabei in beiden Fällen unter PW stärkere Effekte als unter CW. Der größte Anteil der Studien bezüglich des Nervensystems wurde in den 80er (n=11) und 90er (n=15) Jahren durchgeführt. Aus den letzten 6 Jahren liegen insgesamt 8 Untersuchungen vor.

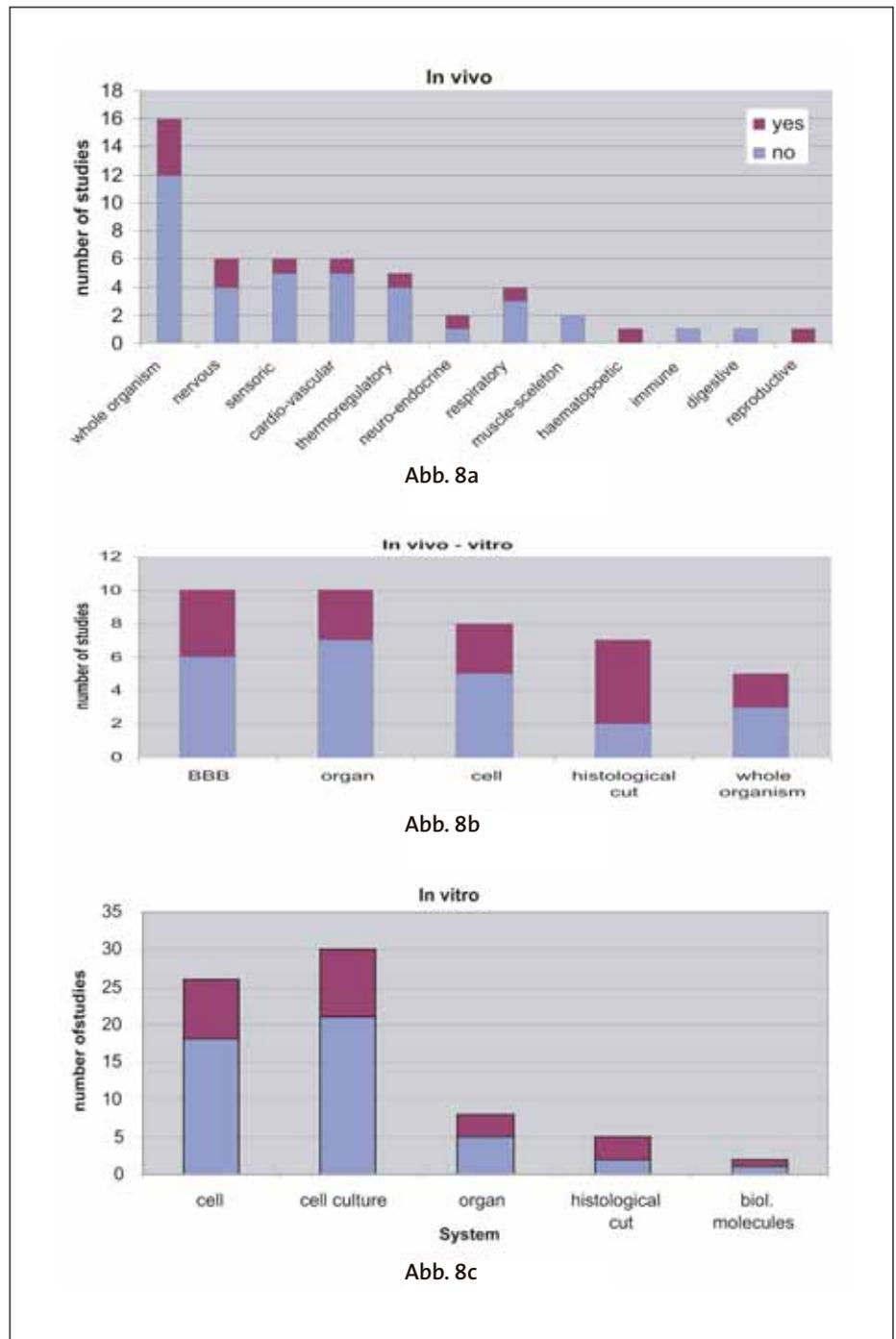


Abb. 8: Anteil der Publikationen (% von allen 163) mit/ohne („yes“/„no“) gemessenem Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen abhängig vom untersuchten System, d. h. in

Abb. 8a: „in vivo“-Studien,
Abb. 8b: „in vivo->in vitro“-Studien,
Abb. 8c: „in vitro“-Studien.

In einigen Studien wurden mehrere verschiedene Objekte untersucht, daher übersteigt die Summe der in den Abbildungen angegebenen Studien die Gesamtzahl der Studien.

Bei Untersuchungen zur Aktivität verschiedener **Enzyme** wurden gehäuft biologische Effekte auch unter athermischen Bedingungen beschrieben, in den meisten Fällen unter CW und PW unterschiedlich, wobei die Modulationsfrequenz von 16 Hz in drei Studien als verstärkendes bzw. auslösendes Moment beschrieben wurde (Sanders 1985, Somosy

1994, Penafiel 1997; in Sanders 1985 nur amplitudenmoduliert). Im Gegensatz hierzu konnte weder CW- noch PW-Feldern eine **carcinogene bzw. genotoxische Wirkung** zugesprochen werden (Abb. 10). Auch bezüglich der biologischen Endpunkte „molecular biosynthesis“ (hier hauptsächlich Untersuchungen zur Genexpression) und „organ function“ (hier

überwiegend Untersuchungen am Organ „Herz“) zeigten sich die jeweiligen Untersuchungsobjekte vergleichsweise unempfindlich gegenüber dem Einfluss von EMF und reagierten nur vereinzelt unterschiedlich auf CW und PW (Abb. 9).

Weitere Themengebiete wie z. B. Melatonin und Zelltransformation bzw. Blut-Hirn-Schranke, Verhalten, Physiologie, Hitzeschock-Proteine und Zellüberlebensrate/Zellteilung (ein vergleichsweise aktuelles Themengebiet: knapp die Hälfte der hierzu zählenden 16 Studien entstammen der Zeitspanne 2000-2005) lassen aufgrund der bisher geringen Anzahl an Studien pro Thema und/oder fehlender Reproduktion von Ergebnissen durch andere Forschergruppen bzw. aufgrund der großen Variabilität der Expositionsparameter und der biologischen Parameter keine konkreten Schlüsse zu. Vor diesem Hintergrund dürfen die **Abb. 9 und 10** nicht überinterpretiert werden. Für konkretere Schlüsse wäre weitere gezielte Forschung erforderlich.

Studien an Menschen (n=24) wurden überwiegend unter Mobilfunkfrequenzen durchgeführt, „GSM-ähnlich“ moduliert, bei Expositionen unterhalb oder im Bereich der Grenzwerte. 18 der 24 Studien wurden nach dem Jahr 2000 publiziert. In 70 % der 24 Studien wurde keine unterschiedliche Wirkung von CW und PW und meist auch keinerlei biologischer Effekt beobachtet. Wenn jedoch ein Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen beobachtet wurde, dann wurde auch hier der Effekt überwiegend durch PW ausgelöst oder verstärkt und nicht durch CW. Die Körpersysteme Immunsystem (n=11; Roberts 1987; Czarska 1992; Maes 2001; Cranfield 2001; McNamee 2002, 2003; Zeni 2002, 2003; Capri 2004; Lim 2005; Simko 2006) sowie das Nervensystem (n=4; Bise 1978, Miryutova 2001, Huber 2002, 2005) wurden am häufigsten untersucht. Im Rahmen des Immunsystems wurden Leukozyten (weiße Blutkörperchen) hinsichtlich verschiedener Parameter wie z. B. der Zellteilung, cytogenetischer Schäden in Form von Chromosomenschäden oder vermehrtem Auftreten von Mikronuclei, intrazellulärer Kalziumkonzentration etc. untersucht. Das Immunsystem („in vitro“-Studien) wurde deutlich weniger häufig durch EMF beeinflusst als das menschliche Nervensystem („in vivo“-Studien).

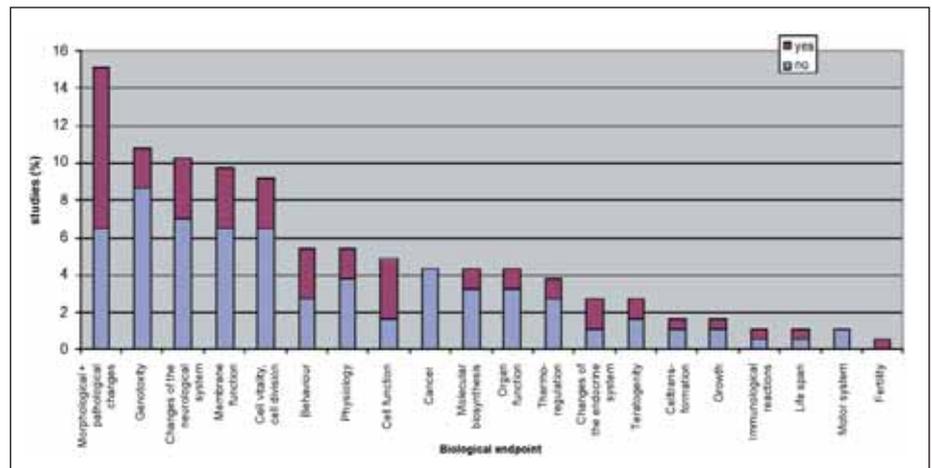


Abb. 9: Anteil der Publikationen (in % von allen 163) mit und ohne („yes“/„no“) gemessenem Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen in Abhängigkeit vom biologischen Endpunkt.

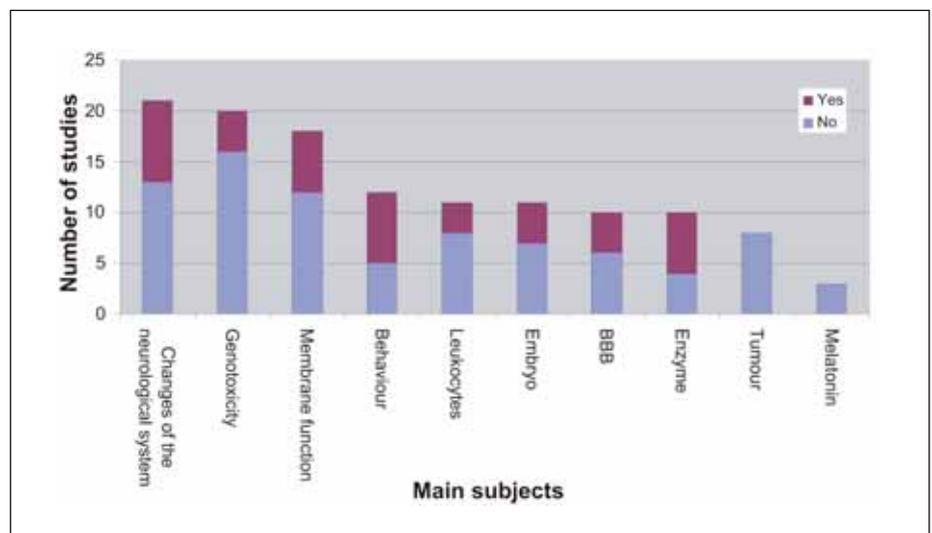


Abb. 10: Anteil der Publikationen (in % von allen 163) mit und ohne („yes“/„no“) gemessenem Effektunterschied zwischen CW- und PW-Bedingungen in Abhängigkeit von den biologischen Themen (vgl. S. 96).

Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Generell:

- Große Vielfalt an Untersuchungsmethoden, Untersuchungsobjekten und experimentellen Designs, damit erschwerte Vergleichbarkeit.
- Niedriger Prozentsatz höher relevanter Studien (29 %).
- Unterschiedliche Effekte unter CW- und PW-Bedingungen in 36 % aller betrachteter Studien
 - In 65 % der Studien, die einen unterschiedlichen Effekt zwischen CW und PW beschrieben, wurde der Effekt durch PW ausgelöst oder verstärkt und nicht durch CW.
- Unterschiedliche Effekte unter CW- und PW-Bedingungen meist bei akuter Exposition und häufiger bei ungleichem Energieeintrag.

- Langzeitexperimente oder mehrere Generationen umfassende Experimente vergleichsweise selten.
- Unterschiedliche Effekte unter CW- und PW-Bedingungen 3 mal häufiger in Europa als in den USA.

Biologische Aspekte:

- Einzelne Parameter, die speziell sensitiv und dabei unterschiedlich gegenüber der CW- oder PW-Bedingung reagieren, wurden nicht ermittelt.
- Die gepulste Eigenschaft der Felder führt nicht zu mutagenen oder karzinogenen Veränderungen (z. B. Santini 1988, Devyatkov 2001, Zook 2001, Zeni 2003, Lagroye 2004, Koatsubara 2005).
- Wenn überhaupt, kann eine gewisse Sensitivität gegenüber der Modulation elektromagnetischer Felder bei elektrischer Hirnaktivität (Vorobév 1994, Sidorenko 1999, Konovalov 2001, Huber

2002, 2005) sowie Blut-Hirn-Schranken- (Salford 1997) und Enzymfunktionen (Sanders 1985, Somosy 1994, Penafiel 1997) festgestellt werden. Die entsprechenden Studien müssten allerdings unabhängig bestätigt werden.

- Nur eine geringe Anzahl von Publikationen oder widersprüchliche Resultate liegen für den Rest der analysierten biologischen Themen (Melatonin, Verhalten, Leukozyten, etc.) vor.
- Am häufigsten wurde die Modulationsfrequenz 16 Hz in Verbindung mit einem CW-PW-Effektunterschied genannt (Sanders 1985, Somosy 1991, 1993, 1994; Roberts 1987, Bol'shakov 2001, 2002, Iurinskaia 1996, Persson 1997, Penafiel 1997, Konovalov 2001). Allerdings ist die Datenbasis zu schmal und methodisch zu heterogen, um weitergehende Schlussfolgerungen hieraus ziehen zu können.

Auf Grundlage der vorliegenden Daten entsteht der Eindruck, dass allein die Pulsung von hochfrequenten EMF durchaus eine Wirkung auf verschiedene Zellen und Organismen (Pflanzen, Einzeller, Schnecken, Vögel, Säugetiere, Menschen) haben kann. Dies ist jedoch nur in der Minderzahl der analysierten Untersuchungen der Fall. Auf Grund der äußerst breit gefächerten und stark diversifizierten Forschung können die dokumentierten Wirkungen anhand der Literatur nicht näher spezifiziert werden. Schwerpunkte können nicht klar ausgemacht werden. Leider gibt es keine Reproduktion von Ergebnissen an den gleichen Objekten und unter vergleichbaren Bedingungen, damit fehlt eine wesentliche Voraussetzung für eine Aussage in wissenschaftlicher Qualität.

Zur wissenschaftlichen Aussagekraft dieses Beitrags:

Alle in der vorliegenden Analyse getroffenen Aussagen müssen unter der deutlichen Einschränkung betrachtet werden,

- dass nur (erweiterte) Abstracts als Grundlage dienen und
- dass die unter bestimmten Blickwinkeln durchgeführten Auswertungen wegen der stark diversifizierten EMF-Forschung nur auf einer relativ kleinen Anzahl vergleichbarer Studien beruhen. Gruppen von Publikationen, die auch nur ähnliche methodische Herangehensweisen, Objekte und Zielsetzungen erkennen lassen, sind kaum zu bilden. Die „Statistik“ in der vorliegenden Analyse ist daher unzureichend, die Suche nach gewissen Häufungen von Befunden nur von geringem Erfolg. Diese Aspekte hätten allerdings auch bei der Betrachtung der Originalpublikationen anstelle der Abstracts keine bessere abschließende Beurteilung ermöglicht.

3.2.2 Mechanismen der Einwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme, Zusammenfassung von Workshops und Seminaren

Lutz Haberland

Die grundsätzlichen Probleme, wie hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) auf den Menschen und andere biologische Systeme wirken können, wurden bereits im Abschnitt 3.1.2 behandelt. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick zu Inhalten und Ergebnissen von Workshops und Seminaren zum Thema Mechanismen, die in den letzten sieben Jahren stattfanden und von der Forschungsgemeinschaft Funk (FGF), dem Mobile Manufactures Forum (MMF) oder/und der Europäischen Forschungsinitiative COST 281 organisiert wurden.

Vorausgehend zu diesen Veranstaltungen hatte die FGF bereits 1996 eine Literaturstudie initiiert, die den damaligen Stand der Mechanismen-Vorstellungen zusammenfasst (Haberland 1999).

Workshops und Seminare zum Thema Mechanismen

Jahre 2000 – 2006

- 1. Biological and Biophysical Research at Extremely Low- and Radio-Frequencies:**
(1) Application of Research Results across the Frequencies and Modulation Schemes of Present and Future Wireless Technologies, and
(2) Demodulation in Biological Systems
Bad Münstereifel, Germany, 4th – 5th December 2000 (FGF)
- 2. Mechanisms for Interactions of Radiofrequency Energy with Biological Systems**
Washington, D.C., USA, 22nd – 23rd May 2001 (MMF)
- 3. Physical Effects of Pulsed RF Fields at Microscopic and Molecular Dimensions (Microdosimetry)**
Dresden, Germany, 17th – 19th December 2001 (FGF)
- 4. Review of Progress in Research on Interaction Mechanisms for RF Energy and Biological Systems**
Rockville, USA, 30th – 31st October 2002 (MMF)
- 5. Subtle Temperature effects of RF-EMF**
London, UK, 12th – 13th November 2002 (COST 281)
- 6. Quantifying Biophysical Mechanisms for RF Interactions**
Plantation, Florida, USA, 22nd – 23rd March 2004 (MMF)
- 7. Do sinusoidal versus non-sinusoidal waveforms make a difference?**
Zurich, Switzerland, 17th – 18th February 2005 (COST 281)
- 8. Subtle Thermal Effects of RF-Fields *in vitro* and *in vivo***
Stuttgart, Germany, 21st – 23rd November 2005 (FGF)
- 9. Proposed Mechanisms for the Interaction of RF-Signals with Living Matter – Demodulation in Biological Systems**
Rostock, Germany, 11th – 13th September 2006 (FGF)

In den insgesamt neun Veranstaltungen diskutierten Experten aus Europa und Nordamerika die neuesten Forschungsergebnisse einschließlich eigener Projekte. Dabei ging es im Besonderen um die Übertragbarkeit von biologischen Forschungsergebnissen auf andere Frequenzbereiche und Modulationen sowie um die grundsätzliche Frage, ob und wie Demodulationen möglich sind und mit welchen Besonderheiten man auf mikroskopischer Ebene rechnen muss.

Die spezifischen Wirkungen gepulster und anderweitig modulierter Hochfrequenzfelder wurden in fast allen Veranstaltungen behandelt. Dabei muss unterschieden werden zwischen einer elektrischen Demodulation, bei der im biologischen System wieder ein niederfrequentes Feld entsteht, und einer thermischen oder sonstigen biologischen Demodulation, bei der die niederfrequente Modulation z. B. als periodische Temperaturerhöhung sichtbar wird (siehe Abschnitt 3.1.3).

Die Teilnehmer der Workshops waren sich dahingehend einig, dass:

- das Konzept der elektrischen Demodulation im biologischen System bisher weder von einer vertretbaren Theorie noch von experimentellen Beweisen gestützt wird,
- die Spezifische Absorptionsrate (SAR: absorbierte Strahlungsintensität pro Masse Gewebe) die wesentliche dosimetrische Messgröße ist, **nicht** spezielle Modulationscharakteristika,

- die thermische Demodulation – insbesondere in ihrer Form des „Mikrowellen-Höreffektes“ – in den geltenden Sicherheitsgrenzwerten ausreichend berücksichtigt wird und
- weitere Forschung in diesem Gebiet notwendig ist, da biologische Demodulationsmechanismen nicht ausgeschlossen werden können und grundsätzliche Wissenslücken bestehen.

Die allgemeine Wirkung hochfrequenter Felder gilt hingegen als gut verstanden. Sie beruht auf der Kraftwirkung der Felder auf Ionen und Dipole im biologischen System. Aufgrund ihrer elektrischen Ladungen werden Ionen und Dipole durch die Felder in Bewegung versetzt bzw. zum Vibrieren gebracht. Sie stoßen öfter mit benachbarten Teilchen zusammen, was eine erhöhte Reibung bedeutet. Das Ergebnis ist letztendlich als Temperaturerhöhung sichtbar. Die Schwelle dieser Sichtbarkeit ist allerdings durch die zur Verfügung stehenden Messtechniken begrenzt.

Hypothesen zu anderen Wirkungsmechanismen bzw. zu speziellen thermischen Effekten, die in den Sicherheitsgrenzwerten keine Berücksichtigung finden (da sie als unbewiesen gelten oder anscheinend keine schädliche Wirkung im biologischen Gesamtsystem entfalten), gibt es hingegen eine Vielzahl. Sie lassen sich vorwiegend in die Gruppe der sogenannten mikrothermischen Wirkungen einordnen. Einige seien im folgenden kurz bezeichnet:

- Erhöhte Energieabsorption in mikroskopisch kleinen Gebieten erhöhter Leitfähigkeit: Dies können Schichten gebundenen Wassers an Membranen sein, aber auch spezielle Membranbereiche oder Magnetite (Magnetosomen) im biologischen Gewebe,
- Erhöhte Energieabsorption durch strukturelle Besonderheiten im mikroskopischen und Nano-Bereich: Dazu gibt es einige Experimente an künstlichen Membranen, mit Metallatomen verbundenen oder anderweitig modifizierten Makromolekülen sowie Wassertröpfchen in Ölsuspensionen. Für die beobachteten Effekte gibt es bislang keine erschöpfenden Erklärungsmodelle.

- Resonante Energieabsorption in Makromolekülen: Eine solche Wirkung gilt jedoch nach neuesten Modellrechnungen für Frequenzen kleiner 100 GHz als sehr unwahrscheinlich.

Diese Mechanismen werden als Erklärung für biologische Effekte dadurch in Frage gestellt, dass rein rechnerisch im Nanometer- und Mikrometerbereich durch schnelle Wärmeverteilung nur geringe Temperaturerhöhungen zu erwarten sind, so dass biologische Wirkungen auf die Umgebungsmoleküle als unwahrscheinlich gelten.

- Eine mögliche Ausnahme davon könnten Wirkungen auf molekulare Temperaturrezeptoren sein, da angenommen wird, dass sie einen speziellen Rauschunterdrückungsmechanismus vorweisen können.
- Andere Hypothesen beruhen auf stochastischer Resonanz, also der Zuhilfenahme des thermischen Rauschens zur Verstärkung spezifischer biologischer Prozesse, oder dem Einfluss auf Rezeptor-Liganden-Wechselwirkungen, wobei quantenmechanische Eigenschaften Berücksichtigung finden.

Diese und weitere Mechanismen wurden während der Workshops vorgestellt und diskutiert. Da bislang jedoch keine Beweise für deren biologische Wirksamkeit erbracht werden konnten, folgten auch keine konkreten Forschungsempfehlungen. Diese beziehen sich dagegen allgemein auf den Rahmen und die Zielsetzung weiterer Forschung:

- im Bereich der Mikrodosimetrie, um ein besseres Verständnis biologischer Prozesse und der Wärmeverteilung im Mikro- und Nanobereich zu erhalten,
- zu Demodulationsmechanismen, da ihre Existenz theoretisch nicht auszuschließen ist,
- zur theoretischen Abschätzung magnetischer Feldeffekte im HF-Bereich auf die Bildung von freien Radikalen, sowie
- zur Berücksichtigung multizellulärer und ultra-struktureller Analysen von inhomogenen und komplexen Eigenschaften im zellulären Bereich.

Für eine detailliertere Betrachtung sei auf die Berichte zu den einzelnen Workshops verwiesen.

Literatur:

Haberland, „Hypothesen zu zellulären, nichtthermischen Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder – Literaturstudie.“ 1999, Verlag für Wissenschaft und Forschung, ISBN: 978-3-89700-205-0

Glaser u.a., „Biologische und biophysikalische Forschung zu extremen Nieder- und Funkfrequenzen“, FGF-Newsletter 1/2001, <http://www.fgf.de/>

Gollnick, „Mechanismen für die Wechselwirkung hochfrequenter Energie mit biologischen Systemen“ in Washington, FGF-Newsletter 2/2001, <http://www.fgf.de/>

Sheppard und Glaser, „Physikalische Effekte gepulster HF-Felder, Mikrodosimetrie“ in Dresden, FGF-Newsletter 2-3/ 2002, <http://www.fgf.de/>

de Seze, COST 281 workshop on „Subtle Temperature Effects of RF-EMF“ in London, November 12-13, 2002, COST 281-Newsletter May 2003, <http://www.cost281.org/>

Glaser, Workshop in Ft. Lauderdale/Florida über „Biophysikalische Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder und deren Bedeutung“, FGF-Newsletter 2/2004, <http://www.fgf.de/>

Haberland, Bericht vom COST 281 Workshop: „Do sinusoidal versus non-sinusoidal waveforms make a difference?“, FGF-Newsletter 1/2005, <http://www.fgf.de/>

Glaser, „Gibt es eine Spezifik biologischer Wirkung gepulster Felder?“ (Kommentar zum Workshop), FGF-Newsletter 1/2005, <http://www.fgf.de/>

Glaser, „Gibt es „nicht-thermische“ Effekte schwacher HF-Felder?“ Bericht vom FGF-Workshop: „Subtle Thermal Effects of RF-Fields in vitro and in vivo“, FGF-Newsletter 1/2006, <http://www.fgf.de/>

Veyret, Bericht vom FGF-Workshop: „Vorgeschlagene Mechanismen für die Wechselwirkung hochfrequenter Felder mit lebender Materie – Demodulation in biologischen Systemen“, FGF-Newsletter 4/2006, <http://www.fgf.de/>

3.3 Gezielte Nutzung gepulster Felder in der Biologie

In den bisherigen Abschnitten ging es immer um die technische Anwendung gepulster Signale und deren mögliche biologische Nebenwirkungen mit der Intention, biologische Wirkungen zu vermeiden. Wenn man jedoch von der Existenz biologischer Wirkungen der elektromagnetischen Felder (EMF) ausgeht, kann man versuchen, diese Wirkungen gezielt für gesundheitliche, d. h. therapeutische Zwecke einzusetzen. Ein Beispiel ist die nachfolgend beschriebene Stimulation von Knochenwachstum als Therapie bei Knochenbrüchen.

Wie der Beitrag zeigt, gibt es jedoch auch hier keine eindeutigen, abgeschlossenen Erkenntnisse über die Wirkungsweise der eingesetzten EMF, so dass je nach Sichtweise von bestätigtem Behandlungserfolg oder Placebo-Effekt gesprochen wird. Eine eindeutige Wirkung kann nur bei starken Feldern weit oberhalb der für den Menschen zugelassenen Feldstärken erklärt werden. Aus diesem Beispiel ist zweierlei abzuleiten, zum einen: Selbst wenn Wissenschaft und Medizintechnik es darauf anlegen, im Bereich zulässiger Exposition gezielt biologische Wirkungen

zu erzeugen, gelingt dies – zumindest in diesem Beispiel – weder mit gepulsten noch kontinuierlichen EMF in zuverlässiger wissenschaftlicher Qualität, d. h. eindeutig und nachvollziehbar. Zum anderen gibt es auch hier Erklärungsansätze über Wirkungsweisen, zu denen zu prüfen wäre, ob sie auch als ungewollte Nebenwirkung bei nicht-therapeutischer Exposition wie Mobilfunk entstehen könnten.

3.3.1 Gepulste Felder zur Therapie von Knochen und Gelenken – sind die derzeit verwendeten Geräte wirksam?

Roland Glaser

Schon mehr als zwei Jahrhunderte richten sich die Hoffnungen von Patienten und Ärzten auf eine erfolgreiche Therapie durch die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder und leider auch von einer großen Schar von Scharlatanen auf entsprechende Gewinne. Obgleich die ersten Versuche in früher Zeit hauptsächlich der Heilung von Erkrankungen wie Kopfschmerzen, Krämpfen, Epilepsie etc. galten, sind bereits im 19. Jahrhundert Bemühungen bekannt, elektrische Felder zur Beschleunigung der Heilung von Knochenbrüchen einzusetzen. Diese offenbar nicht sehr erfolgreichen Versuche gerieten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mehr und mehr in Vergessenheit.

Nun bieten viele Firmen der Medizintechnik Geräte zur Stimulation des Knochenwachstums an. Seit 1979 ist dieses Verfahren in den USA zugelassen; an Hunderttausenden von Patienten wurde es bisher erprobt. Doch: ist es mehr als eine Placebo-Therapie? Obgleich diesem Verfahren ein vernünftiger Gedanke zugrunde liegt, konnte diese Hypothese bisher experimentell nicht verifiziert werden.

Zwar macht der Beitrag deutlich, dass die Bemühungen, das Knochenwachstum durch elektrische Felder künstlich zu beeinflussen, durchaus erfolgversprechend sein könnten. Selbst wenn sich diverse Hypothesen und Versuche als unzutreffend erweisen, so könnte ein elektrisches Feld Strömungen induzieren und damit in den Prozess der Regulation des Knochenwachstums und der Knochenregeneration eingreifen. Voraussetzung dafür wäre allerdings, dass die elektrischen Parameter der Therapiegeräte tatsächlich geeignet wären, dies zu vollbringen.

Die Yasuda-Hypothese als theoretische Grundlage der elektrischen Knochen-therapie

In den vergangenen 50 Jahren ist die Hoffnung wieder aufgelebt, mit Hilfe elektrischer Felder auf den Prozess der Knochenregeneration Einfluss nehmen zu können. Der Grund dafür war der Nachweis piezoelektrischer Eigenschaften des Knochens durch den Japaner I. Yasuda (1953). Später stellte man fest, dass diese Eigenschaft noch weitgehend überlagert wird durch Strömungspotentiale, die im frischen Knochen bei geringen Verformungen infolge funktioneller Belastung entstehen (Maroudas 1968, Starkebaum et al. 1979). Man konnte solche Potentiale, die im Rhythmus des Laufens schwanken, auch am lebenden Hund nachweisen (Cochran et al. 1968).

Piezoelektrizität beruht bekanntlich auf der Verschiebung von Ladungen in Kristallen oder kristallähnlichen Makromolekülen. Im Knochen sind überraschenderweise nicht die anorganischen Bestandteile für dieses Verhalten verantwortlich, sondern die Proteine, speziell die Kollagen-Moleküle. Strömungspotentiale entstehen hingegen, wenn eine Salzlösung durch enge Kapillare gepresst wird, deren

Wände fixierte Ladungen tragen. Dies könnte in den nur wenige Mikrometer dünnen Knochenkanälchen erfolgen, beziehungsweise in den Spalten, die zwischen den darin befindlichen Fortsätzen der Osteozyten und der Kanalwand noch frei bleiben. Jede Druck-Spannungs-Verformung des Knochens führt zu einer Strömung in diesen Kanälchen und damit zum Auftreten von geringen elektrischen Potentialdifferenzen dieser Art.

Allerdings wurden auch elektrische Spannungen am unbelasteten Knochen gemessen. So stellten Friedenberg und Brighton bereits 1966 fest, dass Potentialdifferenzen zwischen verschiedenen Bereichen des lebenden Knochens auftreten. Das elektrische Potential erreicht ein Maximum an der Epiphyse, dem Wachstumsende des Knochens, im Vergleich zur Umgebung, fällt bereits wenige Zentimeter davon auf negative Werte ab, steigt bei ca. 4-5 cm wieder gegen 0 und wird hin zur Diaphyse, dem nicht wachsenden Mittelteil, positiv. Die Absolutwerte dieser Potentiale betragen *in vivo* zwischen -20 mV bis $+15$ mV, sinken jedoch bereits nach 10 Minuten *post mortem* ab und sind nach 50 Minuten fast verschwunden. Ein Knochenbruch ergibt unmittelbar da-

nach einen Potentialabfall auf ca. -25 mV. Die Autoren halten diese elektrische Struktur für das Resultat verschiedenster Stoffwechselaktivitäten der lebenden Zellen.

Diese Erkenntnisse zusammengenommen führten zu einer Vorstellung über den Mechanismus des Knochenwachstums, der möglicherweise dem so genannten Wolff'schen Gesetz zugrunde liegen könnte. Letzteres wurde im Jahre 1892 von dem Berliner Chirurgen Julius Wolff als „Gesetz der Transformation der Knochen“ formuliert (Wolff 1892). Wolff kam auf Grund eines Vergleiches von Knochen Gesunder und Kranker zu dem Schluss, dass eine Beziehung bestehen müsse zwischen der mechanischen Belastung des Knochens und seinem Wachstum. Der Knochen, so postulierte er, nimmt an Festigkeit zu, wenn er belastet wird, und baut ab, wenn die Beanspruchung fehlt. Diese Wirkung setzt sich im mikroskopischen Maßstab fort und führt letztlich zu einer der Belastung optimal angepassten Struktur der Knochenbälkchen (**Abb. 1**).

Könnte es nicht sein, dass direkt oder indirekt sowohl die permanenten als auch

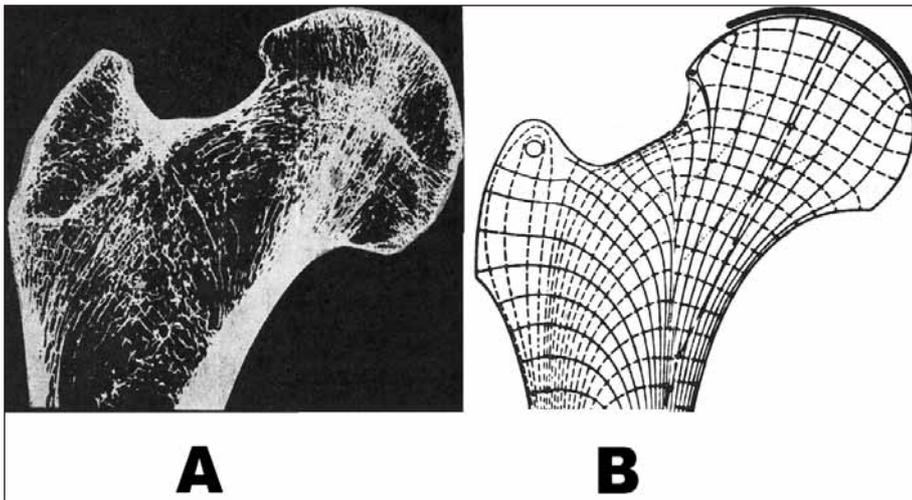


Abb.1: Dünnschnitt durch das menschliche Hüftgelenk (A) und Konstruktion der Druck- und Spannungstrajektorien der durchschnittlichen Belastung. Die Korrespondenz beider Linien bilden die Grundlagen des Wolff'schen Gesetzes (Nach Glaser 1989)

die durch Belastung entstehenden elektrischen Felder das Wachstum der Knochen und auch deren Reparatur nach Verletzung steuern? Weisen nicht die Potential-Differenzen an der Stelle des Knochenbruches auf die Rolle elektrischer Felder beim Heilungsprozess hin? Ist vielleicht das Fehlen dieser Potentiale Ursache für nicht-heilende Knochenbrüche, die zu Pseudoarthrosen führen? Lässt sich so auch die Degeneration von Knochenstrukturen bei längerem Aufenthalt des Menschen in der Schwerelosigkeit erklären?

Diese als „Yasuda-Hypothese“ in die Literatur eingegangene Vorstellung war Ursache für den neuen Aufschwung der Versuche in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, Knochenbrüche, Pseudoarthrosen, Knorpelschwund in den Gelenken, Wirbelschäden usw. mit Elektrotherapie zu behandeln. Wenn belastungsbedingte elektrische Felder das Knochenwachstum *in vivo* beeinflussen, warum sollten nicht künstlich erzeugte Felder und Ströme Ähnliches bewirken?

Trotz intensiver Forschung und Einsatz kommerzieller Therapiegeräte ist deren Effektivität bisher zweifelhaft

Seitdem ist diese Hypothese Gegenstand von experimentellen und klinischen Untersuchungen, die in vielen Hunderten wissenschaftlicher Publikationen niedergelegt sind. In den USA wurde diese Therapie bereits im Jahre 1979 durch die dort zuständige „Food and Drug Administration“ zugelassen, obgleich weiterer Nachweis ihrer Wirksamkeit nachdrück-

lich gefordert wurde. Seitdem produzieren zahlreiche Firmen Geräte, die zum therapeutischen Einsatz empfohlen und in vielen Arztpraxen auch routinemäßig eingesetzt werden.

Ist das Problem dadurch inzwischen gelöst? Ist die Methode in der klinischen Praxis etabliert? Den Reklameschriften der entsprechenden Firmen nach scheint dies so zu sein. Bassett spricht bereits im Jahre 1989 von mehr als 100.000 Patienten mit nicht-heilenden Frakturen, Pseudoarthrosen, Osteonecrose und Sehnenentzündungen, die in den Genuss dieser Therapie gekommen seien (Bassett 1989). Müsste die praktische Erfahrung mit dieser enormen Anzahl von Patienten nicht inzwischen tatsächlich zu einer Klärung des Problems geführt haben?

Leider ist dies keineswegs der Fall. Betrachtet man neuere Metastudien, also Versuche, die die publizierten Therapie-Erfolge wertend zusammenzufassen, so wird die Spaltung deutlich in solche Autoren, deren Herz offenbar optimistisch forschend an dem Erfolg dieser Methode hängt, oder die sogar auf diese oder jene Weise den Produzenten der Therapiegeräte nahe stehen, und auf der anderen Seite von um Objektivität bemühten „Außenseitern“, die sich formal auf Regeln berufen, die zum sauberen Nachweis eines therapeutischen Erfolges gehören. Zu den Normen für eine zuverlässige Studie zählt z.B. eine genügend große Patientengruppe, die Verblindung der Experimente, ein korrektes Auswahlverfahren der Patienten, eine klare Voraus-

Definition des Therapiezieles, die Berücksichtigung von Fällen des Therapie-Abbruches, die klare Darstellung der Behandlungs-Parameter, die Anwendung korrekter statistischer Verfahren u.a.m.

Eine italienische Gruppe aus der Universität Pisa fasste kürzlich Behandlungserfolge zur Knorpel-Regeneration bei Osteoarthritis zusammen. Die Forscher behaupten, die Behandlung mit pulsierenden elektromagnetischen Feldern (PEMF) beruhe auf einer großen Zahl wohl-dokumentierter physiologischer Effekte, einschließlich der Hochregulation der Expression verschiedener Wachstumsproteine (TGFβ-Proteine), wobei sie sich vorwiegend auf eigene Publikationen beziehen. Sie kommen zu dem Schluss, dass auf Grund experimenteller und klinischer Studien die PEMF-Behandlung eine vielversprechende chondroprotektive Therapie sei (Fini et al. 2005). Ähnlich optimistisch äußert sich James Ryaby, der sich als Mitarbeiter und Aktien-Inhaber der OrthoLogic Gesellschaft zu erkennen gibt, einer Firma für kommerzielle Therapiegeräte. Im Gegensatz zu der PEMF-Anwendung bei der Beeinflussung von Muskel-Skelett-Problemen sowie Verletzungen von Sehnen, Knorpelgewebe und Osteoarthritis, bei welcher die Anwendungen noch keine klinische Akzeptanz erreicht hätten, hält er die Erfolge der Anwendung bei Knochenbrüchen, inkl. Wirbelschäden, durch inzwischen erfolgte Doppel-Blind-Tests für bestätigt. Dabei unterstreicht er, dass die Kritiker bei der Methodik dieser Studien wesentlich strengere Kriterien ansetzen würden, als dies bei etablierten chirurgischen Verfahren üblich sei (Ryaby 1998). Oishi und Onesti (2000) gehen davon aus, dass bei normalen Knochen die Elektrotherapie als effektiv bewiesen sei, bei Behandlung von Wirbelschäden jedoch noch Unsicherheit bestünde. Die biophysikalischen Mechanismen, die diesen Verfahren zu Grunde liegen, halten diese Autoren noch für unbekannt.

Wesentlich skeptischer ist hingegen eine Reihe anderer Autoren. So befassen sich zwei japanische Metastudien einmal mit dem Einfluss der PEMF-Behandlung auf das Muskel-Skelett-System, zum anderen auf die Therapie von Wirbelfrakturen. Sie kommen zu dem Schluss, dass nur wenige der publizierten Untersuchungen den erforderlichen RCT-Parametern („Randomized Controlled Trials“) entsprechen. In der

ersten Studie (Akai und Hayashi 2002) berichten die Autoren, dass sie lediglich 20 verwertbare klinische Untersuchungen zur Knochenheilung finden konnten und 29 Arbeiten, die sich auf die Beeinflussung von Knorpel und Weichgewebe beziehen. Doch selbst diese Studien erreichten genau genommen nicht die heute geforderten methodischen Standards für klinische Tests. Obgleich die Mehrzahl der Autoren über Therapieerfolge berichten, sei wegen dieser Probleme dennoch Skepsis angesagt. Akai und Hayashi betrachten folglich die bisherigen Untersuchungen als nicht ausreichend um die Wirksamkeit der PEMF-Therapie tatsächlich zu belegen. Zur Therapie von Wirbelschäden fanden Akai et al. (2002) 10 Publikationen, die eventuell für eine Meta-studie geeignet wären. Die Zusammenfassung der Resultate wird allerdings dadurch erschwert, dass jeweils sehr unterschiedliche Applikationsarten verwendet wurden. Zum Teil handelte es sich um eine Stimulation mit implantierten Elektroden, wobei Ströme unterschiedlicher Art und Stärke (0,01 bis 10 mA) appliziert wurden, zum Teil benutzte man pulsierende Magnetfelder unterschiedlicher Art durch Spulen, die von außen aufgelegt wurden. Die Autoren äußern sich vorsichtig und schließen, dass trotz methodischer Probleme die statistische Signifikanz einiger Untersuchungen nicht ignoriert werden dürfe.

Eine Gruppe der Universität Baltimore (Chao et al. 2004) stellt in einer Übersicht über verschiedene Methoden der Knochenheilung fest, die Erfolge seien trotz 60-jähriger, z.T. enttäuschender Forschung und 30 Jahren klinischen Einsatzes der PEMF-Methode immer noch zweifelhaft. Der Einsatz würde im wesentlichen gestützt durch die medizintechnische Industrie und in unterschiedlichem Maße auch durch die Lobby der Orthopäden. Dabei hätten die Designer der Geräte es jedenfalls sowohl versäumt, optimale Parameter der Behandlung zu finden, als auch die Applikatoren so zu gestalten, dass sie einen gezielten Einsatz ohne Beeinträchtigung umliegender Gewebes ermöglichen.

Vor einigen Jahren hat die Universität Aachen eine Metastudie durchgeführt, und dabei 37 Publikationen verwertet, welche klinische Erfahrungen an insgesamt 3379 Patienten einschließen. Es

wurden Therapien berücksichtigt, die als PEMF, PST (Pulsierende Signaltherapie), oder MBST (MultiBioSignal-Therapie) bezeichnet wurden. Die Autoren dieser Übersicht kommen zu dem Schluss, dass der Einsatz von pulsierenden elektromagnetischen Feldern bei orthopädischen Krankheitsbildern bislang wissenschaftlich nicht sicher belegt ist (Schmidt-Rohlfing et al. 2000).

**Das Problem der Optimierung:
Wie erzeuge ich den richtigen Strom an einer Stelle, die jedoch bisher nicht bekannt ist?**

Neben der Problematik ungenügender Patientenzahlen, ungenau definierter Therapieerfolge, fehlender Verblindung etc. scheint das Hauptproblem bei der Bewertung der PEMF-Behandlung die Unvergleichbarkeit der Untersuchungen zu sein, da bezüglich Applikationsart, Puls-Charakteristik, Intensität etc. eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Verfahren eingesetzt wird. Selbst wenn die Yasuda-Hypothese stimmt, wenn die gemessenen Felder in belasteten und verletzten Knochen nicht einfach bedeutungslose Folgen elektrochemischer und elektrophysiologischer Prozesse sind, sondern tatsächlich aktive Parameter eines Regelprozesses, so wäre ein künstlicher Eingriff in dieses Regelsystem nur dann möglich, wenn es gelingen würde Feldstärken oder Stromdichten am Ort der Wirkung zu erzeugen, die in Stärke und Art die physiologischen Parameter modifizieren könnten. Tatsächlich ist dieser Ort, oder sind diese Orte jedoch bisher weitgehend unbekannt. Die *in vivo* bei Belastung auftretenden elektrischen

Parameter sind außen am Knochen gemessen und müssen durchaus nicht identisch sein mit denen am Ort ihrer Entstehung oder Wirkung. Doch selbst wenn man diese Problematik, weil zunächst ungelöst, aus pragmatischen Gründen ausklammert und davon ausgeht, dass elektrische Ströme zu applizieren seien, die in etwa denen gleichen, die am Knochen gemessen wurden, ergeben sich einige Probleme.

Die beste und übersichtlichste Dosierung würde natürlich die Einführung des Stroms durch Elektroden ermöglichen (Abb. 2 A). So wurden, zum Teil im Tierexperiment (Marino et al. 1981, Forgon et al. 1985, Sato und Akai 1989, Takei und Akai 1993) aber auch im klinischen Einsatz (Friedenberg und Kohanim 1968, Paterson et al. 1980, Kane 1988, Meril 1994), elektrische Felder durch Implantation von Elektroden eingeleitet. Spadaro (1997) berichtet sogar von Tierexperimenten, bei denen die Pulsierung dieser Ströme durch die Bewegung des Tieres gesteuert wurde. Die Problematik dieser Applikationsart liegt jedoch darin, dass an den Grenzflächen der Elektroden unliebsame Nebeneffekte auftreten. So wies Buch (1988) bereits darauf hin, dass ab einer Stromstärke von 30 μ A mit dem Absterben von Zellen, mit Nekrose, in Elektroden-Nähe zu rechnen ist.

Als Alternative bietet sich an, gepulste oder oszillierende Ströme kapazitiv einzubringen oder durch Induktion zu erzeugen (Abb. 2 B, C). Dies ist die heute am meisten praktizierte Art, wobei im ersten

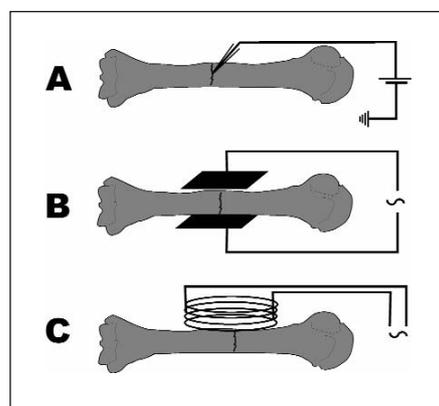


Abb. 2: Verschiedene Arten praktizierter Elektrotherapie des Knochens:

- A – Einleitung eines Gleichstroms durch implantierte Elektroden
- B – kapazitive Einkopplung und
- C – induktive Einkopplung von Wechselströmen.

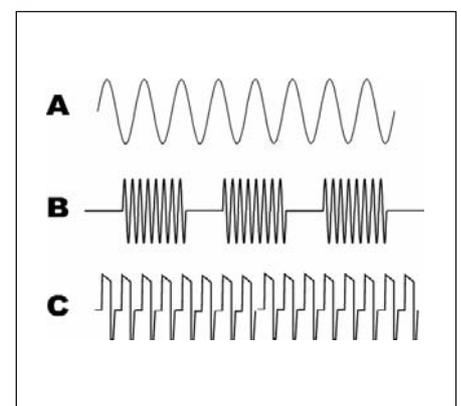


Abb. 3: In der Praxis der Elektrotherapie werden verschiedene Ströme verwendet:

- A – kontinuierliche niederfrequente Schwingungen
- B – Pulsierende Ströme, Wellen- oder Puls-Pakete (Bursts)
- C – Pulse unterschiedlicher Form.

Falle Metallplatten, im zweiten Fall Spulen von außen aufgelegt werden. Gleichzeitig kompliziert sich die o.g. Problematik jedoch noch wesentlich dadurch, dass nicht nur die Übertragung des applizierten Felds oder Stroms an den Ort der Wirkung unbekannt ist, sondern darüber hinaus noch Verlauf und Intensität der induzierten Ströme überhaupt. Verwendet man sinusförmige Wechselströme an den Kondensatorplatten oder Spulen, sei es kontinuierlich, sei es als Pakete („bursts“) pulsformig gesendet, so ist im einfachsten Falle immerhin noch von einer Cosinus-Welle gleicher Frequenz auszugehen, die im Gewebe induziert wird, auch wenn deren Amplitude von vielen unbekannt dielektrischen und geometrischen Parametern abhängt. Schwieriger wird es, wenn Pulse unterschiedlichster Form gesendet werden, deren Anstiegsflanken zum Teil sehr steil sind (**Abb. 3**). Selten werden bei Knochenstimulatoren industrieller Produktion die Form der Pulse angegeben; eine schlüssige Begründung experimenteller oder theoretischer Art für die spezielle Wahl dieser Pulse ist den Prospekten in der Regel nicht zu entnehmen. Dies genau ist die oben genannte, von Chao et al. (2004) formulierte Kritik fehlender biophysikalischer Optimierung in den industriell produzierten Applikatoren.

Viele biochemische Mechanismen der Knochenstimulation sind denkbar, doch wo greifen die elektrischen Felder an?

Natürlich ist dieses Problem nur zu lösen, wenn man dem biophysikalischen Primär-Mechanismus tatsächlich etwas näher kommt. Über solche Mechanismen wird viel diskutiert. So postulieren Brighton et al. (2001), dass bei kapazitiver Kopplung der Felder spannungsabhängige Kalzium-Kanäle in der Zellmembran aktiviert werden, bei induktiver Kopplung hingegen Kalzium-Speicher im Inneren der Zelle. Beides würde zu einem Konzentrationsanstieg in der Zelle führen und somit in ein gemeinsames Signalsystem einmünden, welches letztlich das Knochenwachstum beeinflussen könnte. Eine ähnliche Vorstellung haben auch Aaron et al. (2004).

Grundlage dieser Hypothese ist die Überlegung, wonach ein im Gewebe erzeugtes elektrisches Feld, wie im Falle kapazitiver Kopplung, die Membran zwar polarisieren, nicht jedoch in die Zelle eindringen

kann. Ein wechselndes Magnetfeld hingegen erzeugt auch im Inneren der Zelle Wirbelströme, könnte dadurch also die membranumgebenen Kalzium-Speicher dort beeinflussen. Diese Überlegungen sind qualitativ richtig, halten jedoch keiner quantitativen Abschätzung stand. Brighton et al (2001) führten Experimente an Osteoblasten durch, Zellen eines Knochenkrebses, die sich leicht züchten lassen. Sie stützen ihre Theorie, indem sie die gemessenen Effekte durch Hemmstoffe für spezifische Reaktionsstufen in dieser Signalkette modifizierten. Fragwürdig, vom biophysikalischen Standpunkt aus, ist jedoch die Auslösung dieser Effekte durch die applizierten Felder. Bei der von ihm eingesetzten kapazitiven Methode, berechnet er in der Petrischale eine elektrische Feld-Amplitude von maximal 2 V/m. Daraus lässt sich leicht abschätzen, dass dies zu einer Beeinflussung des Membranpotentials der Zellen führt, welches etwa einem Tausendstel des natürlichen Wertes entspricht. Zweifel sind angebracht, ob dieser Wert, der noch unterhalb des natürlichen Rauschpegels liegt, ausreicht, die Kalzium-Kanäle der Membran zu beeinflussen. Völlig illusorisch ist es darüber hinaus anzunehmen, durch ein niederfrequent gepulstes Magnetfeld von 2 mT könnten im Inneren einer Zelle, einem Stromkreis mit einem maximalen Radius in der Größenordnung von 10 µm, Wirbelströme erzeugt werden, welche in der Lage wären, die Kalzium-Speicher zu öffnen. Aaron et al. (2004) sehen dies offenbar ähnlich, bauen jedoch auf andere, bisher unbekannte Anregungsmodelle.

Da diese Primär-Reaktionen ungeklärt sind, konzentriert man sich unter der Rubrik „Mechanismen“ in den Publikationen immer wieder ausführlich auf Darstellungen biochemischer Signalkaskaden, die durchaus logisch nachvollziehbar sind. Der entscheidende Punkt jedoch, nämlich die Frage nach der Auslösung dieser Kaskaden durch den elektrischen Puls, wird regelmäßig ausgeklammert. Einig ist man sich offenbar nur darin, dass das Magnetfeld lediglich indirekt auf dem Wege durch Induktionseffekte wirksam werden kann. Trotzdem fragt man sich, warum die Firma OrthoLogic (Phoenix, Arizona, USA) Spulenpaare produziert, die neben einem gepulsten Sinus-Feld (76,6 Hz, 37 µT) noch ein statisches Feld von 34 µT appliziert (Brighton et al. 2001).

Sieht man davon ab, dass diese Feldstärke noch um das 50-fache geringer ist als die oben schon als kritisch betrachteten 2 mT, so fragt man sich außerdem: was soll zusätzlich ein statisches Feld einer Intensität, welche dem des natürlichen Erdmagnetfelds entspricht?

Wo liegt das Problem der Forschung? Wie könnte man einer Optimierung der Methode näher kommen?

Postuliert man, die Yasuda-Hypothese sei prinzipiell richtig, dann könnten Misserfolge bisheriger Therapie-Bemühungen daran liegen, dass die wirksame Dosierung, sprich: Feldstärke am Ort der Wirkung, noch nicht gefunden wurde. Die derzeit angebotenen Therapiegeräte, setzt man das ehrliche Bemühen der Konstrukteure voraus, orientieren sich offenbar lediglich an physikalischen Induktionsgesetzen und Impedanzverhalten von Geweben bei recht oberflächlicher Modellierung des biophysikalischen Geschehens. Wenn man überhaupt etwas über Amplitude, Frequenz, Puls-Form, und -dauer dieser kommerziell angebotenen Applikatoren erfährt, dann wundert man sich über die Vielgestaltigkeit dieser Parameter je nach Firma und über die Behauptung erfolgter Optimierung, ohne dass diese Optimierungsprinzipien dargestellt wären.

Bedenkt man den Aufwand einer ordnungsgemäßen Patientenstudie, so erscheint es völlig illusorisch, eine Optimierung der Geräte auf dieser Basis von Trial-and-Error vorzunehmen. Es gibt inzwischen natürlich umfangreiche Untersuchungen an Zellkulturen und auch Experimente an Tieren, von Kleinsäugetern wie Mäusen und Ratten, bis hin zu Pferden, wobei letzteres allerdings auch einen praktischen veterinärmedizinischen Hintergrund hat. Wie alle Experimente, so sind auch diese jedoch nur dann sinnvoll und weiterführend, wenn ihnen eine entsprechende Arbeitshypothese zugrunde liegt. Zunächst sind die Fragen zu beantworten: wie sieht der natürliche Prozess der Wechselwirkung von Knochenbelastung und Knochenwachstum im Sinne der Wolff'schen Vorstellung überhaupt aus. Wo entstehen die elektrischen Felder, und an welcher Stelle, wenn überhaupt, könnten sie biochemische Signalkaskaden auslösen?

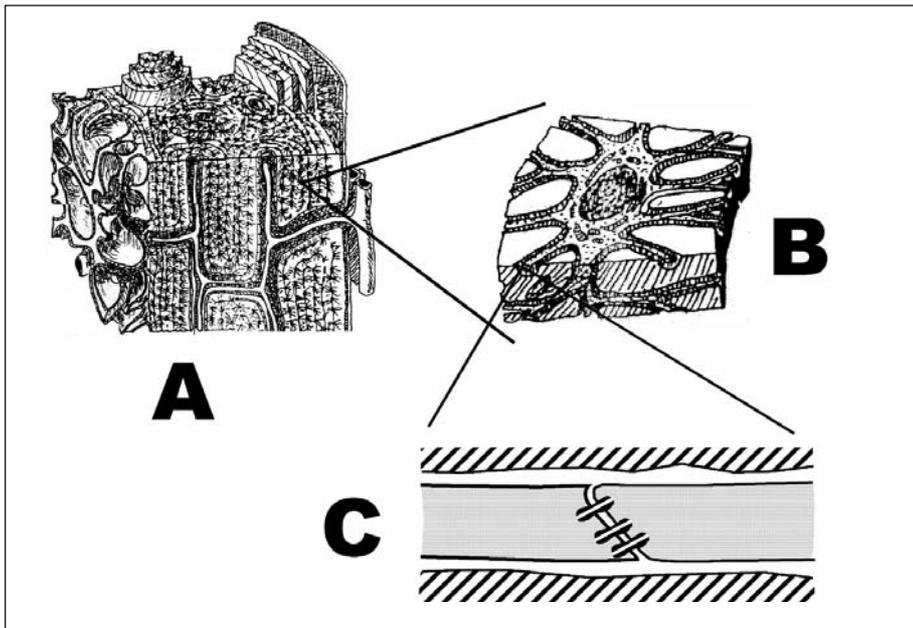


Abb. 4: Die Knochenstruktur in verschiedener Vergrößerung.

- A – Knochen mit Blutgefäßsystem und sternförmig gezeichneten Osteozyten;
 B – Osteozyt mit Fortsätzen in den Knochenkanälchen;
 C – Kontakt von Osteozyten-Fortsätzen in den Knochenkanälchen über Gap Junctions
 (A und B nach Zhang et al. 1997)

Ein kurzer Blick auf die Histologie des Knochens und die am Aufbau desselben wirkenden Zellarten ist hier erforderlich (Abb. 4).

Der Knochen befindet sich ebenso wie andere Gewebe des Körpers als dynamische Struktur in einem mehr oder weniger ausgewogenen Prozess ständigen Auf- und Abbaus. Daran sind prinzipiell drei Arten von Zellen beteiligt: Osteoclasten, Osteoblasten und Osteozyten. Die Osteoclasten als „Knochenfresser“ bauen ständig Knochenstrukturen ab. Diese werden durch die Osteoblasten wieder erneuert. Das Übermaß der Aktivitäten der ersteren führt zu Knochenschwund, das der zweiten zu einer pathologischen Verknöcherung. Ein gesunder Knochen erhält eine, optimal an die Belastung angepasste Struktur. Die Osteoblasten bauen also die mineralische Knochenstruktur auf, mauern sich damit quasi ein und leben als Osteozyten weiter im Inneren des Knochens. Jede dieser Zellen bildet bis zu 80 cm lange Fortsätze, die in den mikrometerdünnen Knochenkanälen vom zentralen Zellkörper aus nach allen Richtungen ausstrahlen. Am Ende kommen sie mit den Fortsätzen der Nachbarzellen in Kontakt. Über so genannte „Gap Junctions“, d. h. kanalbildende Membranproteine werden Wasser, Ionen und kleine Moleküle von einer Zelle zur anderen trans-

portiert. Damit bilden sie ein Netzwerk kommunizierender Zellen, dessen eigentliche Funktion bisher wenig bekannt ist. Natürlich haben die Gap Junctions auch eine bedeutende elektrische Leitfähigkeit, so dass dieses zelluläre Verbundsystem – elektrisch gesehen – ein kompliziertes RC-Netz darstellt und gleichzeitig eine ideale Antenne für mögliche Wirbelströme durch Magnetfelder von außen (Zhang et al. 1997).

Wir sprachen eingangs von den Strömungspotentialen im Knochen als eigentliche Ursache belastungsabhängiger elektrischer Felder. Diese entstehen nun eben in den Nanometer breiten Spalten, zwischen den Membranen der Zell-Fortsätze und den Kanalwänden (Abb. 4 C). Damit scheint dies der eigentliche Ort des primären Geschehens zu sein. Da die Osteozyten jedoch selbst keine Funktion beim Auf- und Abbau des Knochens mehr haben, könnten sie als Resultat einer Reizung höchstens Wirkstoffe ausscheiden, welche das Osteoblasten-Osteoclasten-System entsprechend reguliert.

Der Mechanismus wäre also wie folgt zu skizzieren: Durch die Belastung des Knochens und damit einhergehenden Verformungen entstehen Strömungen in den Knochenkanälchen, welche Strömungspotentiale erzeugen, die in den Osteo-

zyten Signalkaskaden auslösen. Dieses Signal wird durch molekulare Wachstumsfaktoren an die Osteoblasten und Osteoclasten weitergeleitet. Dies wäre ein denkbarer Mechanismus. Es könnte jedoch sein, dass die Strömungspotentiale lediglich eine Begleiterscheinung dieses Prozesses darstellen und gar keine funktionelle Bedeutung haben. Die Membrane der langen Fortsätze der Osteoblasten könnten nämlich auch direkt auf die Strömung reagieren, die in den engen Zwischenräumen zwischen Membran und Kanalwand auftreten. Derartige Reaktionen sind hinlänglich bekannt und kämen somit tatsächlich als primäre Ursache in Frage (Hung et al. 1996).

Im Falle der elektrischen Wirkung des Strömungspotentials (oder entsprechend des Strömungsstroms) auf die Osteozyten wäre es für therapeutische Zwecke sinnvoll, dieses zu simulieren. Man müsste also nach Möglichkeiten suchen, dieses optimal von außen zu induzieren. Hätte nun die Elektrotherapie keine Chance, wenn die andere Hypothese richtig wäre, wenn die Osteozyten also unmittelbar durch die Strömung selbst gereizt würden? Keineswegs, denn der Prozess ist umkehrbar: Erzeugt Strömung in engen Kapillaren Strömungspotentiale, so kann umgekehrt ein elektrisches Feld in solchen Systemen elektro-osmotische Strömungen induzieren (siehe Glaser 2000). Auch in diesem Falle könnte eine Therapie wirksam sein.

In jedem Falle nützt es wenig, den Einfluss von elektrischen Feldern auf isolierte Zellen, etwa auf Osteoblasten, zu untersuchen, wenn das tatsächliche System, das man beeinflussen will, in Wirklichkeit ganz anders strukturiert ist und aus Zellen ganz anderer Art besteht. Es sind Forschungsaktivitäten nötig, die zunächst auf einem höheren strukturellen Niveau durchgeführt werden, bevor man sich um die zellulären und molekularen Mechanismen der Folgeaktionen kümmert. Natürlich sind das hohe Anforderungen an eine experimentelle Forschung, doch nur so kann man hoffen, einmal Geräte zu konstruieren, die tatsächlich eine optimale Applikation elektrischer Parameter ermöglichen und, am Patienten angesetzt, eindeutige Therapieerfolge liefern.

Schlussfolgerung:

Kann man Knochenwachstum elektromagnetisch stimulieren?

Fassen wir zusammen, so ergibt sich, dass die Bemühungen, das Knochenwachstum durch elektrische Felder künstlich zu beeinflussen, durchaus erfolgversprechend sein könnten. Selbst wenn sich die Yasuda-Hypothese als unzutreffend erweist, wenn die gemessenen druckspannungs-abhängigen Potentiale an den Knochen nichts weiter wären als das elektrische Rauschen von Nano-Strömungen im Knochen ohne funktionelle Bedeutung, so könnte ein elektrisches Feld solche Strömungen induzieren und damit in den Prozess der Regulation des Knochenwachstums und der Knochenregeneration eingreifen. Voraussetzung wäre allerdings, dass die elektrischen Parameter der Therapiegeräte tatsächlich geeignet wären, dies zu vollbringen. Es ist natürlich nicht auszuschließen, dass einige Geräte mehr oder weniger zufällig diesen Bedingungen nahe kommen. Keinesfalls wäre anzunehmen, dass pulsierende Magnetfelder mit Flussdichten im Mikrottesla-Bereich dies schaffen. Wenn auch solche Geräte im Bereich zulässiger Expositionen entsprechend dem geltenden Recht (26. BImSchV, BGBl.1S 1996) liegen und somit keine Nebenwirkungen zu erwarten sind, so können Arzt und Patient höchstens auf einen günstigen Placebo-Effekt hoffen.

Literatur

Aaron, R. K., Ciombor, D. M., and Simon, B. J.: Treatment of nonunions with electric and electromagnetic fields. *Clin. Orthop. and Related Res.* 419, 21. 2004.

Akai, M. and Hayashi, K.: Effect of electrical stimulation on musculoskeletal systems; A meta-analysis of controlled clinical trials. *Bioelectromagnetics* 23, 132. 2002.

Akai, M., Kawashima, N., Kimura, T., and Hayashi, K.: Electrical stimulation as an adjunct to spinal fusion: A meta-analysis of controlled clinical trials. *Bioelectromagnetics* 23, 496. 2002.

Bassett, C. A. L.: Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields. *Crit. Rev. Biomed. Engin.* 17, 451. 1989.

Brighton, C. T., Wang, W., Seldes, R., Zhang, G. H., and Pollack, S. R.: Signal transduction in electrically stimulated bone cells. *J. Bone and Joint Surgery* 83A, 1514. 2001.

Buch, R.: Electrical stimulation of healing bone with special reference to incorporation of bone implants. *Critical Reviews in Biocompatibility* 4, 181. 1988.

Chao, E. Y. S., Inoue, N., Koo, T. K. K., and Kim, Y. H. : Biomechanical considerations of fracture treatment and bone quality maintenance in elderly patients and patients with osteoporosis. *Clin. Orthopaed. Rel. Res.* 425, 12. 2004.

Cochran, G.V.B., Pawluk, R.J., and Bassett, C.A.L. : Electromechanical characteristics of bone under physiologic moisture conditions. *Clin. Orthop.* 58, 249. 1968.

Fini, M., Giavaresi, G., Carpi, A., Nicolini, A., Setti, S., and Giardino, R. : Effects of pulsed electromagnetic fields on articular hyaline cartilage: review of experimental and clinical studies. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 59, 388. 2005.

Forgon, M., Várhidy, V., and Kellényi, L.: Bone growth accelerated by stimulation of the epiphyseal plate with electric current. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 104, 121. 1985.

Friedenberg, Z.B. and Brighton, C.T.: Bioelectric potentials in bone. *J. Bone Joint Surg.* 48A, 915. 1966.

Friedenberg, Z.B. and Kohanim.: The effect of direct current on bone. *Surg. Gynecol. Obstet.* 127, 97. 1968.

Glaser, R.: Grundriß der Biomechanik , Akademie-Verlag , 2.Aufl., Berlin 1989

Glaser, R.: Biophysics. 5. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York. 2000.

Glaser, R.: Elektro-Magneto-Therapie: Situation und Perspektiven. *News Letter der FGF* 16. 2004.

Glaser, R.: Elektrische und magnetische Felder in Diagnostik und Therapie. Ein Gebiet zwischen Scharlatanerie und wissenschaftlichem Fortschritt. *Skeptiker* 17, 136. 2004.

Glaser, R.: Heilende Magnete, strahlende Handys – Bioelektromagnetismus: Fakten und Legenden. Wiley-VCH, Weinheim 2008

Hung, C.T., Allen, F.D., Pollack, S.R., and Brighton, C.T. : What is the role of the convective current density in the real-time calcium response of cultured bone cells to fluid flow? *J. Biomech.* 29, 1403. 1996.

- Kane, W. J.: Direct current electrical bone growth stimulation for spinal fusion. *Spine* 13, 363. 1988.
- Macklis, R.M.: Magnetic Healing, Quackery, and the Debate About the Health Effects of Electromagnetic Fields. *Ann. Intern. Med.* 118, 376. 1993.
- Marino, A.A., Cellen, J.M., and Becker, R.O.: Electret induced bone formation in rats. *IEEE Frontiers of Engineering in Health Care* 1981.
- Maroudas, A.: Physicochemical properties of cartilage in light of ion exchange theory. *Biophys. J.* 8, 575. 1968.
- Meril, A. J.: Direct current stimulation of allograft in anterior and posterior lumbar interbody fusions. *Spine* 19, 2393. 1994.
- Oishi, M. and Onesti, S. T.: Electrical bone graft stimulation for spinal fusion: A review. *Neurosurgery* 47, 1041. 2000.
- Paterson, D.C., Lewis, G.N., and Cass, C.A.: Treatment of delayed union and nonunion with an implanted direct current stimulator. *Clin. Orthopaedics Rel. Res.* 148, 117. 1980.
- Rowbottom, M. and Susskind, Ch.: *Electricity and Medicine. History of their Interaction.* San Francisco Press, Inc., San Francisco 1984.
- Ryaby, J.T.: Clinical effects of electromagnetic and electric fields on fracture healing. *Clin. Orthop.* 355, S205. 1998.
- Sato, O. and Akai, M.: Effect of direct-current stimulation on the growth plate: in vivo study with rabbits. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 109, 3. 1989.
- Schmidt-Rohlfing, B., Silny, J., and Niethard, F.U.: Pulsierende elektromagnetische Felder in der Behandlung von Verletzungen und Erkrankungen der Bewegungsorgane – eine Übersicht und Metaanalyse. *Z. Orthop.* 138, 379. 2000.
- Spadaro, J.A.: Mechanical and electrical interactions in bone remodeling. *Bioelectromagnetics* 18, 193. 1997.
- Starkebaum, W., Pollack, S. R., and Korostoff, E.: Microelectrode studies of stress-generated potentials in four-point bending of bone. *J. Biomed. Matter. Res.* 13, 729. 1979.
- Takei, N. and Akai, M.: Effect of direct current stimulation on triradiate physal cartilage. In vivo study in young rabbits. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 112, 159. 1993.
- Wolff, J.: *Das Gesetz der Transformation der Knochen. (1892) (The law of bone remodeling),* Marquet, P., Furlong, R. (trans). Springer-Verlag, New York 1986.
- Yasuda, I.: Piezoelectricity of living bone. *J. Kyoto Pref. Univ. Med.* 53, 325. 1953.
- Zhang, D.J., Cowin, S.C., and Weinbaum, S.: Electrical signal transmission and gap junction regulation in a bone cell network: A cable model for an osteon. *Ann. Biomed. Eng.* 25, 357. 1997.

4 Wie objektiv ist die öffentliche Wahrnehmung?

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln einerseits technische Grundlagen und Anwendungen und andererseits biologische Erkenntnisse vorgestellt wurden, wendet sich das folgende Kapitel der Seite der Wahrnehmung zu.

Der große technische Fortschritt begann bekanntermaßen vor etwa 200 Jahren. Damals waren es zunächst nur einzelne Entdeckungen und Erfindungen, wie Glühbirne und Eisenbahn, später folgten dann Auto und Telefon, um einige herausragende technische Produkte herauszustellen. Die technische Entwicklung und die Anwendungen erfolgten rasant und nahmen immer mehr Platz im alltäglichen Leben ein, bis sie heute flächen-deckend und in fast allen Lebenslagen anzutreffen sind.

Dies gilt auch besonders für die Nutzung der drahtlosen Telefonie. Nahezu alle Frequenz-bereiche und Leistungsstärken finden ihre Anwendung. Konnte der Mensch sich bei vielen technischen Angeboten persönlich entscheiden, ob er diese Neuerungen nutzen wollte, so ist bei den Funkanwendungen diese Entscheidungsmöglichkeit nicht gegeben. Schalten wir unser Handy und damit das damit verbundene Feld aus, so sind wir doch weiterhin von den elektromagnetischen Wellen der Sendetürme umgeben. Gleiches gilt für Hörfunk und Fernsehen. Fön, Rasierapparat oder Toaster dagegen werden nur lokal betrieben, und nach dem Ausschalten bestehen keine elektromagnetischen Felder weiter.

Dass sich die Felder auch außerhalb der eigenen Wände ausdehnen und sich elektrische Geräte entsprechend „stören“ können, hatte man insbesondere in der Vergangenheit öfter erfahren können. Das führte zu der Frage, ob elektromagnetische Wellen dann nicht auch beim Menschen Störungen in Form von gesundheitlichen Auswirkungen hervorrufen können.

Viele Menschen reagieren bei technischen Innovationen mit Skepsis, insbesondere dann, wenn Ihnen die technischen Grundlagen zum Verständnis hierfür fehlen. Verwundern tut dies kaum, schließlich befürchtete man schon 1835 bei der ersten Fahrt mit der Eisenbahn in Deutschland, der Mensch sei für Geschwindigkeiten über 25 km/h nicht geschaffen und man müsste mit ernsthaften Erkrankungen rechnen. Viele Ärzte warnten damals daher vor deren Benutzung. Heute rauschen Tausende mit fünf- bis zehnfacher Geschwindigkeit täglich zur Arbeit, beängstigende Gedanken darüber gehören der Vergangenheit an.

Doch wie ist die Stimmung beim Mobilfunk? Elektromagnetische Wellen gibt es heute überall, und es werden ständig mehr. In der Diskussion ganz oben: Die Angst vor gepulsten Signalen, die von einigen mit Pulsen verglichen werden, die unseren eigenen Puls und Herzschlag durcheinander bringen, von anderen mit Schlägen, die unser Gleichgewicht stören, unsere Nerven schädigen und unsere Gesundheit ruinieren können. Es ist die Rede von der Grundangst im Menschen vor giftigen oder gefährlichen Dingen – bewusst oder unbewusst. Wir können elektromagnetische Wellen nicht riechen, nicht sehen, nicht schmecken und auch nicht fühlen. Und gerade, weil man diese Wellen mit den menschlichen Sinnen nicht unmittelbar wahrnehmen kann, hat sich daraus Angst oder gar eine gewisse Mystik entwickelt. Schnell wurden für die elektromagnetischen Pulse besonders spektakuläre und scheinbar plausible Vergleiche gefunden (Schlagbohrhammer, Stroboskop, etc.). Sind sie damit vergleichbar gefährlich?

4.1 Gepulste Gefahr? Die öffentliche Diskussion am Beispiel der DECT-Telefone

Christoph Bächtle

Schnurlose Telefone halten zunehmend in den heimischen vier Wänden Einzug. Wie die Mobiltelefone geraten auch sie in die kontroverse Diskussion zur Schädlichkeit der Funkfelder. Dabei trifft die Kritik besonders Telefone, die nach dem neuen digitalen DECT-Standard arbeiten. Der DECT-Standard hat den älteren analogen CT-1+-Standard und dessen digitalen Nachfolger CT-2 abgelöst. Im Gegensatz zu analogen CT-1+-Telefonen arbeiten DECT-Telefone mit einem gepulsten Signal, das ständig ausgesendet wird. Geräte nach dem CT-2-Standard verwenden ebenfalls ein gepulstes Signal, aber nur im aktiven Sendebetrieb; wenn nicht telefoniert wird, unterbleibt die Signalausendung. Aus Sicht der Hersteller ist das Dauersignal der DECT-Telefone standardbedingt unumgänglich. In verschiedenen Presse- und Fernsehberichten wurde daher den DECT-Telefonen das Prädikat „gefährlich“ ausgestellt.

In unserem Beitrag werden verschiedene Argumentationen und Aspekte zur DECT-Technik aufgegriffen und miteinander verglichen. Es wird gezeigt, dass die Kritik vorwiegend von subjektiven Erlebnissen und Empfindungen geprägt ist, die wissenschaftlich nur dürftig untermauert sind. Dem stehen wissenschaftliche Ergebnisse internationaler und nationaler Institutionen gegenüber, die in der DECT-Technik kein gesundheitsgefährdendes Potenzial erkennen können.

Die Frage nach einer möglichen Gesundheitsgefährdung durch DECT-Telefone wird auch in Zukunft für gesplante Meinungen sorgen, und es bleibt Aufgabe der Forschung und Wissenschaft, darauf eine möglichst eindeutige sachliche Antwort zu finden.

Die Kritiker von DECT-Telefonen führen in erster Linie folgende Argumente an:

1. DECT-Telefone benutzen zum Datentransfer kein analoges, sondern ein gepulstes Signal, das mit einer Pulsfrequenz von 100 Hz arbeitet.
2. DECT-Telefone senden ihr gepulstes Signal nicht nur im Sende-, sondern auch im Stand-by-Betrieb.
3. Die Ausgangsleistung der DECT-Telefone ist nicht regelbar, das heißt, die Telefone passen, im Gegensatz zu Mobiltelefonen, ihre Ausgangsleistung nicht den Ausbreitungsbedingungen an, sondern senden stets mit maximaler Leistung.

In der Zeitschrift „Ökotest“ vom November 1999 wird unter der Überschrift „Von der Leine gelassen“ vor DECT-Telefonen gewarnt und dem Verbraucher zu Geräten nach dem älteren, analogen CT-1+-Standard geraten. Die Empfehlung der Ökotester basierte neben technischen Bedenken auch auf Berichten über Beschwerden bei Menschen, die ein DECT-Telefon benutzt hatten oder in deren unmittelbarem Umfeld ein solches in Betrieb genommen wurde.

Ausschlaggebend für die ablehnende Haltung von „Ökotest“ gegenüber der

DECT-Technik waren die teilweise hohen Leistungsflussdichten sowie der ständig ausgesendete Puls von 100 Hz. Unter Berufung auf nicht näher benannte wissenschaftliche Ergebnisse führt die Zeitschrift an, „dass gepulste Strahlung von Schnurlosen, wie übrigens auch von Handys, die Hirnströme verändern und den Informationsfluss zwischen den Körperzellen behindern kann.“ Die gemessene Leistungsflussdichte von 100 nW/cm² beim Panasonic KX-TCD 950 verglichen „Ökotest“ mit dem Signal eines „Mobilfunkturms in 20 m Abstand“. Das reicht, um nach Auffassung von Dr. Lebrecht von Klitzing, Medizin-Physiker an der Universität Lübeck, Einfluss auf Hirnströme zu nehmen.

Das Fazit der Tester zum Thema DECT-Telefone: „Obwohl alle 16 DECT-Telefone gute Praxisnoten bekamen, können wir wegen des Elektroschmogs, den alle ständig verursachen, keines empfehlen.“

Eine andere Auffassung vertritt die Zeitschrift „Computer-Bild“ in ihrer Ausgabe 02/2000, in der sie die Ergebnisse von 10 getesteten DECT-Telefonen vorstellt. Hinsichtlich der gesundheitlichen Gefährdung, ausgelöst durch die Felder der DECT-Telefone, kommen die Testredakteure zu dem Ergebnis, dass „die Strah-

lung von DECT-Telefonen und -Basisstationen so gering ist, dass eine Gefährdung praktisch ausgeschlossen ist.“

Eine ähnliche Auffassung vertritt der ehemalige Vorsitzende der „International Commission on Non-ionizing Radiation Protection“ (ICNIRP), Professor Dr. Jürgen Bernhardt. Er verweist hinsichtlich der potenziellen thermischen Wirkungen eines DECT-Telefons auf die mittlere Sendeleistung der Geräte, die maximal 10 mW beträgt. Daraus ergeben sich mittlere spezifische Absorptionsraten (SAR) von 0,1 W/kg oder weniger. Sein Fazit: „Thermische Wirkungen von DECT-Telefonen können damit ausgeschlossen werden.“

Im Hinblick auf nicht-thermische Wirkungen führt Prof. Bernhardt, der zugleich Mitglied der Strahlenschutzkommission (SSK) ist, Aussagen aus der wissenschaftlichen Literatur an. Demnach gibt es „keine belastbaren Hinweise auf mögliche gesundheitsschädliche Wirkungen durch die amplituden-modulierten Hochfrequenzfelder.“

Auch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hält schnurlose Telefone für unbedenklich. In einer Pressemitteilung vom 15. Dezember 1999 informiert das BfS wie folgt: „Nach derzeitigem wissenschaft-

lichen Kenntnisstand ist eine gesundheitliche Beeinträchtigung durch schnurlose Telefone *nicht* anzunehmen.“ Dies gelte sowohl für den analogen als auch den digitalen Standard. Die aktuellen Grenzwerte hält das BfS unter Berufung auf die SSK und die ICNIRP für ausreichend. Sie werden zudem von den gängigen Geräten weit unterschritten.

Leider versäumt es das BfS nach Meinung von Dipl.-Ing. Gerhard Niemann, 2. Vorsitzender des „Selbsthilfevereins für Elektrosensible e.V.“, München, auf die biologische Relevanz einzelner Parameter, wie z. B. Feldstärke, Belastungsdauer und die Besonderheiten des gepulsten Signals einzugehen. Hier trifft Niemann detailliertere Aussagen. In einem Leserbrief an den „Elektrosmog-Report“ vom Februar 2000 begründet er seine Vorbehalte. Bei der eingesetzten Pulsfrequenz von 100 Hz handele es sich zugleich um die erste Oberwelle der Stromversorgungsnetzfrequenz. Aufgrund von Schaltungsvorgängen und Phasenschnittsteuerungen sei diese Oberwelle an allen Orten zu finden. „Eine Person, die durch diese

Oberwelle auf 100 Hz bereits sensibilisiert wurde, reagiert auf die mit der gleichen Frequenz gepulste Bereitschaftssignalisierung eines DECT-Telefons in kürzester Zeit“, so Niemann. Zusätzlich sieht er in der permanent ausgesendeten Bereitschaftssignalisierung ein Gefahrenpotenzial, zumal die Signalausendung „eben auch in den kritischen, weil aufnahmebereiten Nachtstunden einwirkt“. Für die Genehmigung der 100-Hz-Pulsfrequenz durch das Bundesamt für Strahlenschutz hat Niemann nur Unverständnis übrig.

Niemanns Bedenken über die Verwendung der 100-Hz-Frequenz kann Bernhardt nicht teilen. „Die schwache Modulation der hochfrequenten Trägerwelle, wie sie im DECT-Standard auftritt, ist nicht wirksam“, lautet Bernhardts klare Aussage. Auch das Hochfrequenzsignal von etwa 1800 MHz hält er biologisch für nicht wirksam: „Die Schwellenwerte für Wirkungen an Atomen, Molekülen oder Rezeptoren an der Zellmembranoberfläche liegen so hoch, dass sie durch die schwachen HF-Signale der DECT-Telefone

nicht erreicht werden“. Darüber hinaus „finden an der Zellmembran bei dieser Frequenz keine Effekte statt, da die Membran aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften für diese hochfrequenten Felder durchlässig ist“, so Bernhardt weiter. Dennoch hält er technische Veränderungen für sinnvoll, wenn dadurch die Exposition des Benutzers reduziert wird.

Die dargestellte Argumentation zeigt, dass die Kritik vorwiegend von subjektiven Erlebnissen und Empfindungen von Menschen geprägt ist, die wissenschaftlich nur dürftig untermauert sind. Dem stehen wissenschaftliche Ergebnisse internationaler und nationaler Institutionen gegenüber, die in der DECT-Technik kein gesundheitsgefährdendes Potenzial erkennen können. Die Frage nach einer möglichen Gesundheitsgefährdung durch DECT-Telefone wird auch in Zukunft für gesplante Meinungen sorgen, und es bleibt Aufgabe der Forschung und Wissenschaft, mit möglichst eindeutigen sachlichen Antworten auf die Kritik einzugehen.

4.2 Warum ist der Mobilfunk im Fokus der Ängste?

Um dieses Thema abzudecken, müssen verschiedene Fragen geklärt werden:

Warum äußert man Befürchtungen zu den Wellen und Feldern des Mobilfunks (Handy & Co), während man in der allgemeinen Diskussion Emissionen von Fernseh- und Hörfunksendern außer Acht

lässt? Inwieweit lässt sich dies – technisch oder psychologisch gesehen – begründen oder widerlegen? Gibt es Personen, die so sensibel sind, dass sie diese Wellen, insbesondere die gepulsten, „ahnen“ können? Handelt es sich bei Elektrosensibilität um eine reale Wahrnehmung oder um einen psychologischen Effekt?

Aber auch, wenn die Angst vor elektromagnetischen Feldern und Wellen unbegründet zu sein scheint, so muss sie ernst genommen und untersucht werden, weil eben diese Angst selbst krank machen kann.

4.2.1 Angst vor steilen Flanken?

Karl-Otto Müller

Angeblich liegt die Gefahr der digitalen bzw. gepulsten Mobilfunksignale in den „steilen Flanken“. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass diese Aussage schlicht falsch ist, da bei dem seit 60 Jahren verbreiteten Fernseh-Signal in deutlich kürzerer Zeit aufgetastet wird und keine nachweisbar negativen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen festgestellt wurden.

Die meisten modernen Nachrichtensysteme, so auch der Mobilfunk nach GSM-Standard, arbeiten mit „digitaler Modulation“. Das Wort „digital“ spielt in Diskussionen über die Verträglichkeit der elektromagnetischen Felder auf Organismen, insbesondere auf den Menschen, eine herausragende Rolle, weil in diesem Zusammenhang immer Übertragungen gemeint sind, bei denen die Trägerfrequenz gepulst ausgesendet wird. Das hat im Grunde mit dem Begriff der digitalen Modulation nur eingeschränkt zu tun, denn es gibt eine Reihe digital modulierter Aussendungen, bei denen die Hochfrequenzamplitude über der Zeit konstant ist. Übersehen wird dabei stets, dass gerade diese Art der Signalübertragung hilft, die Höhe der ausgesendeten Energie zu minimieren.

Technisch korrekt wäre es, von Puls-Amplitudenmodulation zu sprechen, denn das digital aufbereitete Signal wird letzten Endes auf diese Art dem Hochfrequenzträger aufgeprägt und ausgesendet. Es gibt keinen Grund dafür, dass ein Organismus auf den Modulationsinhalt, wie immer er aufbereitet ist, reagiert; er reagiert, wenn überhaupt, auf die Stärke der Hochfrequenz (HF)-Energie und deren zeitlichen Verlauf. Bis hierher lässt sich in öffentlichen Diskussionen, von denen der Autor einige miterlebt hat, mit einiger Mühe Einvernehmen erzielen. Dann kommt aber das Argument der „steilen Flanken beim Mobilfunk“. Diese seien besonders schädlich und etwas ganz Neues, was bis jetzt verwendete Nachrichten-Übermittlungen nicht aufwiesen. Aber: Diese Aussage ist schlicht falsch. Ein Blick in die Pegeldiagramme der CCIR- und FCC-Normen (**Abb. 1**) zeigt nämlich, dass die Trägeramplitude beim Fernsehen in deutlich kürzerer Zeit als beim Mobilfunk aufgetastet wird, nämlich

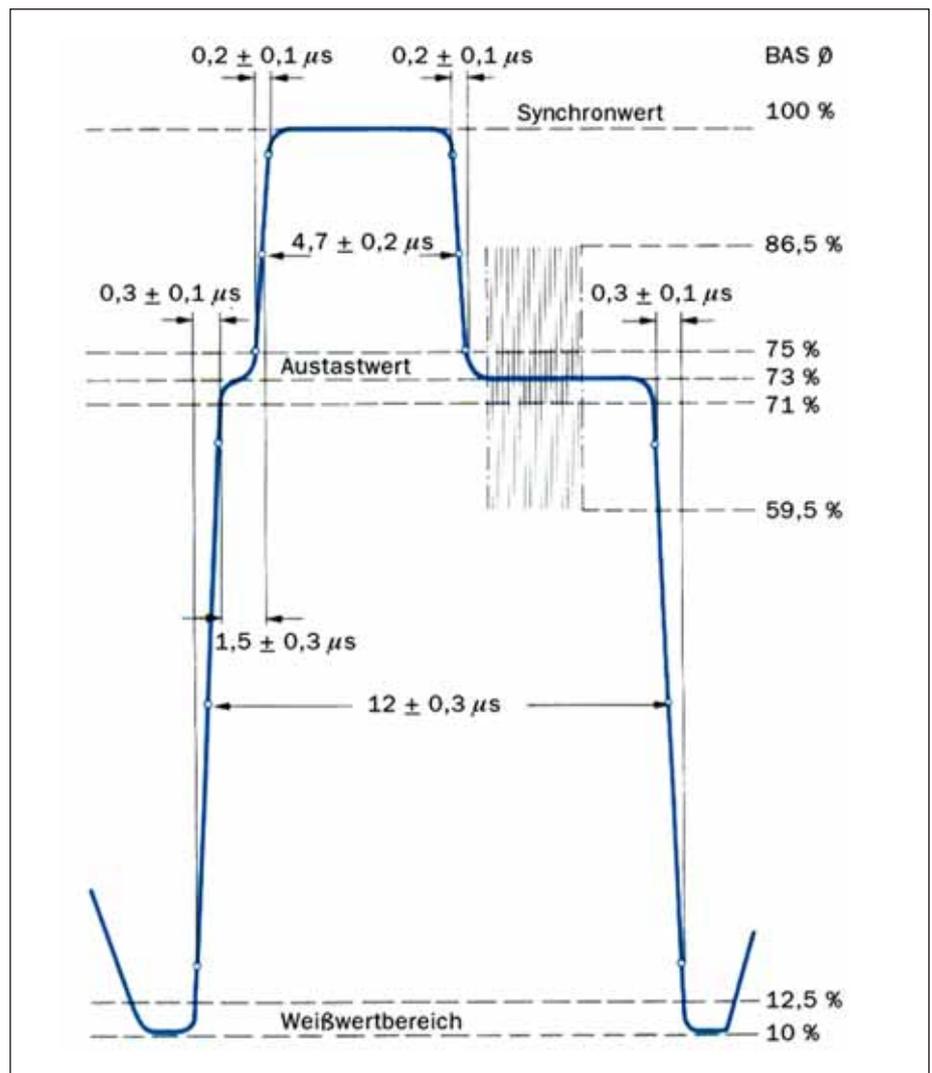


Abb. 1: Zeilen-Synchronimpuls nach CCIR, wie er heute von allen Fernsehsendern in Mitteleuropa ausgestrahlt wird. Zu erkennen ist, dass die Anstiegszeit zwischen Weißwert (= 10 % des Maximalwertes) und sogenanntem Synchronwert $0,3 \mu\text{s} \pm 0,1 \mu\text{s}$ beträgt.

in etwa einer halben Mikrosekunde gegenüber etwa 10 Mikrosekunden bei GSM (**Abb. 2**).

Die oft gehörte Argumentation, der auch von Fachleuten erstaunlich selten widersprochen wird, ist, dass das Fernsehen doch analog arbeite. Das gilt aber nur für

den Bildinhalt; die Bild- und Zeilensynchronisation wird durch Synchronimpulse bewirkt, die noch dazu mit dem höchsten Pegel ausgesendet werden. Diese Synchronspitzen haben Feldstärkewerte, die um den Faktor 1,33 über dem höchsten Wert der analogen Modulation („Schwarzpegel“) liegen. Leistungsmäßig

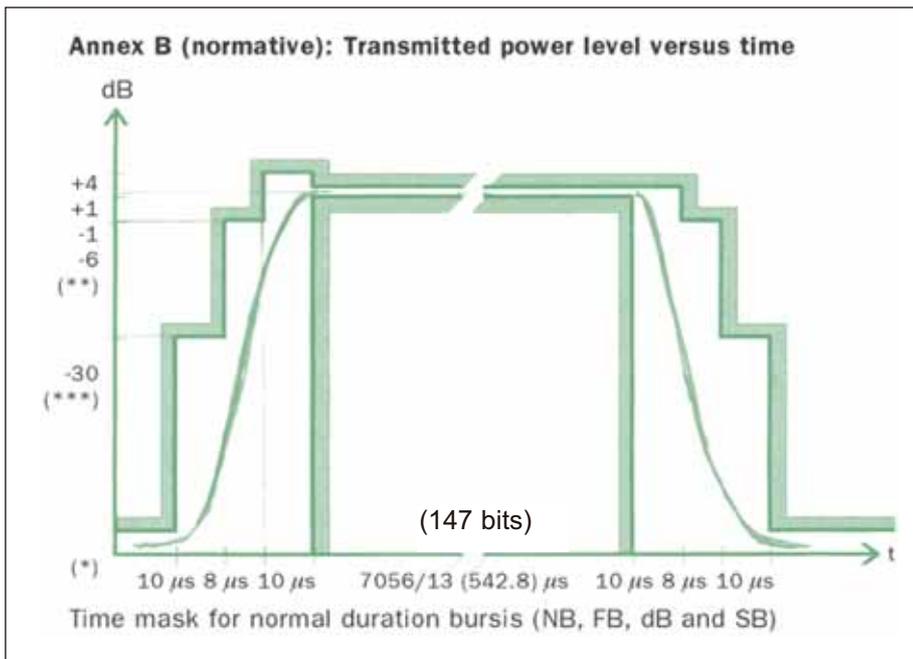


Abb. 2: Toleranzmaske in der ETSI-Norm ETS 300 910, eingezeichnet ein möglicher Amplitudenverlauf. Um die belegte Bandbreite so klein wie möglich zu machen, wird versucht, das Toleranzfeld auszunützen, das heißt, die Pulsflanken so flach wie zulässig zu machen.

sind sie damit um 78 % größer als der höchste Analogwert (Bildschwarz). Bei diesen Verhältnissen ist es durchaus zulässig, die seit Mitte der fünfziger Jahre des letzten Jahrhunderts in Deutschland vorhandenen Fernsehfeldstärken bezüglich ihrer Wirkung auf lebende Organismen mit den Aussendungen der GSM-Netze zu vergleichen: Das heutige Fernsehen ist, energetisch gesehen, ein gepulst arbeitendes System, nur dass hier die Pulsfrequenzen 50 Hz für den Bildwechselimpuls und 15,625 kHz für den Zeilenwechsel betragen im Gegensatz zum GSM-System, bei dem eine dazwischen liegende Pulsfrequenz (217 Hz) verwendet wird. Nachdem es überhaupt keinen wissenschaftlich untermauerten Grund gibt, anzunehmen, dass lebende Organismen so frequenzselektiv sind, dass sie zwischen diesen verschiedenen Pulsfrequenzen unterscheiden, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der von Fernsehsendern erzeugten elektromagnetischen Felder sich nicht wesentlich von denen der Mobilfunksender unterscheidet.

Unbestritten ist, dass die Feldstärken im öffentlich zugänglichen („nicht kontrollierten“) Bereich in Deutschland überall unterhalb der international zulässigen Grenzwerte liegen; strittig ist nur der sogenannte nicht-thermische Einfluss der modulierten Felder. Quantitativ lässt sich dazu sagen, dass der Sicherheitsabstand zu den genannten Grenzwerten für Basisstationen fast überall über dem Faktor 100 liegt, meist aber über 1.000 hinaus bis zu 50.000. Für die Feldstärken von Fernsehaussendungen findet man allgemein Sicherheitsabstände von 1.000 bis 10.000. Typisch für Fernsehsignale ist, dass sich ihre Feldstärkewerte außerhalb von Ortschaften wegen der großen Distanz zu den zentral arbeitenden starken Sendern nur wenig unterscheiden. Die dagegen schwachen Basisstationen versorgen nur kleine Gebiete, die örtliche Variation ihrer Feldstärken ist dadurch stärker. Mit anderen Worten: Auf freiem Feld überwiegen die Felder der Fernsehsender, in bebautem Gebiet, örtlich eng begrenzt, die Felder der Mobilfunkstationen.

Von diesen überall vorhandenen Feldern sind wir in Deutschland seit etwa 60 Jahren ständig umgeben. Nachdem hier die nicht-thermische Wirkung der Felder angesprochen wird, ist es müßig, über einen Sicherheitsabstand von 100, 1.000 oder 10.000 zu diskutieren. Festzustellen ist, dass trotz dieses Daueraufenthalts in den gepulsten Feldern der Fernsehsender auch nach dieser langen Zeit keine nachweisbar negativen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen festgestellt wurden. Das wiederum gibt begründeten Anlass zu der Annahme, dass die ebenso schwachen Felder der Mobilfunkstationen, deren Pulsflanken noch dazu um den Faktor 20 weniger steil sind als die Pulsflanken der Fernsehsignale, keinen realen Einfluss auf das Wohlbefinden der Menschen haben.

4.2.2 Pulsung: Argumente mit dem Schlagbohrhammer

Andrea T. Thalmann

Wenn über die Gefährlichkeit und Ungefährlichkeit elektromagnetischer Felder (EMF) des Mobilfunks diskutiert wird, führen Gegner und Befürworter unzählige Argumente auf, um ihrer Meinung – ihrer jeweiligen Wahrheit – Ausdruck zu verleihen. Häufig wird mit Metaphern und Bildern gearbeitet, um bestimmte (Schreckens-)szenarien für den Adressaten erlebbar und so nachvollziehbar zu machen. Meistens geht es darum, die informationssuchende Person von vermeintlichen Konsequenzen, die der Mobilfunk haben wird, zu überzeugen, für den Fall, dass etwas nicht gemacht wird oder eben doch.

Ein immer wieder anzutreffendes Argument von Mobilfunkgegnern in der Debatte hebt die besondere Problematik der Pulsung heraus. Im Sinne einer Warnung wird die Pulsung verglichen mit einer „Bohrmaschine, die durch Zuschalten des Schlagwerks zum Schlagbohrhammer wird, der dann innerhalb einer Sekunde nicht nur einmal, sondern durch Pulsung seiner Kraft seine Leistung zig-tausend Mal in der Sekunde erbringt“ (Zitat: Bürgerwelle, www.buergerwelle.de/deutschstart.html).

Was bewirken solche Spiele mit Schreckensszenarien? Wie ist dieses Schlagbohrhammer-Argument im Hinblick auf die Risikowahrnehmung von Nicht-Experten zu bewerten?

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen zwei Ebenen des Puls-Arguments unterschieden werden: Die sachlich inhaltliche Ebene und die konnotativ mitschwingende, emotionale Ebene. Die erste Ebene beinhaltet die Hypothese, dass die Verpackung von Daten in kleine digitale Pakete, die zu definierten Zeitpunkten gesendet werden, gefährlicher ist, verglichen mit einer kontinuierlichen Übertragung. Die zweite Ebene arbeitet mit emotionalisierten Inhalten als Überzeugungsmitteln. Es wird versucht, mittels Wörtern wie „Schlagbohrhammer“ Schreckensassoziationen und -bilder auszulösen, die eine Bedrohung, eine Gefahr erahnen lassen und ein „ungutes“ Gefühl oder sogar Angst auslösen können.

In Bezug auf die erste Ebene ist festzuhalten und in den anderen Beiträgen dieses Buches näher erläutert, dass wissenschaftlich keine hinreichende Begründung für das Puls-Argument besteht. Für die Pulsung als Warnung gilt: Die Aussagekraft ist aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Evidenz sehr gering, so dass sie bei der persönlichen Risikowahrnehmung keine besondere Rolle spielen sollte.

Wäre da nicht die emotionale Komponente des Pulsungs-Arguments! Es ist anzunehmen, dass gerade der konnotative Anteil des Arguments sehr wohl eine Wirkung auf den Adressaten und somit auf die Risikowahrnehmung hat (z. B. in Bezug auf die Frage, ob nun EMF gefährlich oder nicht gefährlich sind). Die Forschung zur Risikowahrnehmung und zur Informationsverarbeitung stellt aufschlussreiche Erkenntnisse zur Rolle von Emotionen sowie positiven und negativen Gefühlen bereit, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Die Rolle von Emotionen in der Risikowahrnehmung

Emotionen spielen in der Wahrnehmung und Bewertung von Risiken eine entscheidende Rolle. Verschiedene Studien zur Risikowahrnehmung zeigen, dass die öffentliche Wahrnehmung stark durch Merkmale wie Schrecklichkeit und Gefühle von Schrecklichkeit bestimmt ist und dass dadurch die Akzeptanz von Risiken verschiedener Gefahren stark beeinflusst wird (Fischhoff et al., 1978; Slovic, 1987). Laien bewerten Risiken nicht allein nach objektiven Kriterien wie der Wahrscheinlichkeit oder dem Schadensausmaß, sondern wenden ein ganzheitliches, holistisches Konzept von Risiko an.

Laien-Risiko-Konzepte sind umfangreicher als Experten-Risiko-Definitionen und beinhalten weitere Kriterien wie Freiwilligkeit, Kontrollierbarkeit, Vertrautheit, Bekanntheit oder Nutzen etc. Ebenfalls gehört „Schrecklichkeit“ als Bewertungskriterium dazu.

Bei Urteilen über Risiken, Technologien oder andere Themen werden natürlich rationale Überlegungen nicht ausgeschlossen. Durch das persönliche negative oder positive Gefühl in Bezug auf diese Themen werden sie jedoch überfärbt (Slovic et al., 2004). „Risk as a feeling“ spielt dabei die entscheidende Rolle. In dem Artikel mit gleichnamigem Titel

thematisieren der Risikoforscher Slovic und seine Mitarbeiter die Rolle von Gefühlen. Dabei werden bei der Risiko-bewertung zwei Arten von Denk-Modi unterschieden: Risiko als Gefühl und Risiko als Analyse. Ersteres beschreibt die schnelle instinktive und intuitive Reaktion auf eine Gefahr – den so genannten Erfahrungsmodus des Denkens. Zweites betrifft das logische, sachliche Denken und wissenschaftliche Erwägen bei dem Gefahrenmanagement und wird als der analytische Modus des Denkens definiert. Diese beiden Denkmodi sind in **Tabelle 1** ausführlich charakterisiert:

Erfahrungssystem	Analytisches System
1. Holistisch	1. Analytisch
2. Affektiv: Lust-Schmerz orientiert	2. Logisch: Vernunft orientiert
3. Assoziative Verbindungen	3. Logische Verbindungen
4. Verhalten basiert auf vergangenen Erfahrungen	4. Verhalten basiert auf bewusster Einschätzung eines Ereignisses
5. Entschlüsselt die Realität in konkrete Bilder, Metaphern und Erzählungen	5. Entschlüsselung der Realität in abstrakte Symbole, Wörter und Zahlen
6. Schnelle Verarbeitung: Orientiert auf sofortige Handlung	6. Langsame Verarbeitung: Orientiert auf eine verzögerte Handlung
7. Selbst-Evidenz als Validität: Erfahrung = Glauben	7. Bestätigung basierend auf Logik und Evidenz erforderlich

Tabelle 1: Zwei Denk-Modi: Erfahrungssystem und analytisches System (Slovic et al., 2004)

Emotionen stellen einen wichtigen Aspekt der Entscheidungsheuristik bei (Risiko-) Urteilen dar. Im Allgemeinen beziehen sich Personen bei der Wahrnehmung und Bewertung von Risiken auf intuitive Gefühle. Bei einem Urteil steht also nicht einfach nur im Zentrum, was man denkt, sondern vor allem auch, was man bei der Auseinandersetzung mit einem bestimmten Thema fühlt. Es geht also nicht nur um überdauernde Gemütszustände, sondern um Affekte, die direkt bei der Auseinandersetzung mit einer Information entstehen. Diese erlebten Gefühle von „richtig“ und „schlecht“ tauchen schnell und automatisch, meist auch unbewusst auf und beeinflussen (Risiko-) Urteile. Affektive Wertungen von positiven und negativen Bildern sind ausschlaggebend für Einstellung, Wahrnehmung und Verhalten. Wenn das Abwägen eher positiv ausfällt, wird wohlwollend geantwortet (akzeptierend), wenn das Abwägen negativ ausfällt, wird ablehnend reagiert (Slovic, 1999).

Verschiedene Studien zeigen den Einfluss von negativen und positiven Affekten auf die Risiko- und Nutzen-Urteile (Finuncane et al., 2000; Lerner et al., 2001; Rottenstreich et Hsee, 2001). Häufig wird die Risikowahrnehmung direkt durch den Affekt beeinflusst, ohne dass zuerst ein analytischer Bewertungsprozess stattfindet. Wenn die potenzielle Konsequenz eines Ereignisses oder auch schon das Ereignis selbst stark emotional besetzt ist, hängt die Attraktivität oder Nicht-Attraktivität dieses Ereignisses vom Gefühl ab und wird nicht durch objektive Werte wie z. B. die Wahrscheinlichkeit beeinflusst. In anderen Worten: Ereignisse bzw. Konsequenzen, die mit starken Gefühlen ver-

bunden werden, können überwältigen, auch wenn die Wahrscheinlichkeit dagegen spricht, dass sie eintreten. Ähnliche Effekte von Gefühlen bzw. Affekten zeigen sich auch bei der Bereitschaft, sich abzusichern: Personen sind eher bereit, mehr für eine Versicherung für ein geliebtes Möbelstück oder Auto zu bezahlen, als für einen Gebrauchsgegenstand ohne besondere affektive Besetztheit (Hsee & Kunreuther, 2000).

Interessant ist in Bezug auf Gefühle und Emotionen, dass Affekte nicht nur risiko-bezogene Urteile von Laien, sondern auch von Experten beeinflussen. Dies zeigen Studien im Rahmen von „Intuitive Toxicology“ von Slovic und Mitarbeiter (1995). Affektive Faktoren beeinflussen Experten (im Falle der Studie, Toxikologen) in ihrer Risikoabschätzung ähnlich wie die öffentliche Risikowahrnehmung.

Die Art der Risikobeschreibung und der Informationen über mögliche Konsequenzen stellt also ein kritisches Moment dar, da damit positive und negative Gefühle ausgelöst werden, die dann als Heuristiken die Risikowahrnehmung maßgeblich beeinflussen. Wiedemann und seine Mitarbeiter haben dies in einer experimentellen Studie mittels Risikogeschichten („Risk stories“) gezeigt. Durch unterschiedliche Darstellung von Risikoinformationen wurden bei den Teilnehmern der Studie entweder Gefühle der Empörung oder Gefühle der Nachsicht ausgelöst. Der so induzierte affektive Kontext wirkte sich signifikant auf die Risikobeurteilung aus. Im „Empörungskontext“ gaben die Teilnehmer im Mittel höhere Risikoeinschätzungen ab als im „Nachsichtkontext“ und dies, obwohl die Sach-

basis des herangezogenen Schadensereignisses völlig identisch beschrieben war (Wiedemann et al., 2003).

Wie wirken Emotionen auf die Informationsverarbeitung?

Emotionen sind Orientierungsmechanismen, die psychologische Basisprozesse wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis oder Informationsverarbeitung steuern. Wie lässt sich die Wirkung von Emotionen auf die Risikobeurteilung erklären? Auf welchen Prozessen baut überhaupt ein Urteil, eine Risikoentscheidung auf?

Theoretische Ansätze aus der Informationsverarbeitungs-Forschung bieten geeignete Erklärungen. Ein bekanntes Modell der Informationsverarbeitung stellt das Elaboration Likelihood Modell (kurz ELM) von Petty und Cacioppo (1981, 1986) dar. Nach diesem Modell können Informationen auf zwei Arten verarbeitet werden: Entweder über eine *zentrale Route*, welche eine kritische objektbezogene Prüfung der Argumente beinhaltet und hohen kognitiven Aufwand fordert, oder über eine *periphere Route*, welche eine weniger kritische Prüfung beschreibt und den kognitiven Aufwand gering hält. Erstere lässt einer sachlichen Abwägung von Argumenten den Vorzug, während im zweiten Fall Urteile hauptsächlich auf Hinweisreizen – so genannten „Cues“ – basieren. Welche Form der Informationsverarbeitung gewählt wird, hängt von der persönlichen Motivation, der persönlichen kognitiven Fähigkeit und auch von der Komplexität des Inhalts ab.

Je nachdem welche Route der Informationsverarbeitung zum Tragen kommt, werden unterschiedliche Merkmale der Information oder des Kommunikationsprozesses wichtiger. Während bei einer kritischen Auseinandersetzung objektivierbare Kriterien wie z. B. die Aussagekraft, d. h. die Qualität von Argumenten, die Hauptrolle spielen, basieren Urteile und Entscheidungen bei einer peripheren Verarbeitung auf einer ganzen Reihe von anderen Charakteristika des gesamten Kommunikationsprozesses. Diese Merkmale werden als Heuristiken genutzt. Beispiele dafür sind die Attraktivität der Informationsquelle (z. B. „die Person ist angenehm, deshalb sind ihre Ansichten richtig“), wahrgenommene Ähnlichkeit mit einer informationsvermittelnden Person, der Rahmen, in den eine Information

eingebettet ist (positive oder negative Formulierung), die Menge an Informationen (Beispiel: „Es können so viele Studien aufgezählt werden, dann muss doch etwas daran sein“), Überzeugungen und Weltanschauung des Informationsempfängers und eben auch Emotionen und Gefühle, die bei der Verarbeitung von Informationen entstehen (vgl. bzgl. Merkmale des Informationsverarbeitungsprozess Thalmann, 2005).

Gerade auch bei der Verarbeitung von Informationen zu neuen Technologien bzw. deren Konsequenzen erfolgt häufig eine periphere Verarbeitung, z. B. aufgrund der komplexen Thematik, oder weil spezifische kognitive Fähigkeiten für eine kritische Prüfung nicht vorhanden sind oder einfach, weil man sich die Zeit nicht nimmt. Umso wichtiger werden dann die eben genannten Merkmale. Risikourteile basieren in solchen Situationen hauptsächlich auf Heuristiken wie Emotionen und weniger auf klaren objektivierbaren Fakten. Hinsichtlich der Emotionen zeigen dies Studien zur Benutzung von affektiven Cues bei der Informationsverarbeitung (Bodenhausen et al., 1994, Gleicher & Petty, 1992, Jepson & Chaiken, 1990; Meijnders et al., 2001).

Bestimmte Informationsdarstellungen können aber die periphere Informationsverarbeitung und die Benutzung von Hinweisreizen fördern, so zum Beispiel die Darstellung von schrecklichen negativen Konsequenzen, falls gewisse Maßnahmen nicht ergriffen werden. Solche bildhaften Darstellungen von Konsequenzen wirken als Bedrohungs- bzw. Angstappelle und lösen negative Gefühle aus. Unabhängig von der tatsächlichen Qualität der Argumente bzw. der wissenschaftlichen Evidenz besitzen Aussagen über schreckliche Konsequenzen hohe Überzeugungskraft (Boster & Mongeau, 1984; Meijnders et al., 2001). Dies ist gerade bei komplexen (Risiko-) Themen der Fall, wo eine kritische, objektivierte Prüfung und Abwägung von Argumenten für Nicht-Experten sehr schwer ist, weil entweder das Wissen dazu fehlt, relevante kognitive Fähigkeiten nicht vorhanden sind oder die Zeit nicht reicht (Bodenhausen et al., 1994).

Natürlich darf die Wirkung von emotionalisierten Informationen auf die Risikowahrnehmung nicht überschätzt werden,

und außerdem reagieren auch nicht alle Personen gleich. Eine kürzlich veröffentlichte Studie zur Wirkung von angstbesetzten Inhalten auf die Risikoabschätzung von Laien zeigt dies (Thalmann, 2005; Thalmann & Wiedemann, in press). Ausgehend von der Beobachtung, dass in der EMF-Debatte sehr häufig mit Schlagwörtern oder mit schrecklichen Krankheiten als Konsequenzen argumentiert wird, wurde die Wirkung angstbesetzter Informationen (z. B. bezüglich Krebs) auf die Risikoeinschätzung von Laien experimentell untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass im Mittel angstbesetzte Informationen (z. B. Hinweise auf Krebs) zu einer ähnlichen Risikoeinschätzung führen, wie wenn „neutralere“ Informationen (z. B. Hinweise auf Störungen im Ca²⁺ Haushalt) präsentiert werden¹. Werden allerdings die Risikoeinschätzungen differenzierter betrachtet, zum Beispiel aufgeteilt nach Überzeugungsgruppen (Besorgte, Unbesorgte, Unentschiedene), zeigen sich interessante Befunde bezüglich der Wirkung von emotionalisierten Informationsinhalten.

Informationen über stark angstbesetzte Krankheiten führen zu einer noch deutlicheren Polarisierung der Risikowahrnehmung bei besorgten und unbesorgten Personen im Vergleich zur Wirkung von neutraleren Informationen. Die **Abb. 1** zeigt dies:

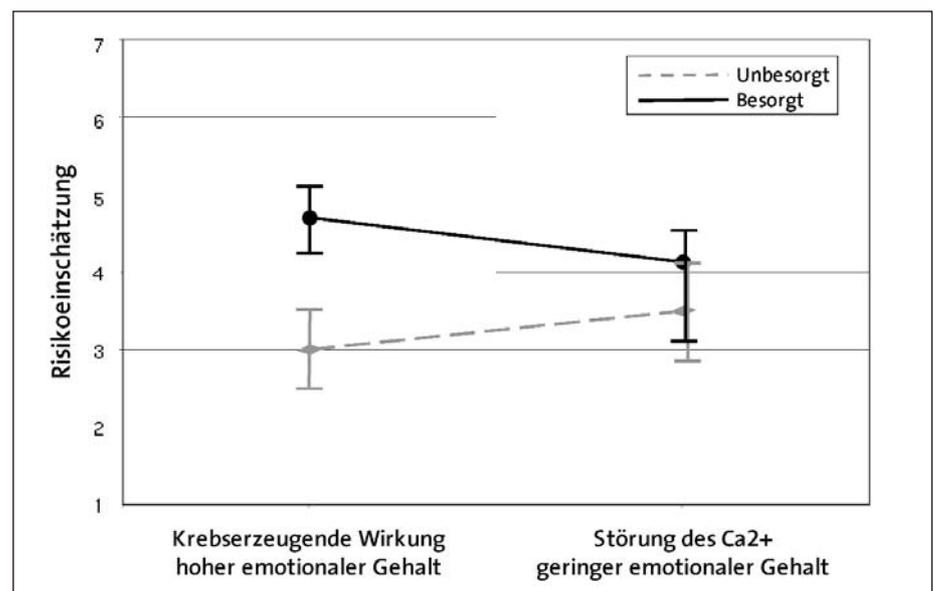


Abb. 1: Wirkung von Risikoinformationen mit emotional besetztem Inhalt auf die Risikoeinschätzung von Besorgten und Unbesorgten (N=94; mit 95 % Konfidenzintervallen)

¹) In einer Vorstudie wurde zuerst der Grad an subjektiv wahrgenommener Schrecklichkeit verschiedener gesundheitsrelevanter Konsequenzen erhoben. Dabei wurde Krebs als sehr schrecklich eingestuft und Störungen im Ca²⁺ als eher nicht schlimm bewertet (vgl. Thalmann, 2005, Thalmann & Wiedemann).

Diskussion:

Angst machende Informationen oder auch einzelne erschreckende Wörter wie „Schlagbohrhammer“ stellen ein wirkungsvolles rhetorisches Mittel dar, um jemanden von einer bestimmten Meinung zu überzeugen. Diese hohe Überzeugungskraft ist ganz unabhängig von der tatsächlichen wissenschaftlichen Evidenz, die solchen Informationen zugrunde liegt. Ein wichtiger Grund für diese Wirkung liegt daran, dass solche Informationen bzw. Mittel Emotionen und Gefühle erzeugen, die für die Verarbeitung von Informationen und für die Bewertung eines Risikos eine zentrale Rolle spielen.

Gefühle, die bei Konfrontation mit (Risiko-) Informationen ausgelöst werden, können als „Affekt-Heuristiken“ für die Bewertung eines Risikos benutzt werden. Dies ist besonders der Fall bei Themen oder Sachverhalten, die sehr komplex sind, wenn die eigene Expertise zur kritischen Prüfung nicht vorhanden ist oder aufgrund persönlicher Priorisierung man sich die Zeit zur kritischen Prüfung nicht nimmt. In solchen Situationen wird dann basierend auf dem Gefühl (positiv oder negativ) entschieden, ob etwas persönlich als bedrohlich oder eben nicht bewertet wird. Argumente wie das zu Beginn genannte Puls-Argument, das mit Bildern vom Schlagbohrhammer spielt, lösen unangenehme Gefühle aus und beeinflussen so Laien in ihrer Risikowahrnehmung. In solchen Fällen spielt die zugrunde liegende wissenschaftliche Evidenz der Argumente eine sekundäre Rolle, weil die persönliche Fähigkeit und das Wissen zur kritischen Prüfung und wahrscheinlich auch die Zeit und Motivation dazu einfach fehlen. Laien verlassen sich dann auf Heuristiken, die gerade verfügbar sind, wie z. B. auf ihr Gefühl.

Natürlich kann die Benutzung von Affekt-Heuristiken bei der Beurteilung von Themen nicht ausgeschaltet werden, unter anderem, weil das persönliche Gefühl durchaus eine sinnvolle und wichtige Quelle für Entscheidungen und Urteile ist. Allerdings sollte bei der Entwicklung von Risikoinformationen der konnotative Anteil genau überprüft werden. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn es sich um Informationen bezüglich undeutlicher Risiken handelt, bei denen die Evidenzlage unklar und mehrdeutig ist.

Insbesondere wenn solche Argumente in Diskussionen auftauchen, sollte nicht nur auf den wissenschaftlichen Anteil eingegangen, sondern auch die emotionale Komponente angesprochen werden. So kann möglicherweise dazu beigetragen werden, dass bei der Bewertung eines Risikos der Weg der Urteilsbildung bewusst wird und neben den Gefühlen auch den objektiven Kriterien eine angemessene Rolle eingeräumt bleibt.

Trotz der zahlreichen Studien aus der Risikowahrnehmung und Informationsverarbeitung sind wichtige Fragen in bezug auf einen angemessenen Umgang mit Emotionen noch ungeklärt. Insbesondere die Frage, wie in der Risikokommunikation und im Risikomanagement mit Emotionen und Gefühlen umzugehen ist, die in einer Debatte entstehen, stellt eine Herausforderung dar. Weitere Forschung hinsichtlich des Umgangs mit Emotionen und Gefühlen ist deshalb wünschenswert.

Literatur

Boster, F. J. & Mongeau, P. (1984). Fear-arousing persuasive message. In R. N. Bostrom (Ed.), *Communication yearbook*. (Vol. 8, S. 330-375). Beverly Hills, CA: Sage.

Bodenhausen, G. V., Sheppard, L. A. & Kramer, G. P. (1994). Negative affect and social judgment: The differential impact of anger and sadness. *European Journal of Social Psychology*, 24, 45-62.

Finucane, M. L., Alhakami, A., Slovic, P., and Johnson, S. M. (2000). The Affect Heuristic in Judgments of Risks and Benefits. *Journal of Behavioral Decision Making*, 13, 1-17.

Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., & Combs, B. (1978). How safe is safe enough? A psychometric study of attitudes toward technological risks and benefits. *Policy Science*, 9, 127-152.

Gleicher, G. & Petty, R. E. (1992). Expectations of reassurance influence the nature of fear-stimulated attitude change. *Journal of Experimental Social Psychology*, 28, 86-100.

Hsee, C. K., & Kunreuther, H. (2000). The affection effect in insurance decisions. *Journal of Risk and Uncertainty*, 20, 141-159.

Jepson, C. & Chaiken, S. (1990). Chronic issue-specific fear inhibits systematic processing of persuasive communications. *Journal of Social Behavior and Personality*, 5, 61-84.

Lerner, J.S. & Keltner, D. (2001). Fear, Anger and Risk. *Journal of Personality and Social Psychology*, 81, 1, 146-159.

Meijnders, A. L., Midden, C. J. H. & Wilke, H. A. M. (2001). Role of Negative Emotion in Communication about CO2 Risks. *Risk Analysis*, 21 (5), 955-966.

Petty, R. E. & Cacioppo, J. T. (1981). *Attitudes and Persuasion: Classic and Contemporary Approaches*. Dubuque, IA: Wm. Brown.

Petty, R. E. & Cacioppo, J. T. (1986) *Communication and Persuasion. Central and Peripheral Routes to Attitude Change*, New York: Springer-Verlag.

Rottenstreich, Y. & Hsee, C. K. (2001). Money, Kisses and Electric Shocks: On the Affective Psychology of Probability Weighting. *Psychological Science*, 12, 3, 185-190.

Slovic, P. (1987). Perception of risk. *Science*, 236, 280-285.

Slovic, P. (1999). Trust, Emotion, Sex, Politic, and Science: Surveying the risk-assessment battlefield. *Risk Analysis*, 19(4), 689-701.

Slovic, P., Finucane, M., Peters, E., and MacGregor, D.G. (2004). Risk as Analysis and Risk as Feelings: Some Thoughts about Affect, Reason, Risk, and Rationality. *Risk Analysis*, 24, 2, 1-13.

Slovic, P., Malmfors, T., Krewiski, D., Mertz, C.K, Neil, N., & Bartlett, S. (1995). Intuitive Toxicology. II. Expert and Lay Judgments of Chemical Risks in Canada. *Risk Analysis*, 15, 6, 661-675.

Thalmann, A.T. (2005). Risiko Elektromog. Wie ist Wissen in der Grauzone zu kommunizieren? Weinheim: Beltz-Verlag.

Thalmann, A. T. & Wiedemann, P.M. Beliefs and Emotionality in Risk Appraisals *Journal of Risk Research*, 9 (2006), 5, 453-466

Wiedemann, P.M., Clauberg, M. & Schütz, H. (2003). Understanding amplification of complex risk issues: the risk story model applied to the EMF case. In N. Pidgeon, R. E. Kasperson, & P. Slovic (eds.). *The social amplification of risk*, (p.286-301). New York: Cambridge University Press.

4.2.3 Biologische Relevanz gepulster Signale in der öffentlichen Diskussion

Fred-Jürgen Breit, Wolfgang Michaelis

Unterscheidet sich die biologische Wirksamkeit gepulster Signale von ungepulsten? Diese Frage wird seit mindestens 10 Jahren öffentlich erörtert. Auch die wissenschaftliche Diskussion zu dieser Frage ist nach wie vor kontrovers. Am Beispiel zweier Experteninterviews aus Internet- und Schriftmedien werden häufig zitierte Argumente aus der Sicht bekannter Wissenschaftler gegenübergestellt und diskutiert.

Spätestens seit der Einführung des Fernsehens sind Sender mit hoher Strahlungsleistung bei hohem Pulsanteil in Deutschland nahezu flächendeckend in Betrieb. Jedoch erst mit der Einführung des Mobilfunks als Massenapplication wurde die zunehmende Verbreitung von Funkdiensten einer breiten Öffentlichkeit deutlich bewusst. Damit begann auch eine zunehmende Diskussion um biologische und gesundheitliche Wirkungen elektromagnetischer Wellen.

Die wissenschaftliche Forschung versucht, diese Diskussion zu versachlichen und eine objektive Einschätzung der Risiken auf der Basis reproduzierbarer Forschungsergebnisse zu erreichen. In vielen Bereichen, insbesondere bei schwachen Strahlungswerten unterhalb derzeit anerkannter Grenzwerte und bezüglich der Wirkungen spezieller Modulationsformen sind jedoch die Ergebnisse von Einzelstudien immer noch widersprüchlich. Vereinzelt Ergebnisse, die auf biologische Effekte oder Gesundheitsrisiken hinweisen, werden oft auch nach Jahren noch als Beispiele für die Gefahren mobiler Funkdienste herangezogen, selbst wenn die betreffenden Studien wissenschaftlich nicht nachvollzogen werden konnten oder in Durchführung oder Auswertung qualitative Mängel beinhalten, also wissenschaftlich nicht als stichhaltig angesehen werden können. Da gerade solche Untersuchungen publizistisch oft besonders spektakulär herausgestellt werden und daher einen hohen Aufmerksamkeitswert erreichen, während eine erfolglose Nachprüfung häufig weniger Beachtung findet, ist es nicht einfach, sich ein realistisches Bild der bestehenden Risiken und Gefährdungen zu machen.

Insbesondere der zunehmende Einsatz von Pulsmodulationen, der erforderlich wurde, um die knappen Frequenzressourcen im Zeitmultiplex (zeitliche Schachtelung von digitalisierten Sprachpaketen) durch möglichst viele Gesprächskanäle nutzen zu können, führte zu einer seit über 10 Jahren andauernden heftigen Auseinandersetzung über mögliche unterschiedliche biologische Wirksamkeit gepulster gegenüber ungepulster elektromagnetischer Wellen. Da auch die (GSM-) Mobilfunktelefonie und die drahtlosen DECT-Telefone diese Technik verwenden, dauert die Diskussion noch heute an.

Im Beispiel der DECT-Anlagen beträgt die Sendeleistung im zeitlichen Mittel nur 10 mW pro Mobilteil. Tatsächlich werden jedoch kurze Hochfrequenz-Pulse mit erheblich höherer Leistung abgestrahlt (Spitzenwert: 250 mW). Die Pausen zwischen den Signalen stehen für die Kommunikations-„Pakete“ anderer Mobilteile zur Verfügung. Mit solchen gepulsten Modulationsformen arbeitet auch der GSM-Mobilfunk. Die interessante Frage ist: Welche Sendeleistung ist nun relevant für die biologische Wirksamkeit? Ist es die relativ geringe mittlere abgestrahlte Leistung, oder ist die Spitzenleistung in den Sendepulsen maßgeblich für die Wirkung auf den Organismus?

Wenn man gesicherte Informationen zu dieser Frage sucht, stellt man schnell fest, dass in der öffentlichen Diskussion auf Mobilfunkseiten im Internet sowie in Informationsmaterialien verschiedener Organisationen sehr unterschiedliche, häufig gegensätzliche Ansichten vertreten werden. Selbst Experten scheinen sich nicht einig zu sein.

Als Beispiel für die öffentliche Diskussion und die hartnäckig vertretenen gegensätzlichen Positionen zur biologischen Relevanz pulsmodulierter Mikrowellen sollen zwei Beispiele angeführt werden:

1. Eine Sonderseite auf der Website des IZGMF (Informationszentrum gegen Mobilfunk) von 5/2004 (http://www.izgmf.de/Aktionen/Meldungen/Archiv_04/Pulsung_Umfrage/pulsung_umfrage.html) gibt unter dem Titel „Biologische Relevanz gepulster Signale“ eine Umfrage mit Stellungnahmen von vier Wissenschaftlern wieder:
 - **Dr. med. Gerd Oberfeld**, Umweltmediziner der Landesgesundheitsdirektion Salzburg
 - **Prof. Dr. Michael Kundi**, Leiter der Abteilung für Arbeits- u. Sozialhygiene, Institut für Umwelthygiene, Wien
 - **Lebrecht von Klitzing**, Medizophysiker, nach langjähriger Tätigkeit an der Universität von Lübeck arbeitet er heute als freier Wissenschaftler
 - **Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Techn. Norbert Leitgeb**, Professor für Krankenhaustechnik an der TU Graz und Vorsitzender des Ausschusses „Nicht-ionisierende Strahlen“ der Deutschen Strahlenschutzkommission.
2. Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg hat unter dem Titel „Gepulste Funkwellen – Fakten und Fiktionen“ (<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/6515/pulswellenthesen.pdf?command=downloadContent&filename=pulswellenthesen.pdf>) eine Broschüre herausgebracht, die sich aus wissenschaftlicher Sicht detaillierter mit den

häufigsten Befürchtungen im Zusammenhang mit pulsmodulierten Mikrowellen auseinandersetzt. Neben Prof. Leitgeb wurde als weiterer unabhängiger Experte **Prof. Dr.-Ing. habil. med. Jiri Silny**, Leiter des Forschungszentrums für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu) des Universitätsklinikums der RWTH Aachen um Stellungnahme gebeten.

Nachfolgend werden die häufigsten Thesen zu Befürchtungen gegen gepulste Funkwellen aus diesen beiden Quellen wiedergegeben. Die genannten Experten nehmen dazu aus ihrer Sicht mit teilweise recht unterschiedlichen Argumenten Stellung.

These 1: Gepulste Wellen sind wie „Nadelstiche“ für den Organismus, das Biosystem reagiert auf diese starken Signaländerungen.

Prof. von Klitzing hält in der Umfrage des IZGMF insbesondere die starke Signaländerung, also den schnellen Anstieg der Impulse für besonders schädlich für das Biosystem. Zum Unterschied zwischen Mittel- und Spitzenwert führt er ein Beispiel an.

Er vergleicht eine Glühlampe von 25 W (Dauerleistung = Mittelwert) mit einer Stroboskoplampe, die dieselbe Leistung in einem 1 ms dauernden Puls alle 1000 ms abgibt, was einer Konzentration um den Faktor 1000 entspricht.

Zitat: „Stroboskope können epileptische Anfälle auslösen, eine Glühlampe mit gleicher gemittelter Leistung nicht“.

Prof. Leitgeb und **Prof. Silny** weisen hingegen darauf hin, dass der Vergleich gepulster Funkwellen mit der Wirkung von gepulstem Licht auf das visuelle System nicht angebracht ist. Der Mensch verfügt im Bereich optischer Wellenlängen im Gegensatz zu Funkwellen mit dem Auge über ein hoch empfindliches Sinnesorgan, das durch intensive Lichtblitze leicht übersteuert werden kann. Die Reizverarbeitung im Gehirn kann danach auch bei gleicher mittlerer Intensität für Dauerlicht und einer Folge von Lichtblitzen sehr unterschiedlich ausfallen.

Zum Unterschied Mittelwert/Spitzenwert führen sie an:

Gepulste Wellen sind keine „Spitzen“ sondern durch Pausen unterbrochene hochfrequente Schwingungspakete, deren Ausbreitung und thermische Wirkung im Körper sich nicht von kontinuierlicher Strahlung unterscheidet. Nichtthermische Wirkungsmechanismen konnten bisher nicht belegt werden. Von „Stichen“ oder „Nadelstichen“ im Sinne einer Störung des Organismus kann daher keine Rede sein. Eine besondere biologische Wirkung gepulster Funkwellen konnte trotz großer Anstrengung in der Forschung nicht gefunden werden.

Prof. Leitgeb führt zusätzlich an, dass als entscheidende Voraussetzung für biologische Wirkungen auf den Organismus ein Energieübertragungsmechanismus vorhanden sein muss. Dieser kann z. B. in der elektromagnetischen Anregung von (Wasser-)Molekülen bestehen und sich in Erwärmung des Gewebes äußern. In diesem Fall ist nicht der Spitzenwert alleine, sondern der gesamte Zeitverlauf der elektromagnetischen Wellen maßgebend. Es kommt neben der (Puls-) Energie grundsätzlich darauf an, ob eine biologische Reaktion schnell genug erfolgt, um auf die Signaländerung reagieren zu können. Bei schneller Energieübertragung und genügend hoher Pulsenergie kann es durch die Erwärmung durchaus zu biologischen Effekten kommen (z. B. beim „Mikrowellenhören“ durch thermische Anregung akustischer Wellen im Innenohr). Aus diesem Grund wird bei der Festlegung von Grenzwerten auch die Energie von Einzelpulsen begrenzt.

Seiner Ansicht nach kann die gestellte Frage „hat der Strahlungs-Spitzenwert eine relevante biologische Bedeutung“ daher nur mit einem klaren „JEIN“ beantwortet werden.

Er fasst in drei Punkten zusammen, weshalb die Befürchtung „eine Pulsation könnte biologisch besonders wirksam sein“, auf schwachen Beinen steht:

- Es gibt kein belastbares physikalisches Modell, wie sich eine wirksame Pulsung von einer weniger wirksamen unterscheidet und warum daher das gepulste Fernsehsignal von anderen gepulsten Signalen aus biologischer Sicht zu unterscheiden wäre.
- Bei den Untersuchungen zu nicht-thermischen Effekten kann nicht aus-

geschlossen werden, dass es nicht doch zu lokalen Temperaturspitzen gekommen ist.

- Aus publizierten wissenschaftlichen Arbeiten ergibt sich ein uneinheitliches, ja widersprüchliches Bild, aus dem keine „Verurteilung“ der Pulsung abgeleitet werden kann.

These 2: Genaue Beweise für Schädigungen durch gepulste Strahlung unterhalb der Grenzwerte liegen bisher noch nicht vor. Es gibt aber zahlreiche Berichte über individuelle Betroffenheit und Gesundheitsschädigungen auch bei Werten unter dem gesetzlichen Grenzwert.

Prof. Kundi stellt fest, dass sich die Frage der biologischen Relevanz von Mittel- oder Spitzenwert auf der Basis des derzeitigen Wissensstandes nicht entscheiden lässt. Nicht einmal für die pro Zeiteinheit absorbierte Energie (spezifische Absorptionsrate, SAR) kann das klar entschieden werden, weil diese ebenfalls durch die Dynamik der Wärmedissipation (Temperaturausgleich) im Organismus beeinflusst wird.

Prof. Leitgeb und **Prof. Silny** stellen übereinstimmend fest, dass es in einer Vielzahl von wissenschaftlich geführten epidemiologischen Studien, mit einem hohen Grad an Standardisierung und großen Versuchsgruppen aus verschiedenen Ländern, bisher keine belastbaren Ergebnisse über gesundheitsrelevante Wirkungen pulsmodulierter Wellen unterhalb der bestehenden Grenzwerte gibt.

Prof. Leitgeb betont aber: „Dies bedeutet jedoch keinen Freibrief für die unkontrollierte Verbreitung bestehender und die Einführung neuer Technologien“. Er weist darauf hin, dass die Strahlenschutzkommission die Entwicklung neuer Technologien mit dem Ziel verfolgt, noch vor der Markteinführung eine Bewertung durchzuführen und gegebenenfalls begleitende Maßnahmen zu empfehlen.

These 3: Bei gepulsten Funkwellen werden aufgrund der raschen Änderungen der Amplitude verstärkt Körperströme ausgelöst.

Dr. Oberfeld hält eine stärkere biologische Relevanz gepulster Signale mit einer

schnellen Änderung der Leistungsamplitude gegenüber kontinuierlichen Signalen für möglich.

Zitat: „Die Amplitudenänderung kann wie im Falle des DECT, GSM, UMTS, WLAN den gesamten Dynamikbereich (von 0 bis zur Spitze) umfassen und steilflankig sein. Dies führt im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Signal zu einem Anstieg der induzierten Körperströme.“

Prof. Silny hält dem entgegen: „Die Pulsation einer Funkwelle hat keinen Einfluss auf die augenblickliche Stärke der Körperströme, die bei Mikrowellen vor allem in den oberen Körperschichten aufgebaut werden“

Prof. Leitgeb argumentiert andererseits, dass die „Pulsung“ der Funkwellen nicht aus „Impulsen“, also Amplitudenspitzen besteht, sondern aus „Pulsen“, die aus einer Folge von hochfrequenten Schwingungspaketen mit jeweils über hunderttausend Wellenzügen bestehen, die sich nicht von kontinuierlicher Strahlung unterscheiden. Es kommt im Vergleich mit ungepulster Strahlung zu keiner rascheren Amplitudenänderung, da die hochfrequente (Sinus-)Welle der Wellenpakete vorwiegend im „Nulldurchgang“ eingeschaltet wird.

These 4: Gepulste Funkwellen weisen eine höhere Kohärenz und Eindringtiefe auf

Nach Ansicht von **Prof. von Klitzing** hat gepulste Strahlung auf Grund der kurzen Impuls-Zeiten eine höhere Kohärenz und dringt daher wesentlich tiefer in das Gewebe ein als nach dem „Skin“-Effekt zu erwarten wäre. Daher könne man mit dem DECT-Telefon auch in einem (abschirmenden) Faraday-Käfig noch telefonieren. Er fasst zusammen: „Das Biosystem reagiert auf die starke Signaländerung, das biologische Wirkungsmodell ist unbekannt.“

Prof. Leitgeb und **Prof. Silny** lehnen diese Ansicht klar ab.

Prof. Leitgeb betont, dass gepulste Funkwellen weder kohärenter als ungepulste Signale sind, noch deren Eindringtiefe von der Kohärenz abhängig ist, sondern von der Absorption im Gewebe bestimmt

wird, die wiederum (im Wesentlichen) mit zunehmender Frequenz zunimmt.

Prof. Silny weist darauf hin, dass gepulste Funkwellen nicht tiefer in das Gewebe eindringen als kontinuierliche Wellen gleicher Frequenz, zudem sei: „der Begriff der höheren Kohärenz der Strahlung beim Spektrum von Frequenzen in Bezug auf gepulste Funkwellen des Mobilfunks falsch verwendet“.

Anmerkung zum Skineffekt:

Unter dem Skineffekt versteht man das besondere Verhalten von hochfrequenten Feldern in Materialien.

Hier kann man zwei sehr unterschiedliche Materialien betrachten. Einmal gibt es Leiter, die sich durch sehr hohe elektrische Leitfähigkeit und ganz geringe Verluste auszeichnen, sie dienen daher u. a. zum Energietransport. Hier wird bei sehr hohen Frequenzen der HF-Strom längs eines Leiters nach außen gedrängt, so dass er sich in der „Außenhaut“ (skin = engl. Haut) des Leiters konzentriert und hauptsächlich dort fließt. Im Gegensatz dazu gibt es Stoffe mit geringer Leitfähigkeit und mit hohen Verlusten. In ihnen herrscht die Absorption der Energie (Umwandlung in Wärme) vor. Auch biologisches Gewebe ist physikalisch gesehen ein solches „verlustbehaftetes Medium“. Durch die Umwandlung in Wärme verliert die Welle also immer mehr Energie und kann daher nicht beliebig tief eindringen. Diese Dämpfung der Welle ist von der Frequenz abhängig, je höher die Frequenz, desto höher die Dämpfung, desto weniger weit kann die Welle eindringen. Hier – und in der EMF-Diskussion generell – steht der Skineffekt für die Eindringtiefe.

Anmerkung zum Faraday'schen Käfig:

Definitionsgemäß ist ein Faraday'scher Käfig ein elektrisch dicht abgeschirmtes Gehäuse, in das kein elektrisches Feld eindringen kann. Eindringen und Verlassen elektromagnetischer Strahlung ist über diese Barriere nicht möglich. Geschieht es dennoch, liegt keine vollständige Abschirmung vor. In diesem Fall erhält man nur eine Dämpfung des elektromagnetischen Feldes, ein Funkkontakt mit einem Handy im Inneren ist evtl. aber noch möglich. Ein Beispiel findet man beim Eisenbahnwaggon. Wer aus einem Zug mit dem Handy telefoniert hat, der weiß, dass es mehr oder weniger funktioniert,

auch wenn die Scheiben metallisiert sind. Eindringende hochfrequente elektromagnetische Felder werden stark gedämpft (abhängig von ihrer Frequenz), aber nicht „ausgesperrt“. Möglicherweise ist das Wandmaterial oder sind die Fenster des Waggons aus der Sicht elektromagnetischer Abschirmung also nicht vollkommen „dicht“.

These 5: Gepulste Wellen schädigen das Immunsystem und beeinflussen die Signalverarbeitung im Gehirn und in den Nervenbahnen. Die digitalen Pulse liegen auf der Eigenschwingungsfrequenz der menschlichen Nervenzellen.

Prof. Silny weist darauf hin, dass nach heutiger Kenntnis weder Schädigungen des Immunsystems noch Einflüsse auf die Signalverarbeitung in Nerven oder Gehirn möglich sind:

Die elektrischen Signale der Nerven und Muskeln sind Begleiterscheinungen ihrer Erregung. Sie weisen eine bestimmte Form und häufig eine niederfrequente Wiederholung auf, die fälschlicherweise als „Eigenschwingungsfrequenz“ bezeichnet wird.

Die gepulsten Funkwellen des Mobilfunks nutzen Frequenzen, die mehr als millionenfach höher liegen als typische Erregungszyklen von Nerven und Muskeln. Schon deshalb können sie Nerven- und Muskelaktivität auf nichtthermischem Wege nicht beeinflussen. Vereinzelt Beobachtungen geringer Variationen der bioelektrischen Hirnaktivität (Elektroenzephalogramm – EEG) unter Einwirkung von Mobilfunkfeldern konnten nicht mit schädlichen Einflüssen einer Körperfunktion in Zusammenhang gebracht werden.

Prof. Leitgeb schränkt diese Aussagen dahingehend ein, dass Untersuchungen widersprüchliche Ergebnisse erzielt haben und daher derzeit keine belastbaren Aussagen über mögliche Schädigungen erlauben. Er erläutert weiter, dass Funkwellen keine „Impulse“ im Sinne von Amplitudenspitzen enthalten, sondern „Pulse“, also einzelne Schwingungspakete. Digital ist nicht die Welle an sich, sondern die darin enthaltene Information. Bei Nervenzellen messbare niederfrequente Signalanteile (z. B. im EEG) sind keine

„Eigenschwingungen“, sondern Begleitscheinungen ihrer Erregung. Von den Zellen des Sinusknotens abgesehen, besitzen Nervenzellen keine „Eigenfrequenz“.

These 6: Niederfrequent gepulste Hochfrequenzsignale erzeugen im Organismus einen biologisch besonders wirksamen „Frequenzcocktail“.

Nach Aussage von Prof. Silny entstehen durch niederfrequent gepulste Funkwellen im Körper nur hochfrequente Felder, aber kein Frequenzcocktail mit möglicherweise niederfrequenten Anteilen.

Prof. Leitgeb führt dazu weiter aus, dass der Analogieschluss aus der Rundfunktechnik nicht zutrifft, wonach auch im Körper die niederfrequenten Signalanteile von den als Trägerwellen benutzten hochfrequenten Mikrowellen getrennt werden könnten. Dies funktioniere deshalb nicht, da der Organismus nicht über die zur Trennung der Frequenzanteile notwendigen nichtlinearen Demodulationsmechanismen verfüge.

Zum Schluss der IZGMF-Umfrage wird von Prof. Leitgeb folgendes Fazit gezogen: *Zusammenfassend gibt es daher keine belastbaren Daten, aus denen Kriterien abgeleitet werden könnten, dass und ab welchen Eigenschaften eine Pulsung eine größere gesundheitliche Relevanz besitzt als ein anderes Signal mit gleichem Mittelwert.*

Abschließend wird vom IZGMF als weiterführende Information auf eine Ausarbeitung von Prof. Silny hingewiesen, die er unter dem Titel „Gepulste Funkwellen, Wirkungsmechanismen niederfrequent gepulster Mikrowellen im Organismus“ im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Januar 2004) erstellt hat. Sie wird unter der URL <http://www2.lubw.baden-wuerttemberg.de/> zum Download angeboten.

Er betrachtet in dieser Broschüre grundlegende Wirkungsmechanismen im Organismus, bei denen eine Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern denkbar wäre. Insbesondere durch den Vergleich der Einwirkungszeiten der elektromagnetischen Halbwellen im Organismus mit der Dauer biologischer Prozesse sieht er jedoch keine plausiblen biophysikalischen Wirkungsmechanismen für elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich und hält daher nichtthermische Wirkungen gepulster Hochfrequenzfelder für sehr unwahrscheinlich.

5 Forschungsergebnisse, Normung und Schutz, Perspektiven

In den bisherigen Abschnitten dieses Buches sind bereits einige Experten zu Wort gekommen, die aus ihrer fachlichen Sicht die Zusammenhänge und Hintergründe zum Thema dargestellt haben. Dabei ist deutlich geworden, dass unterstellte Nebenwirkungen des Mobilfunks weltweit mit großer Aufmerksamkeit verfolgt werden, eine große Anzahl an Forschungsergebnissen vorliegt und Konsequenzen auf der Basis dieses Erkenntnisstandes gezogen werden.

Dieser Abschnitt soll dazu dienen, einen Überblick zu geben über diese Konsequenzen, die sich sowohl in der internationalen Normungsarbeit wiederfinden als auch als zusammenfassende fachkundige Aussagen im Namen nationaler und internationaler Expertenkommissionen veröffentlicht sind. Demnach besteht Einigkeit, dass bisher keine Gesundheitsschädigung durch Mobilfunkfelder innerhalb der geltenden Grenzwerte wissenschaftlich nachweisbar ist. Besonderheiten gepulster Signale werden dabei nicht herausgestellt.

Alle wissenschaftlich orientierten Aussagen beinhalten aber auch, dass die Forschung nicht abgeschlossen ist und sein kann, da es unmöglich ist, mit wissenschaftlichen Mitteln die Nichtexistenz eines Effektes nachzuweisen. Trotz der vielen im Sinne medizinischer Diagnose negativen Forschungsergebnisse gibt es daher immer noch unterschiedliche Folgerungen unter den Experten.

5.1 Aufgabe der nationalen und internationalen Normung

Reinhold Wehner

Auch wenn die Nutzung der Mobilfunkkommunikation, besonders des Mobiltelefons, prinzipiell in der Bevölkerung akzeptiert ist, wird das Thema Strahlungsexposition von Mobilfunkgeräten und Basisstationen emotional und kontrovers diskutiert. Hintergrund ist die Skepsis um technische Neuerungen im Allgemeinen und deren Beurteilung in Bezug auf potenzielle Gesundheitsrisiken im Besonderen. Im Kontext kommt sowohl der Wissenschaft als auch den nationalen und internationalen Standardisierungsgremien eine besondere Bedeutung zu. Im Mobilfunkbereich werden seit den 80er Jahren die Ergebnisse von nationaler und internationaler Forschung in Normen und Grenzwerte mit dem Ziel umgesetzt, eine Gefährdung des Menschen durch elektromagnetische Strahlung nach menschlichem Ermessen auszuschließen.

Hierbei agieren internationale Gremien, wie die ICNIRP (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection), internationale Organisationen wie die WHO (World Health Organisation), der Europäische Rat, Standardisierungsgremien und die (IEC) International Electrotechnical Commission, ETSI (European Telecommunications Standards Institute) oder CEN/CENELEC (Comité Européen de Normalisation/Comité Européen de Normalisation Electrotechnique).

Bei der Festlegung von Immissionsgrenzwerten sind eine Reihe unterschiedlicher Expertenauffassungen miteinander in Einklang zu bringen. Forschungsberichte müssen geprüft und die Wirkung auf den Menschen aus Tierversuchen abgeleitet werden. Aufgrund der verfügbaren Kenntnisse und der hieraus abgeleiteten Grenzwerte kann dann ein geeigneter Schutz vor der Exposition durch zeitlich veränderliche EMF definiert werden.

Wie das im Einzelnen funktioniert, erklärt der entsprechende Beitrag.

Internationale Normung

Internationale Gremien, wie z. B. die ICNIRP (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection), haben es sich zur Aufgabe gemacht, kontinuierlich die aktuellen Forschungsaktivitäten zu beobachten und aus den Ergebnissen Grenzwerte für den Bereich der Mobilfunkkommunikation abzuleiten. Internationale Organisationen wie die WHO (World Health Organisation), der Europäische Rat oder Standardisierungsgremien und die (IEC) International Electrotechnical Commission, ETSI (European Telecommunications Standards Institute) oder CEN/CENELEC (Comité Européen de Normalisation/Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) stützen sich auf diese Empfehlungen ab. Die IEC ist das internationale Normungsgremium für Normen im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik mit Sitz in Genf. Der durch die IEC abgedeckte Normungsbereich umfasst die gesamte Elektrotechnik, einschließlich Erzeugung und Verteilung von Energie, Elektronik, Magnetismus und Elektromagnetismus, Elektroakustik, Multimedia und Telekommunikation, sowie auch allgemeine Disziplinen wie Fachwortschatz und Symbole, elektro-

magnetische Verträglichkeit, Messtechnik und Betriebsverhalten, Zuverlässigkeit, Design und Entwicklung, Sicherheit und Umwelt.

Bei der Festlegung von Immissionsgrenzwerten sind eine Reihe unterschiedlicher Expertenauffassungen miteinander in Einklang zu bringen. Forschungsberichte müssen geprüft und die Wirkung auf den Menschen aus Tierversuchen abgeleitet werden. Auf Basis der zur Zeit vorhandenen wissenschaftliche Daten geht man davon aus, dass die verfügbaren Kenntnisse und die hieraus abgeleiteten Grenzwerte einen geeigneten Schutz vor der Exposition durch zeitlich veränderliche EMF darstellen. Grenzwerte werden in Basisgrenzwerte und Referenzwerte unterteilt. So werden Auswirkungen, die durch zeitlich veränderliche, elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder verursacht werden und sich nachweislich direkt oder aufgrund biologischer Erwägungen auf die Gesundheit auswirken, als Basisgrenzwerte bezeichnet. Je nach der Feldfrequenz dienen als physikalische Größen zur Angabe dieser Grenzwerte die magnetische Flussdichte (B), die Stromdichte (J), die spezifische Energie-

absorptionsrate (SAR) und die Leistungsdichte (S). Magnetische Flussdichte und Leistungsdichte können am exponierten Menschen problemlos gemessen werden. In **Tabelle 1** sind die entsprechenden Grenzwerte aufgelistet. Unterschieden wird dabei zwischen der Exposition der Bevölkerung und beruflich bedingter Exposition.

Referenzwerte dienen bei der praktischen Expositionsbewertung zur Beurteilung der Frage, ob die Basisgrenzwerte sicher eingehalten werden können. Einige Referenzwerte sind von einschlägigen Basisgrenzwerten mittels Mess- und/oder Rechenverfahren abgeleitet, andere berücksichtigen die Wahrnehmung und schädlichen indirekten Wirkungen der EMF-Exposition. Die abgeleiteten Größen sind elektrische Feldstärke (E), magnetische Feldstärke (H), magnetische Flussdichte (B), Leistungsdichte (S) und Strom durch die Gliedmaßen (IL).

Die Einhaltung des Referenzwertes gewährleistet die Einhaltung des entsprechenden Basisgrenzwerts. Überschreitet der Messwert den Referenzwert, so bedeutet dies noch nicht notwendiger-

Frequenzbereich	Stromdichte für Kopf und Rumpf (mA/m ²)	Durchschnittliche Ganzkörper SAR (W/kg)	Lokale SAR (Kopf und Rumpf) (W/kg)	Lokale SAR Gliedmaßen (W/kg)	Leistungsflussdichte (W/m ²)
bis 1 Hz	8	–	–	–	–
1 Hz – 4 Hz	8 / f	–	–	–	–
4 Hz – 1 kHz	2	–	–	–	–
1 kHz – 100 kHz	f / 500	–	–	–	–
100 kHz – 10 MHz	f / 500	0,08	2	4	–
10 MHz – 10 GHz	–	0,08	2	4	–
10 GHz – 300 GHz	–	–	–	–	10

Tabelle 1a: Basisgrenzwerte (Exposition der Bevölkerung) für zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder bei Frequenzen bis zu 300 GHz

Frequenzbereich	Stromdichte für Kopf und Rumpf (mA/m ²)	Durchschnittliche Ganzkörper SAR (W/kg)	Lokale SAR (Kopf und Rumpf) (W/kg)	Lokale SAR Gliedmaßen (W/kg)	Leistungsflussdichte (W/m ²)
bis 1 Hz	40	–	–	–	–
1 Hz – 4 Hz	40 / f	–	–	–	–
4 Hz – 1 kHz	10	–	–	–	–
1 kHz – 100 kHz	f / 100	–	–	–	–
100 kHz – 10 MHz	f / 100	0,4	10	20	–
10 MHz – 10 GHz	–	0,4	10	20	–
10 GHz – 300 GHz	–	–	–	–	50

Tabelle 1b: Basisgrenzwerte (Berufliche Exposition) für zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder bei Frequenzen bis zu 300 GHz

weise die Überschreitung des Basisgrenzwerts. Es ist dann jedoch nachzuprüfen, ob der Basisgrenzwert eingehalten wird. Ein Überblick über die Referenzwerte enthält die **Tabelle 2**. Einige Größen wie die magnetische Flussdichte (B) und die Leistungsdichte (S) dienen bei bestimmten Frequenzen gleichzeitig als Basisgrenzwerte und Referenzwerte.

Europäische Normung

Wesentliche Aufgabe von CENELEC ist die Umsetzung der IEC Normen in europäische

Normen. Rund 85 % der europäischen Normen basieren auf IEC-Normen oder sind mit ihnen identisch. Ein weiterer Eckpfeiler sind Normungsthemen, die auf europäische Belange ausgerichtet sind. Das europäische Normungsinstitut ETSI ist für Normungsbefugnisse im Bereich der Telekommunikation inklusive Randgebieten wie Rundfunk und Informationstechnik zuständig. Durch Schaffung des europäischen Binnenmarktes wurden weite Bereiche der eigenständigen nationalen Normung aufgegeben. Deutsche Normen

werden daher weitestgehend in den internationalen Normungsgremien erarbeitet, wobei die deutsche Position in den entsprechenden Gremien eingebracht wird. Rein nationale Normen wurden und werden kontinuierlich durch Europäischen Normen ersetzt.

Die Normen entstehen u. a. auf Basis von Vorschlägen interessierter Fachkreise über die nationalen Normungsinstitute direkt bei CEN bzw. CENELEC oder aber als Übernahme internationaler Normen wie der ISO (International Standardisation Organisation und/oder IEC). So werden z. B. alle Normenentwürfe der IEC auch bei CENELEC zur Kommentierung bzw. Annahme gestellt. Die von CENELEC ratifizierten Normen müssen von allen Mitgliedern als identische nationale Normen übernommen werden. Die EU-Ratsempfehlungen vom Juni 1992 und Oktober 1999 stellen Aufgaben und Bedeutung der Normungsarbeit deutlich heraus. Hierbei liegt der Fokus auf Transparenz der Normen und deren Unabhängigkeit von Einzelinteressen. Der Rat der Europäischen Union orientiert sich in seiner Empfehlung von 1999 (1999/519/EG) an den ICNIRP-Grenzwerten. Ziel der Europäischen Union ist es, grundlegende Sicherheitsverfahren in EU-Richtlinien festzulegen, bei der technischen Konkretisierung aber auf europäische Normen zu verweisen. Damit können Hersteller, Anwender, Behörden etc. an der konkreten Umsetzung im Rahmen der Normungsarbeit mitwirken.

Deutsche Normung

In Deutschland gilt die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) vom 16. Dezember 1996). Hochfrequenz- und Niederfrequenzanlagen, die neu errichtet oder betrieben werden und gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden und nicht einer Genehmigung nach § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes bedürfen, müssen den Anforderungen dieser Verordnung genügen. Sie dient der Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder (§ 1 der 26. BImSchV) und enthält rechtsverbindliche Grenzwerte für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen. Mitte 1996 wurden von der ICNIRP international anerkannte Grenz-

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V/m)	Magnetische Feldstärke (A/m)	Magnetische Flussdichte (µT)	Äquivalente Leistungsdichte bei ebenen Wellen (W/m²)
bis 1 Hz	–	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	–
1 Hz – 8 Hz	10000	3,2 x 10 ⁴ / f ²	4 x 10 ⁴ / f ²	–
8 Hz – 25 Hz	10000	4000 / f	5000 / f	–
25 Hz – 800 Hz	250 / f	4 / f	5 / f	–
800 Hz – 3 kHz	250 / f	5	6,25	–
3 kHz – 150 kHz	87	5	6,25	–
150 kHz – 1 MHz	87	0,73 / f	0,92 / f	–
1 MHz – 10 MHz	87 / √f	0,73 / f	0,92 / f	–
10 MHz – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 MHz – 2 GHz	1,375 x √f	0,0037 x √f	0,0046 x √f	f / 200
2 GHz – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabelle 2a: Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder (ungestörte Effektivwerte)

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V/m)	Magnetische Feldstärke (A/m)	Magnetische Flussdichte (µT)	Äquivalente Leistungsdichte bei ebenen Wellen (W/m²)
bis 1 Hz	–	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	–
1 Hz – 8 Hz	20000	1,63 x 10 ⁵ / f ²	2 x 10 ⁵ / f ²	–
8 Hz – 25 Hz	20000	2 x 10 ⁴ / f	2,5 x 10 ⁴ / f	–
25 Hz – 820 Hz	500 / f	20 / f	25 / f	–
820 Hz – 65 kHz	610	24,4	30,7	–
65 kHz – 1 MHz	610	1,6 / f	2,0 / f	–
1 MHz – 10 MHz	610 / f	1,6 / f	2,0 / f	–
10 MHz – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 MHz – 2 GHz	3 x √f	0,008 x √f	0,01 x √f	f / 40
2 GHz – 300 GHz	137	0,36	0,45	50

Tabelle 2b: Referenzwerte für die berufliche Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder (ungestörte Effektivwerte)

werte zum Betrieb von Basisstationen und Handys genannt. Diese Werte sind als verbindliche Werte in die 26. BImSchV eingeflossen.

Die Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE) ist die Organisation, die in Deutschland für die Erarbei-

tung nationaler und internationaler Normen und Bestimmungen auf dem gesamten Gebiet der Elektrotechnik in zuständig ist. Diese Normen bilden den Maßstab für ein mit Fokus auf sicherheitstechnische Aspekte ausgerichtetes einwandfreies technisches Handeln und werden auf Basis aktuell anerkannter

Regeln erstellt. Man unterscheidet drei unterschiedliche Normentypen:

- Grundnormen (Basic Standards)**
 In den Grundnormen sind die Anforderungen und Messverfahren an die einzelnen EMV-Prüfungen beschrieben. Die Grundnormen enthalten Grenzwerte in Form unterschiedlicher Schärfegrade, die Basis für spezialisierte Produkt- bzw. Fachgrundnormen sind. Sie garantieren die Reproduzierbarkeit der Resultate auch an anderen Messorten. Als Beispiel sei die DIN EN 50361 (VDE 0848-361): 2002-06 „Grundnorm zur Messung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) in Bezug auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen (300 MHz bis 3 GHz)“ angeführt.

- Fachgrundnormen (Generic Standards)**
 In den Fachgrundnormen werden die Anforderungen an Produkte in ihrem Einsatz in bestimmten elektromagnetischen Umgebungen auf der Grundlage der Basic Standards festgelegt. Die Fachgrundnormen müssen immer dann herangezogen werden, wenn es für die betreffenden Produkte keine Produktnormen gibt oder wenn in der Produktnorm die EMV-Anforderung nicht spezifiziert sind, wie sie in der DIN EN 50371 (VDE 0848-371):2002-11 „Fachgrundnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von elektronischen und elektrischen Geräten kleiner Leistung mit den Basisgrenzwerten für die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (10 MHz bis 300 GHz) – Allgemeine Öffentlichkeit“ festgelegt sind.

- Produktnormen (Product Standards)**
 Produktnormen oder Normen für Produktfamilien beschreiben spezifische Mess- und Berechnungsverfahren, die anzuwenden sind, um Produkte auf Einhaltung von Grenzwerten zu überprüfen, wie z.B. die DIN EN 50360 (VDE 0848-360):2002-05 „Produktnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von Mobiltelefonen mit den Basisgrenzwerten hinsichtlich der Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (300 MHz – 3 GHz)“

Die Kopplung zwischen Normen, Gesetz und Recht ist im Normenwerk zwischen der Bundesrepublik Deutschland und dem DIN am 28.1.1989 festgesetzt worden.

5.2 Wie bewertet ICNIRP gepulste elektromagnetische Felder?

Jürgen Helmut Bernhardt, Vorwort von Fred-Jürgen Breit

Die Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierenden Strahlen (ICNIRP) befasst sich in kurzen Abständen mit der Thematik und nimmt auf der Basis der verfügbaren aktuellen Forschungsergebnisse Stellung zur gesundheitlichen Problematik, gibt Empfehlungen ab und veröffentlicht sie. Sie tut das auf internationaler Ebene und ist das Beratergremium (Expertengremium) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) wie auch der EU; auf der nationalen Ebene ist es in Deutschland die Strahlenschutzkommission (SSK). Die ICNIRP wurde 1992 während eines internationalen Strahlenschutz-Kongresses gegründet und ist international als unabhängiges Fachgremium anerkannt.

Professor Dr. Jürgen Bernhardt ist über viele Jahre (1992-2004) Mitglied dieser Kommission gewesen, davon 1996 – 2000 als Vorsitzender und 2000-2004 als stellvertretender Vorsitzender. Darüber hinaus war er langjähriger Mitarbeiter des Bundesamtes für Strahlenschutz und des Institutes für Strahlenhygiene. Auf beiden Ebenen hat er sich immer wieder mit den gesundheitlichen Aspekten nicht nur des Mobilfunks, sondern auch der nieder- und hochfrequenten elektromagnetischen Felder befasst.

Damit kommen die nachfolgenden gesundheitlichen Bewertungen der ICNIRP zu gepulster HF und NF wirklich aus allererster Hand.

Vorauszuschicken ist noch eine Anmerkung:

Im Bereich der EMVU hat man die Grenze zwischen Nieder- und Hochfrequenz bei 100 kHz gezogen, weil in den zwei Bereichen unterschiedliche Effekte vorherrschen. Unterhalb dieser Grenze sieht man die Stromdichte als wirksame Größe an, darüber den Energieeintrag. Beides kommt in den Basisgrenzwerten zum Ausdruck.

In der Funktechnik spricht man ab 30 kHz (oder noch darunter) von Hochfrequenz, weil sie sich dort bereits als Trägerfrequenz für aufmodulierte Übertragungsinformationen nutzen lässt. Es handelt sich hier um keine mit Zahlenwert definierte Grenze.

Basisgrenzwerte für den Niederfrequenz- und den Hochfrequenzbereich

Die Basisgrenzwerte der ICNIRP basieren auf dem gesicherten Wissen über akute gesundheitliche Beeinträchtigungen unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren; sie stellen die Obergrenze des sicheren Bereiches dar, innerhalb dessen keine gesundheitlich nachteiligen Wirkungen auftreten. Die wissenschaftlichen Grundlagen bei der Entwicklung der Basisgrenzwerte sind frequenzspezifisch.

Im Niederfrequenzbereich (< 100 kHz) folgt die Frequenzabhängigkeit derjenigen für die Stimulation von Nerven- und Muskelzellen. In Anbetracht der Schwellenwerte für Magnetophosphene und der Erregbarkeit neuronaler Netzwerke wurde für den Frequenzbereich von 4 Hz bis zu 1 kHz der Basisgrenzwert von 10 mA/m² für den Arbeitsplatz festgelegt. Unter 4 Hz und über 1 kHz nimmt der Basisgrenzwert für die induzierte Stromdichte entsprechend dem Anstieg der

Schwelle für die Nervenstimulation allmählich zu. Die Basisgrenzwerte für die Bevölkerung sind unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Reduktionsfaktors von 5 aus den Arbeitsplatzwerten abgeleitet.

Für hochfrequente elektromagnetische Felder (> 100 kHz) spielen Reizwirkungen allenfalls in einem Übergangsbereich bis 10 MHz unter speziellen Bedingungen (hohe Pulsfeldstärken bei geringer durchschnittlicher Feldintensität) eine Rolle; ansonsten stehen thermische Wirkungen im Vordergrund. Der Grund für die abnehmende Bedeutung der „nichtthermischen“ Reizwirkungen liegt unter anderem darin, dass oberhalb 100 kHz mit zunehmender Frequenz die Zellmembran immer mehr kapazitiv überbrückt wird und ihre Bedeutung als kritisches Zielorgan verliert. Andere gut untersuchte nichtthermische Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder (z. B. Perlschnurkettenbildung biologischer Zellen, Elektrorotation von Zellen, Dielektrophorese) erfordern sehr

hohe Feldstärken (> 10 kV/m) für ihre Auslösung und sind nur bei Ausschaltung der Gewebeerwärmung experimentell nachweisbar. Unter normalen physiologischen Bedingungen kommt es bei Exposition durch starke elektromagnetische Felder in erster Linie zu erheblichen Gewebeerwärmungen, welche die oben erwähnten nichtthermischen Wirkungen völlig überdecken. Wie Sauer und Schlögl [7] zeigen konnten, sind gepulste Felder hier nicht wirksamer. Somit sind thermische Wirkungsmechanismen im Hochfrequenzbereich die kritischen Mechanismen mit der niedrigsten Schwelle für Gesundheitsbeeinträchtigungen; diese sind daher für die Grenzwertfestlegung maßgebend.

Sie führten im Frequenzbereich von 100 kHz bis 10 GHz bei beruflicher Exposition zur Empfehlung folgender Basisgrenzwerte der spezifischen Absorptionsrate (SAR): 0,4 W/kg (Ganzkörper), 10 W/kg (lokale SAR, Kopf und Rumpf), 20 W/kg (lokale SAR, Gliedmaßen). Für die lokale

Exposition des Kopfes bei 0,3-10 GHz wird für gepulste Felder als zusätzlicher Basisgrenzwert die spezifische Absorption (SA) von 10 mJ/kg empfohlen. In allen Fällen ist über jeweils 6 min zu mitteln; die zu mittelnde Gewebemasse für lokale SAR-Werte beträgt 10 g ([1], **Tabelle 4**, Anm. 5-7). Im darüber liegenden Frequenzbereich von 10-300 GHz gilt die Begrenzung der Leistungsdichte von 10 W/m². Auch im Hochfrequenzbereich sind die Basisgrenzwerte für die Bevölkerung unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Reduktionsfaktors von 5 aus den genannten Arbeitsplatzwerten abgeleitet.

Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder

Elektrische Felder. Die elektrische Feldstärke an der Körperoberfläche bewirkt eine mit der Frequenz wechselnde Aufladung der hochohmigen Behaarung des Körpers. Zwischen den Haaren und der Hautoberfläche werden Kräfte wirksam, die eine Vibration des Haarschaftes anregen und die über Berührungsrezeptoren in der Haut wahrgenommen werden können. Durch die starke Feldüberhöhung an der Körperoberfläche kann es auch zu einem wahrnehmbaren Kribbeln zwischen Kleidung und Haut sowie zur direkten Stimulation von peripheren Rezeptoren der Haut kommen.

Von indirekten Wirkungen wird gesprochen, wenn es bei Annäherung an aufgeladener Gegenständen zu Funkenentladungen kommt oder ein Entladungsstrom über den Körper zur Erde abfließt, zum Beispiel beim Berühren von leitfähigen Objekten wie Fahrzeugen oder Metallteilen, die sich in starken elektrischen Feldern befinden. Die Auswirkungen können von der leichten Wahrnehmung bis zu einem schmerzhaften Funkenüberschlag reichen. Die Schwellenströme, die als indirekte Wirkungen niederfrequenter Felder bei Berührung leitfähiger Objekte entstehen, sind stark frequenzabhängig und gut untersucht.

Die Schwellenwerte für die Stimulation für erregbare Zellen und für Beeinträchtigungen des Zentralnervensystems bilden die Grundlage für die Ableitung der Basisgrenzwerte von ICNIRP unter Berücksichtigung von Reduktionsfaktoren („Sicherheitsfaktoren“).

Oberhalb von 1 kHz nehmen die Schwellenwerte für Reizwirkungen zu. Elektrophysiologische Erkenntnisse zeigen, dass für die Stimulation im erregbaren Gewebe durch sinusförmige Feld- oder Stromformen nicht die effektiven Werte der Signale, sondern die Spitzenwerte der jeweiligen Felder entscheidend sind. Dies hat ICNIRP in den Grenzwertempfehlungen von 1998 [1] berücksichtigt. Im Bereich unter 100 kHz können die Spitzenwerte für die Basiswerte der Stromdichten erhalten werden, indem die Effektivwerte mit $\sqrt{2}$ ($\sim 1,4142$) multipliziert werden (vgl. auch Fußnote 3 in Tabelle 4 der ICNIRP-Empfehlungen).

Magnetische Felder. Wirken magnetische Felder auf den Menschen ein, kommt es im Organismus zur Induktion von Wirbelströmen, die vergleichbar der mit Elektroden applizierten elektrischen Feldstärken oder Stromdichten wirken, das heißt, sie können bei Überschreitung bestimmter Schwellenwerte Nerven- und Muskelzellen erregen. Bei Freiwilligen äußerten sich die am meisten konsistenten Auswirkungen der Exposition im Auftreten visueller Phosphene. Die Schwellenwerte liegen oberhalb von 50 mV/m, bzw. 10 mA/m² bei einer Frequenz um 20 Hz. Veränderungen der Erregbarkeit des zentralen Nervensystems und neuronaler Netzwerke können oberhalb von 50-100 mV/m bzw. 10-20 mA/m² zwischen 10 Hz und 1 kHz auftreten. Bei Körperstromdichten in Bereichen von 100-1000 mA/m² können die Reizschwellen im erregbaren Gewebe erreicht werden. Einzelne Nerven- und Muskelzellen können mit elektrischen Feldern oberhalb einiger V/m oder A/m² stimuliert werden. Oberhalb von 1 kHz nehmen die Schwellenwerte für Reizwirkungen zu. Diese Daten bilden die Grundlage für die Ableitung der Basisgrenzwerte von ICNIRP unter Berücksichtigung von Reduktionsfaktoren („Sicherheitsfaktoren“).

Bewertung gepulster sinusförmiger Signale bei ICNIRP 1998

Elektrophysiologische Erkenntnisse zeigen, dass für die Stimulation im erregbaren Gewebe durch sinusförmige Feld- oder Stromformen nicht die effektiven Werte der Signale, sondern die Spitzenwerte der jeweiligen Felder entscheidend sind. Dies hat ICNIRP in den Grenzwertempfehlungen von 1998 [1] berücksich-

tigt. Im Bereich unter 100 kHz können die Spitzenwerte für die Stromdichten erhalten werden, indem der Effektivwert mit $\sqrt{2}$ multipliziert wird (vgl. auch Fußnote 3 in Tabelle 4 der ICNIRP-Empfehlungen [1]). Für Pulse der Dauer t_p sollte die auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f = 1/(2t_p)$ ermittelt werden. Für gepulste Magnetfelder können für Frequenzen bis 100 kHz die mit den Pulsen verbundenen maximalen Stromdichten aus den Anstiegs- und Abfallzeiten sowie der maximalen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte berechnet werden. Die induzierte Stromdichte lässt sich dann mit den entsprechenden Basisgrenzwerten vergleichen. Bei einer gleichzeitigen Exposition durch Felder mit mehreren Frequenzen wird die Bewertung durch Anwendung von Summenformeln durchgeführt (Gleichungen 5, 7 und 8 in den ICNIRP-Empfehlungen von 1998).

Bewertung komplexer nicht-sinusförmiger Signalformen bei ICNIRP 2003

Im Haushalt, Büro, Industrie, Handel und Gewerbe treten heute nicht nur die konventionellen niederfrequenten elektromagnetischen Felder auf, die von den Leitungen der elektrischen Energieversorgung und den Verbrauchern ausgehen und überwiegend sinusförmige Felder erzeugen. Vielmehr kommen moderne Geräte und Systeme zum Einsatz, die neuartige elektromagnetische Felder erzeugen. So bauen z. B. leistungsgesteuerte elektrische Verbraucher Felder mit einem großen Frequenzbereich auf. Andere Geräte, z. B. Induktionskochplatten, arbeiten direkt im Mittelfrequenzbereich um 50 kHz.

Elektrische und magnetische Felder können aus einer Frequenzkomponente bestehen, oder das Spektrum kann aus vielen Frequenzen bestehen, wobei die Phasen kohärent oder nicht-kohärent sein können. Die Signalformen können komplex sein und bestehen häufig aus einzelnen Pulsen. Das von ICNIRP in ihren Empfehlungen von 1998 angewandte Verfahren bestand darin, eine Spektralanalyse durchzuführen und jede Frequenzkomponente mit dem jeweiligen Grenzwert bei dieser Frequenz zu vergleichen. Das Expositionsverhältnis ist dabei definiert als Verhältnis der spektralen Exposition zum jeweiligen Grenzwert bei einer bestimmten Frequenz, wobei die Summe dieser Verhältnisse den Wert 1 nicht über-

schreiten darf. Es stellte sich heraus, dass die Anwendung dieser Summenformel bei komplexen Signalformen mit unterschiedlichen Phasenanteilen zu konservativ war.

Gepulste und komplexe nicht-sinusförmige Signalformen erforderten daher ein neues, weniger konservatives Bewertungsverfahren. ICNIRP hat dazu 2003 eine Stellungnahme veröffentlicht [2].

Die verwendete Methode ist besonders nützlich für niederfrequente Magnetfelder. Bei dieser Methode wird die Feldstärke oder Stromdichte mit Hilfe eines einfachen Tiefpass- oder Hochpassfilters gewichtet, bei dem das Eingangs/Ausgangs-Verhältnis die Frequenzabhängigkeit der Stromdichte (Tiefpass) oder der magnetischen Flussdichte (Hochpass) approximiert. Das Ausgangssignal wird dann mit dem passenden Referenzwert oder Basisgrenzwert verglichen, die allerdings in die Spitzenwerte durch Multiplikation mit $\sqrt{2}$ umgerechnet werden müssen. Details können bei ICNIRP (2003) [2] oder bei der diesem Ansatz zugrunde liegenden Veröffentlichung von K. Jokela [3] nachgelesen werden.

Berücksichtigung gepulster und amplitudenmodulierter Wellenformen gepulster Hochfrequenzfelder

Verglichen mit CW-Strahlung sind gepulste Mikrowellenfelder mit derselben durchschnittlichen Energieabsorptionsrate im Gewebe im allgemeinen bei der Auslösung einer biologischen Reaktion wirksamer. Dies gilt insbesondere dann, wenn es sich um eine gut definierte Schwelle handelt, die überschritten werden muss, um die Wirkung auszulösen (ICNIRP 1996 [5]). Ein gut bekanntes Beispiel ist der „Mikrowellenhöreffekt“, beschrieben von Frey [4] und Lin [6]: Menschen mit normalem Hörvermögen können pulsmodierte Felder im Frequenzbereich zwischen etwa 200 MHz und 6,5 GHz wahrnehmen. Je nach den Modulationscharakteristika des Feldes wurde der Höreindruck als ein summennder, knackender oder klickender Ton beschrieben. Die Mikrowellenhöreffekte wurden einer thermoelastischen Wechselwirkung des auditiven Bereiches des Großhirns mit einer Wahrnehmungsschwelle von etwa 100-400 mJ/m² für Puls-längen von weniger als 30 μ s bei 2,45 GHz zugeschrieben (entspricht einer SA

von 4-16 mJ/kg). Wiederholte und längere Belästigung durch Mikrowellenhöreffekte können belastend oder möglicherweise schädlich wirken.

Es wurde berichtet, dass die Retina, die Iris und das Hornhautendothel des Primatenauges auf geringe Dosen gepulster Mikrowellenstrahlung empfindlich reagieren (WHO 1993 [9]). Bei Absorption so geringer Energiemengen wie 26 mJ/kg wurde über degenerative Veränderungen in den lichtempfindlichen Zellen der Retina berichtet; Bestätigungen stehen bis heute aus.

Es gibt weitere Berichte, dass die Schreckreaktion bei wachen Mäusen durch die Exposition mit intensiven gepulsten Mikrowellenfeldern unterdrückt wird und Bewegungen des Körpers hervorgerufen werden (Sienkiewics et al. [8]). Die für die Energieabsorption im Zwischenhirn spezifische Schwelle, ab welcher Körperbewegungen ausgelöst wurden, betrug 200 J/kg bei 10- μ s-Pulsen. Man nimmt an, dass der für diesen Effekt verantwortliche Mechanismus mit dem Mikrowellenhöreffekt in Verbindung steht. Andere Berichte über subtile Effekte nach Exposition durch amplitudenmodulierte Hochfrequenzfelder wie Kalzium-Bindung in Zelloberflächen, ODC-Aktivität oder zytotoxische Veränderungen beurteilte ICNIRP 1998 [1] kritisch: Die aufgezeigten Wirkungen seien so wenig gesichert und die Relevanz für die Gesundheit des Menschen so unsicher, dass es unmöglich ist, diese Daten als Grundlage für die Festsetzung von Grenzwerten für die Exposition des Menschen heranzuziehen.

Begrenzung gepulster Hochfrequenzfelder durch ICNIRP

Obwohl nur wenige Informationen über die Beziehung zwischen den Spitzenwerten gepulster Hochfrequenzfelder und biologischen Wirkungen vorliegen, hat ICNIRP vorgeschlagen, dass die äquivalente Leistungsdichte S_{eq} bei ebenen Wellen für Frequenzen über 10 MHz, gemittelt über die Pulsdauer, das 1000-fache der Referenzwerte nicht überschreiten sollte, bzw. dass die Feldstärken das 32-fache der Referenzwerte für die Feldstärke nicht überschreiten sollten (vgl. Tabelle 6 und 7 oder Abbildung 1 und 2 in den ICNIRP-Empfehlungen 1998 [1]). Für Frequenzen zwischen etwa 0,3 GHz und mehreren GHz und für eine lokale Exposi-

tion des Kopfes muss die spezifische Absorption von Pulsen begrenzt werden, um Höreffekte, die durch thermoelastische Expansion verursacht werden, einzuschränken oder zu vermeiden. Als zusätzlicher Basisgrenzwert sollte die SA bei gepulsten Expositionen 10 mJ/kg bei Beschäftigten, und 2 mJ/kg für die Normalbevölkerung nicht überschreiten, gemittelt über je 10 g Gewebe. In diesem Frequenzbereich entspricht der SA-Schwellenwert von 4-16 mJ/kg zur Erzeugung dieses Effektes bei Pulsen von 30 μ s den Spitzen-SAR-Werten von 130-520 W/kg im Gehirn. Zwischen 100 kHz und 10 MHz werden die Spitzenwerte für die Feldstärken durch Interpolation zwischen dem 1,5-fachen des Spitzenwertes bei 100 kHz und dem 32-fachen des Spitzenwertes bei 10 MHz gewonnen.

Gegenwärtig führt ICNIRP Neubewertungen der biologischen, dosimetrischen, medizinischen und epidemiologischen Forschungsergebnisse in Hinblick auf neue Erkenntnisse auf Gesundheitsbeeinträchtigungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder durch, die demnächst 2007 abgeschlossen werden. Die Ergebnisse werden in die Neubewertung der WHO einfließen. Die insgesamt gewonnenen Erkenntnisse werden als Grundlage für die Überarbeitung der Grenzwertempfehlungen von 1998 dienen.

Literatur

- [1] ICNIRP (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 74: 494-522
- [2] ICNIRP (2003). Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. Health Phys 84:383-387
- [3] Jokela K (2000). Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic field. Health Phys 79: 373-388
- [4] Frey, A.M. (1961). Auditory system response to radiofrequency energy. Aerospace Med.; 32:1140-1142; 1961.

- [5] ICNIRP (1996). Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.* 70: 587-593; 1996.
- [6] Lin, J.C. (1978). *Microwave auditory effects and applications*. Springfield, IL, Charles C. Thomas; 1978.
- [7] Sauer, F.A. and Schloegl, R.W. (1985). Torques exerted on cylinders and spheres by external electromagnetic fields: A contribution to the theory of field-induced cell rotation; p. 203-251 in: *Interaction between Electromagnetic Fields and Cells*, Chiabrera, A., Nicolini, C. and Schwan, H.P., Eds. NATO ASI Series, Vol. 97, Plenum Press, New York, 1985.
- [8] Sienkiewics, Z.J.; Cridland, N.A.; Kowalczyk C.I.; Saunders, R.D. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In: Stone, W.R.; Hyde, G., eds. *The review of radio science: 1990-1992*; Oxford, Oxford University Press; 737-770; 1993.
- [9] WHO (1993). *Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)*. Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.

5.3 Statements der Expertenkommissionen

Volker Bökelmann, Jürgen Zschernitz

Die teilweise umfangreichen Aussagen der wesentlichen Expertenkommissionen werden kurz, sachlich und umfassend resümiert. Die Kern-Aussagen selbst finden sich als wörtliche Zitate im Anhang 10*, verbunden mit Quellenangaben, aus welcher Publikation die Zitate entnommen sind, bzw. mit Internet-Links zum zitierten Dokument.

Mit der rasanten Verbreitung des Mobilfunks und der damit ebenso verbreiteten Sorge um bisher nicht erkannte Auswirkungen ist eine Vielzahl von Fachkreisen entstanden, in denen Experten ihr Wissen einbringen und abstimmen. Initiatoren waren vorwiegend Regierungsorganisationen (z. B. bei EMF-NET), aber auch Wissenschafts- und Industrieorganisationen (z. B. bei IET), teilweise wurden auch in Diskussionsforen unabhängige Expertengruppen gegründet (z. B. ICNIRP). Alle versuchen, den Stand der Wissenschaft in möglichst griffigen Aussagen zusammenzufassen.

In Studien zur biologischen Wirkung elektromagnetischer Felder (EMF) werden sowohl Effekte un gepulster (kontinuierlicher) als auch gepulster Felder erforscht. Entsprechend finden gleichermaßen die Forschungsergebnisse aus beiden Feldtypen Eingang in die Bewertungen der Expertenkommissionen. Weltweit sind sich die internationalen und nationalen Expertenkommissionen einig, dass zumindest bisher kein wissenschaftlicher Nachweis für gesundheitliche Gefahren durch Felder mit Intensitäten unterhalb der geltenden Grenzwerte gefunden werden konnte. Allerdings kann es auch keinen wissenschaftlichen Nachweis geben, dass gesundheitliche Auswirkungen von diesen Feldern völlig ausgeschlossen sind. Das gilt für die gesamte bislang vorliegende Forschungserkenntnis, eine Unterscheidung zwischen un gepulsten und gepulsten Signalformen wird nicht vorgenommen. Anders ausgedrückt: Auch für gepulste Felder können keine gesundheitsschädlichen Wirkungen festgestellt werden, wenn die Grenzwerte eingehalten werden.

Ebenfalls besteht weltweit Einigkeit darüber, dass es sehr wohl thermische Effekte im biologischen Organismus geben kann, wenn bei der Exposition mit Hochfrequenz (HF) die Grenzwerte überschritten werden. Da im Normalfall bei der Nutzung HF-emittierender Geräte die Exposition jedoch weit unterhalb dieser Grenzwerte bleibt – und das ist durch mehrere unabhängige Untersuchungen belegt – konzentriert sich die weitere Diskussion auf nicht-thermische Effekte durch HF unterhalb der Grenzwerte.

Trotz zahlreicher Studien sind noch nicht alle denkbaren Auswirkungen (insbesondere Langzeitwirkungen, Besonderheiten im Kindesalter oder Effekte durch die Überlagerung verschiedenster HF-Quellen) mit ausreichend wissenschaftlicher Qualität erfasst, so dass weitere Untersuchungen erforderlich sind, die auf anerkannten Qualitätsstandards basieren. Dazu gehört zumindest eine so vollständige und eindeutige Dokumentation der Studie, dass sie replizierbar ist. In den Studienauswertungen ist zudem zu unterscheiden zwischen nachgewiesenen, als harmlos eingeschätzten biologischen Effekten und gesundheitlichen Gefährdungen.

Vergleicht man die Expertenaussagen in ihrer zeitlichen Entwicklung zwischen 1999 und 2006, so ist kein Trend der Wissensabsicherung erkennbar. Sowohl neue HF-Technologien als auch neue Studienergebnisse werfen immer wieder dieselben Fragen nach den verschiedenen Möglichkeiten einer Gesundheitsgefährdung auf (z. B. Einfluss auf Tumor-/Krebsentwicklung, Reproduktions-Genetik, Immunsystem, Leistungsfähigkeit des Gehirns, Epilepsie, Kopfschmerzen, Schlafstörungen, allgemeine Befindlichkeit) und erfordern ergänzende Forschungsarbeiten.

Die Aussagen der Experten überdecken oft den gesamten Bereich der EMF einschließlich elektrischer und magnetischer Felder und anderer HF-Anwendungen neben dem Mobilfunk (z. B. Radar). Beschränkt auf Mobilfunkanwendungen wird das gesundheitliche Risiko in Bezug auf die gesamte Bandbreite als deutlich geringer angesehen. Und innerhalb des Mobilfunk-Betrachtungsbereiches wird das Leben in der Nähe von Basis-Stationen als noch unkritischer gesehen gegenüber der aktiven Handy-Nutzung, da die Exposition durch entfernte Mobilfunkstationen im Normalfall deutlich geringer ist als diejenige durch ein körpernah betriebenes Handy.

Der Unterschied zwischen gepulsten und kontinuierlichen Feldern ist bei den Expertenaussagen wie gesagt kein Thema und wird nur in zwei der herangezogenen Zitate erwähnt (WHO 1993: keine eigenen Grenzwerte identifizierbar; NRCP 2003: Pulse sind effektiver, aber nur in der Anwendung einiger militärischer Waffensysteme von gesundheitlicher Relevanz.).

*) Siehe Anhang 10 auf beigefügter CD

5.4 Statements einzelner Experten/Meinungsbildner

Wolfgang Michaelis

Aussagen renommierter internationaler Experten zu gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder finden sich in den Veröffentlichungen der WHO zu spezialisierten Workshops und Seminaren über aktuelle Themenbereiche. Intensiv diskutierte Schwerpunktthemen stellten in den letzten Jahren vor allem die Forschungen in den Bereichen „EMF-Hypersensitivität“ und „Wirkungen von EMF auf Kinder“ dar. Die Expertenaussagen stimmen in der Bewertung überein, dass auch bei Langzeitexpositionen bis heute keine bestätigten gesundheitsschädlichen Wirkungen schwacher elektromagnetischer Felder unterhalb der ICNIRP-Grenzwert-Empfehlungen bekannt sind. Dies gilt sowohl für ungeladene als auch für geladene Felder.

Eine international viel beachtete Bühne für die Meinungsäußerungen unabhängiger Experten zum aktuellen Stand der Forschung stellen die wissenschaftlichen Seminare und Workshops der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organisation – WHO, [1]) dar. Auf diesen Veranstaltungen werden die Ergebnisse laufender oder kürzlich abgeschlossener Forschungsvorhaben durch internationale Fachwissenschaftler vorgestellt und diskutiert sowie die Notwendigkeit und die Schwerpunkte weiterer Forschung bewertet.

Neben der Abstimmung aktueller Studien liegt das Ziel der Konferenzen darin, einen aktuellen Überblick über den Stand der internationalen Forschung sowie eine abgestimmte Bewertung zu gesicherten Erkenntnissen oder noch bestehenden Wissenslücken der gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder zu erhalten, die als Grundlage für Risikoeinschätzung und Risikomanagement internationaler politischer Organe dienen kann.

Die Ergebnisse der WHO-Seminare und Workshops sind in Form von Vortrags-sammlungen, Rapporteur's Reports sowie von WHO „Fact Sheets“ und „Information Sheets“ allgemein verfügbar [2],[3].

Wichtige Forschungsschwerpunkte in den letzten Jahren, mit denen sich auch große internationale Workshops beschäftigten, lagen vor allem im Bereich von Gruppen mit besonders hoher Sensitivität gegenüber elektromagnetischen Feldern, da man in diesen Gruppen mit höherer Wahrscheinlichkeit gesundheitliche Wirkungen auch schwacher Felder zu finden

hoffte. Insbesondere standen folgende Forschungsbereiche im Zentrum des internationalen Interesses:

- elektromagnetische Hypersensitivität und
- Sensibilität von Kindern gegenüber EMF-Exposition

Forschungsschwerpunkt „elektromagnetische Hypersensitivität (Elektrosensibilität)“

Die **Elektrosensibilität** ist eine relativ neue Erscheinung. Zusammen mit der wachsenden Industrialisierung der Gesellschaft sowie der Entwicklung neuer drahtloser Kommunikationstechnologien und deren zunehmender Nutzung stieg auch die Zahl der elektromagnetischen Feldquellen. In der Mitte des letzten Jahrhunderts war die Zahl der Funkanwendungen noch überschaubar. Rundfunk und Fernsehen waren die hauptsächlichen Anwendungen, die der Bevölkerung bewusst wurden. Deren Nutzen war so offensichtlich, dass zu dieser Zeit nur selten öffentlich Bedenken zu schädlichen gesundheitlichen Wirkungen geäußert wurden. Infolge der technischen Weiterentwicklung wurden seitdem eine Vielzahl weiterer Technologien eingesetzt, deren Nutzung zu einer erheblichen Zunahme der Feldquellen führte, wie z. B. Computer, Bildschirme, drahtlose (DECT-) Telefone sowie Mobilfunk und die dafür notwendigen Basisstationen. Auch diese Anwendungen machten für die meisten Bürger das tägliche Leben einfacher, sicherer und bequemer und wurden daher schnell akzeptiert. Durch den zunehmenden persönlichen Kontakt mit der Funktechnik regten sich jedoch Bedenken zu möglichen Gesundheitsrisiken durch die Wirkungen elektromagnetischer Strahlungen.

Gleichzeitig nahmen ab Mitte der 1980er Jahre Berichte zu, in denen Betroffene ihre Gesundheitsprobleme auf die Exposition durch elektromagnetische Felder zurückführten. Während in einem Teil der Fälle nur leichte Symptome auftraten, waren in schweren Fällen die Betroffenen zu schwerwiegenden Änderungen in Berufsausübung und privater Lebensweise gezwungen.

Ein Forschungsschwerpunkt in den letzten Jahren bezog sich auf diese hohe Sensitivität gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern, für die der Begriff **„elektromagnetische Hypersensitivität (Elektrosensibilität)“** (engl.: „electromagnetic hypersensitivity – EHS“) geprägt wurde. Im Oktober 2004 fand in Prag ein internationaler Workshop der WHO zu diesem Thema statt, an dem mehr als 150 Experten aus 25 Ländern teilnahmen. Ziel war die Zusammenfassung des aktuellen Kenntnis- und Forschungsstandes sowie die Diskussion möglicher Zusammenhänge mit elektromagnetischen Feldern und die Feststellung notwendigen weiteren Forschungsbedarfs, um noch bestehende Wissenslücken zu schließen.

Die Unterlagen und Präsentationen zu diesem Workshop sind im Internet verfügbar [4]. Auf der Grundlage der Ergebnisse des Prager Workshops und Informationen aus weiteren Quellen fasste die WHO den aktuellen Kenntnisstand zu diesem Thema in einem Fact Sheet zusammen [5].

Wie äußert sich EHS?

Die Symptome für Elektrosensibilität umfassen eine Vielzahl unspezifischer Befindlichkeitsstörungen, sie können von Unwohlsein und Hautreizungen bis hin zu

schweren neurasthenischen und vegetativen Störungen reichen (Erschöpfung, Müdigkeit, Konzentrationsstörungen, Schwindel, Herzklopfen, Verdauungs- und Schlafstörungen). Es bestehen bei der Symptomatik Ähnlichkeiten zum Beschwerdekreis der „Multiplen Chemikalienunverträglichkeit“ (MCS), die ebenfalls durch unspezifische Symptome gekennzeichnet ist und in Zusammenhang mit dem Einfluss gering konzentrierter Umweltchemikalien gebracht wird.

Es gibt keine allgemein anerkannte Abschätzung der Verbreitung von EHS in der Bevölkerung. Schätzungen von Arbeitsmedizinern liegen bei wenigen Betroffenen pro Million, Selbsthilfegruppen gehen von deutlich höheren Zahlen aus. Im europäischen Vergleich zeigen sich deutliche Unterschiede in Häufigkeit und vorwiegender Symptomatik.

Studien und Schlussfolgerungen

Es wurden eine Reihe von Studien unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt, in denen in Doppelblindversuchen der Zusammenhang von EMF-Expositionen mit den berichteten Symptomen untersucht wurde. In den meisten Fällen zeigte sich, dass die Probanden die EMF-Einwirkung nicht zuverlässiger feststellen konnten als eine Kontrollgruppe aus nicht betroffenen Personen. Es konnte kein Zusammenhang zwischen EMF-Exposition und den geschilderten Symptomen nachgewiesen werden. Dies gilt sowohl für die Exposition durch ungepulste als auch durch gepulste Felder.

Es gibt keine eindeutigen Diagnosekriterien für EHS, da die Symptome vielfältig und unspezifisch sind. Für die Betroffenen sind sie jedoch real und individuell sehr unterschiedlich stark ausgeprägt. Da ein Zusammenhang mit der Einwirkung von EMF nicht nachweisbar ist, werden häufig anderweitige Erklärungsversuche für diese Befindlichkeitsstörungen angeführt:

- Es besteht die Vermutung, dass die Symptome von Umweltbedingungen herrühren, die nicht mit EMF in Zusammenhang stehen (z. B. dem „Flimmern“ von Bildschirmen oder unergonomischem Arbeitsplatzdesign).
- Ein grundlegender Faktor könnte auch in psychischen Faktoren, z. B. Stressreaktionen infolge des individuellen Lebensumfeldes bestehen.

- „Es gibt auch Hinweise darauf, dass die Symptome durch bestehende psychiatrische Bedingungen sowie Stressreaktionen aufgrund von Ängsten vor Gesundheitsfolgen durch EMF begründet sein dürften, eher als durch EMF selbst.“ (Zitat aus dem WHO Fact Sheet).

Insgesamt kann das Problem der Elektrosensitivität noch nicht als gelöst betrachtet werden. Die bisherigen Studien zeigen, dass weitere Forschung notwendig ist, um EHS und seine Ursachen näher zu charakterisieren. Die WHO empfiehlt aber keine weiteren Untersuchungen zur Beziehung zwischen EMF und EHS, da die bisher durchgeführten Studien keine begründeten Beweise für eine kausale Beziehung aufgezeigt haben.

Forschungsschwerpunkt: „Sensibilität von Kindern gegenüber EMF-Exposition“

Im Jahr 2000 erschien der britische Report über „Mobile Phones and Health“ (Stewart-Report, [6]). Darin wurden zentrale Punkte aus der Diskussion um die Auswirkungen elektromagnetischer Felder von Handys aus wissenschaftlicher Sicht auf der Basis vorliegender Befunde behandelt. Obwohl im Grunde die allgemeine wissenschaftliche Meinung und die ICNIRP-Empfehlungen bestätigt wurden, löste dieser umfangreiche Bericht insbesondere in den englischsprachigen Ländern Unruhe und Besorgnis aus, insbesondere wegen der Empfehlungen für einen vorsichtigen Umgang mit Mobiltelefonen vor allem bei Kindern. Seitdem steht die Frage: „Handelt es sich bei Kindern um eine gegenüber elektromagnetischen Feldern besonders sensible Gruppe?“ im Brennpunkt der wissenschaftlichen Diskussion.

Besondere Sorge besteht,

- weil Kinder eine dünnere Schädeldecke und Kopfhaut sowie einen kleineren Kopf mit anderen dielektrischen Gewebeeigenschaften als Erwachsene haben und dadurch elektromagnetische Felder stärker absorbiert werden könnten,
- weil Gehirn, Nerven- und Immunsystem noch in der Entwicklung sind,
- und weil die Mobilfunknutzung schon in jungen Jahren beginnt, diese Gruppe daher über einen längeren Zeitraum, im Laufe ihrer Lebenszeit insgesamt also einer höheren Gesamtexposition ausgesetzt ist als andere Altersgruppen.

Zudem ist allgemein eine Veränderung des Kommunikationsverhaltens im jugendlichen Alter feststellbar. Die Handynutzung beginnt in zunehmend früherem Alter, auch eine Zunahme der Nutzungsintensität ist festzustellen, u. a. auch wegen der sinkenden Mobilfunkkosten und des Angebots neuer Dienste, wie der Übertragung von Bildern, Musik und weiteren Multimediainhalten.

Der Frage nach der besonderen Empfindlichkeit von Kindern gegenüber EMF widmeten sich in den letzten Jahren mehrere Workshops, in denen Experten zu diesem Thema Stellung bezogen. Im Rahmen des Forschungsprogramms COST 281 fand am 5. Mai 2002 in Rom ein Workshop mit dem Titel „Mobile Communication and Children“ (Mobilkommunikation und Kinder) statt. Neben der Vorstellung einer aktuellen Literaturübersicht wurden die folgenden Themen diskutiert: anatomische Merkmale und biophysikalische Mechanismen bei Kindern; dielektrische Eigenschaften; Dosimetrie; biologische Studien; Nutzungsmuster und Risikokommunikation mit Kindern [7].

Die WHO organisierte im Juni 2004 einen Workshop in Istanbul, der sich der Frage widmete, ob Kinder in elektromagnetischen Feldern einem speziellen Risiko ausgesetzt sind. Der Workshop wurde in Zusammenarbeit mit der Medizinischen Fakultät der Gazi University Ankara durchgeführt [8]. Auf der Basis der Ergebnisse dieses Workshops und der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnislage wird ein Fact Sheet der WHO zu diesem Thema vorbereitet.

Eine detaillierte Behandlung des Forschungsgegenstandes wurde in der Edition Wissenschaft der FGF unter dem Thema „Sensibilität von Kindern gegenüber EMF-Exposition – Gibt es eine erhöhte Sensibilität gegenüber hochfrequenten Feldern der mobilen Kommunikation während diskreter Entwicklungsphasen?“ veröffentlicht [9].

Im November 2006 wurde die wissenschaftliche Diskussion zu diesem Themenkomplex auf einer durch die FGF organisierten interdisziplinären Expertentagung in Stuttgart [10] fortgeführt. In 16 Fachvorträgen wurden Studien zur Dosimetrie und Expositionsabschätzung, Tier- und

Freiwilligenstudien sowie Studien zur Epidemiologie vorgestellt und diskutiert.

Insgesamt ist festzustellen, dass es aus medizinischer Sicht und auf der Basis des derzeitigen Wissensstandes keinen abgesicherten Grund oder plausiblen Verdacht gibt, der es nahe legen würde, von ernststen gesundheitlichen Risiken einer Einwirkung elektromagnetischer Hochfrequenzfelder der Mobilkommunikation (gepulst oder ungepulst) auf den sich entwickelnden Organismus auszugehen. Der aktuelle Wissensstand rechtfertigt nicht die Empfehlung, dass Kinder und Heranwachsende a priori besondere Vorsicht im Umgang mit Mobiltelefonen walten lassen sollten.

Falls es jedoch bisher noch unentdeckte gesundheitliche Risiken der Mobiltelefonnutzung gibt, könnten Kinder und Jugendliche möglicherweise besonders betroffen sein. Die WHO sieht daher in ihrer Forschungsagenda 2006 auch zukünftig verstärkten Forschungsbedarf in diesem Bereich [11] und hat nach dem Workshop in Istanbul eine spezielle Forschungsagenda zu diesem Thema herausgegeben [12].

Literatur/Internet-Links:

- [1] Homepage der WHO:
<http://www.who.int/en/>
- [2] Fact Sheets der WHO, Gesamtverzeichnis: <https://www.who.int/mediacentre/factsheets/en/>
- [3] EMF Publikationen, Fact Sheets & Information Sheets der WHO:
<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/factsheets/en/index.html>
- [4] WHO-Workshop zur elektrischen Hypersensibilität, Prag, Tschechien, 25.-26. Oktober 2004:
http://www.who.int/peh-emf/meetings/hypersensitivity_prague2004/en/index.html
- [5] WHO Fact Sheet N°296, „Elektromagnetische Felder und öffentliche Gesundheit – Elektromagnetische Hypersensitivität (Elektrosensibilität)“
<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/>
- [6] „Stewart Report“ der „Independent Expert Group on Mobile Phones“ (IEGMP), 2000,
<http://www.iegmp.org.uk/report/text.htm>
- [7] COST281 Workshop „Mobilkommunikation und Kinder“ („Mobile Communication and Children“), Rom, Italien, 2.-5. Mai 2002,
<http://www.cost281.org/documents.php>
- [8] WHO Workshop „Kinder und EMF“ („Sensitivity of Children to EMF Exposure“), Istanbul, Türkei, 9.-10. Juni 2004, http://www.who.int/peh-emf/meetings/children_turkey_june2004/en/index.html
Rapporteur-Report zu diesem Workshop: <http://www.who.int/peh-emf/meetings/>
- [9] Dr. med. Jörg Reißerweber, Janine Pöss und Prof. Dr. med. Eduard David, „Sensibilität von Kindern gegenüber EMF-Exposition – Gibt es eine erhöhte Sensibilität gegenüber hochfrequenten Feldern der mobilen Kommunikation während diskreter Entwicklungsphasen?“, Edition Wissenschaft, Ausgabe Nr. 22, November 2005, Forschungsgemeinschaft Funk (FGF), <http://www.fgf.de/>
- [10] Kurzzusammenfassung der Ergebnisse des FGF-Workshops 27.-29. November 2006, Stuttgart, Deutschland: „Stellen Kinder eine besonders sensitive Gruppe bei EMF-Exposition dar? – Der Stand der Forschung“, Edition Wissenschaft, Ausgabe Nr. 22, November 2005, Forschungsgemeinschaft Funk (FGF) <http://www.fgf.de/fup/tagung/>

6 Ist die Pulsung nun erkannt als die wahre Ursache schädlicher Effekte?

Wer dieses Buch bis hierher gelesen hat, ist mit einer Fülle von Informationen aus Technik und Biologie konfrontiert worden. Damit wird zunächst deutlich, wie umfassend die Thematik ist und wie wenig hier schnelle und oberflächliche Betrachtung und Schlussfolgerung angemessen sind.

Fundierte Schlussfolgerungen aus den bis heute vorliegenden Erkenntnissen sollen in diesem Abschnitt gezogen werden, und es zeigt sich, dass auch aus wissenschaftlicher Sicht das Thema nicht abgeschlossen ist. Es wird zusammenfassend darauf eingegangen, dass diverse Argumente aus der öffentlichen Diskussion zwar leicht widerlegt werden können und die bisherigen wissenschaftlichen Forschungsergebnisse keinerlei Anlass für panikartige Reaktionen liefern, dass andererseits aber der Stand der Wissenschaft – nach Meinung vieler Skeptiker – nicht ausreicht, um die moderne Mobilfunktechnik und ihre künftige Entwicklung ohne weitere Prüfung anzuwenden.

Es geht also darum, mit einer möglichst sachlichen Sichtweise alle Umstände in der Diskussion zu berücksichtigen, daraus weitere Forschungserfordernisse abzuleiten und angemessene Konsequenzen für Nutzung und Grenzen der technischen Möglichkeiten zu ziehen.

6.1 Wirken gepulste Felder anders? Stand der Forschung, Konsequenzen, Perspektiven

Roland Glaser

Dieses Buch widmet sich der in der Öffentlichkeit viel diskutierten Frage, ob sich nicht vielleicht die Forschung über die Wirkung elektromagnetischer Felder und auch die daraus abgeleiteten Grenzwerte im Wesentlichen auf kontinuierliche Schwingungen beziehen; ob nicht vielmehr gepulste oder modulierte Hochfrequenzfelder anders, möglicherweise wesentlich stärker auf das biologische System einwirken. Besondere Besorgnis erregen natürlich die Pulse und Amplitudenschwankungen des Mobilfunks. Der populistische Charakter von Argumenten zu dieser Problematik, bei denen von „Nadelstich-“ oder gar „Schlagbohrhammer-“ Effekten die Rede ist, wurde bereits in einem anderen Beitrag dieses Buches offengelegt. Auch die technisch-physikalischen Parameter der uns umgebenden HF-Felder und ihr Amplitudenverhalten bzw. ihre Pulsung sind an anderer Stelle bereits im Detail besprochen.

Aus diesen Darlegungen ergeben sich zunächst drei grundsätzliche Fakten, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

1. Eine physikalische Demodulation gepulster oder amplitudenmodulierter Felder im Sinne der Entstehung niederfrequenter Schwingungen oder gepulster Gleichfelder im biologischen System ist im Frequenzbereich des Mobilfunks theoretisch nicht vorstellbar und experimentell auch nicht nachgewiesen.
2. Von einer spezifischen „Flankensteilheit“ der Pulse eines GSM-Signals kann nicht die Rede sein, da die Steilheit eines HF-Pulses letztlich durch die Sinus-Flanke jeder einzelnen Schwingung in dem Wellenpaket bestimmt wird.
3. Verglichen mit der GHz-Frequenz der Mobilfunkstrahlung ist die Dauer eines GSM-Pulses „lang“; sie enthält Millionen von Einzelschwingungen.

Biophysikalisch gesehen, ergeben sich daraus eine Reihe von Schlussfolgerungen: Aus Fakt 1 folgt, dass alle diejenigen Wirkungsmechanismen, die sich speziell auf niederfrequente Felder beziehen, wie Erregung von Nerven, Sinnesorganen und Muskeln oder eine direkte Einflussnahme auf Prozesse des Ionentransportes etc., bei gepulsten oder amplitudenmodulierten Hochfrequenzfeldern auszuschließen sind. Auch wenn die Pulsfrequenz des GSM-Signals mit 127 Hz im niederfrequenten Bereich liegt, tritt im biologischen Gewebe kein elektromagnetisches Feld dieser Frequenz auf. Fakt 2 schließt aus, dass es bei gepulsten, im Vergleich zu kontinuierlichen „HF-Feldern“ irgendwelche Besonderheiten bezüglich der

Induktion von Strömen im Körper geben kann. Während zum Beispiel ein einfacher Magnetpuls, abhängig von seiner Flankensteilheit, mehr oder weniger starke Wirbelströme im Körper erzeugt, ist die elektrische Wechselwirkung eines Hochfrequenzpulses mit dem Körpergewebe nicht anders als jene einer kontinuierlichen Strahlung. Dies, zusammen mit Fakt 3, lässt erkennen, dass keine spezifischen Wirkungen eines HF-Pulses zu erwarten sind, wenn die Schwingungen gleicher Frequenz und Amplitude im kontinuierlichen Feld das biologische System nicht beeinflussen. Dieser letzte Satz enthält ein „wenn“, und lässt damit eine Möglichkeit offen: Bleiben die Schwingungen kontinuierlicher Wellen nämlich nicht wirkungslos, dann ist die Frage erneut zu stellen: Sind diese Wirkungen anders, wenn sie das biologische System periodisch treffen, verglichen mit einer gleichmäßigen Dauerwirkung? Gibt es auf diese Weise eine „biologische Demodulation“?

Was könnten das aber für Wirkungen sein? Auch diese möglichen Primärwirkungen hochfrequenter Felder wurden an anderer Stelle bereits ausführlich behandelt. Im Intensitätsbereich des Mobilfunks, selbst bei den ungleich intensiveren Pulsen der Radaranlagen, beschränken sich die Wirkungen auf thermische Effekte. Dies bedeutet eine Erwärmung des bestrahlten Körperteils, abhängig von der Intensität des Feldes, d. h. vom SAR-Wert. Dabei können auch sogenannte „hot spots“ auftreten, also millimeter- bis zentimetergroße Bereiche stärkerer Feldabsorption und damit erhöhter Temperatur. Nicht auszuschließen sind eventuell

sogar Ereignisse, die sich bei der Umsetzung der Energie der HF-Strahlen in Wärme in molekularen und supramolekularen Dimensionen abspielen. Bei sehr starken Pulsen kann diese periodische Erwärmung des Gewebes zum „Mikrowellenhören“ führen. Die schnell wechselnde Erwärmung und Wiederabkühlung von Komponenten des Kopfes und des Ohrs durch die Einwirkung gepulster Felder führen unter Umständen zu mechanischen Schwingungen, die man als Schall empfindet. Über den Mechanismus dieses Vorganges besteht experimentell und theoretisch Klarheit. Gesundheitsschädlich scheint das Mikrowellenhören nicht zu sein.

Die Felder des Mobilfunks, selbst die eines Handys am Ohr mit höchster Leistung, sind allerdings viel zu schwach für diesen Effekt. Dies schließt jedoch nicht aus, dass selbst subtilere Temperaturschwingungen wirken könnten, ausgelöst z. B. durch die GSM-Pulse oder durch die wechselnde Amplitude der Felder der UMTS-Technik. Wenn es auch nicht zu einer elektrischen Demodulation des HF-Signals und damit zur Erzeugung niederfrequenter Felder kommt, so könnten doch selbst diese periodischen Temperaturschwankungen entsprechende Resonanzphänomene im biologischen System auslösen. Molekulare Thermometer, d. h. Moleküle mit hoher Temperaturempfindlichkeit, die in vielen Zellen des Körpers vorhanden sind, könnten daraufhin periodische Signale aussenden, die biologisch verstärkt zu Reaktionen führen könnten. Dies ist der Mechanismus, der mit dem Begriff „biologische Demodulation“ gemeint ist.

Das oben verwendete Adjektiv „subtil“ ist in doppeltem Sinne zu verstehen: einmal bezogen auf die Amplitude der Temperaturschwankung, zum anderen auf das entsprechende Volumen, welches davon betroffen ist. Es könnte sich um periodisch wechselnde Erwärmungen von einem Grad oder weniger handeln, gleichzeitig könnte es nur einige molekulare oder supramolekulare Strukturen betreffen, die durch ihre Impedanz die Felder besonders stark absorbieren. Im Unterschied zu einer kontinuierlichen Strahlung, bei der es durch Wärmeleitung schnell zu einer stationären und gleichmäßigen Änderung der Temperatur kommt, könnten Pulse eventuell Temperaturschwankungen im molekularen oder mikroskopischen Bereich auslösen.

Damit berühren wir ein Problemfeld, welches in Fachkreisen zur Zeit noch umstritten ist. Berechnungen auf der Basis physikalischer Ansätze der Thermodiffusion führten schon sehr frühzeitig zu dem Schluss, dass die Wärmeableitung von Kugeln zunehmend schneller wird, je kleiner sie sind. Diese Beziehung ist sogar quadratisch, d. h. eine Kugel mit dem halben Radius einer anderen kühlt sich viermal so schnell ab. Für Zellen mit einem Radius von etwa 10 Mikrometern bleiben dann weniger als eine Millisekunde für den Temperaturengleich. Für molekulare oder supramolekulare Strukturen werden schnell Nano- und Pikosekundenskalen erreicht. Stationäre Temperaturdifferenzen sind demnach im mikroskopischen Bereich kaum möglich. Doch: berücksichtigt dieses Modell tatsächlich die Besonderheiten mikrothermischer Prozesse? Was bedeutet „Temperatur“ im Bereich eines Makromoleküls? Was geht eigentlich bei der Umwandlung von Hochfrequenzenergie in Wärme aus molekularer Sicht vor?

Dies sind Fragen, die bisher relativ wenig untersucht wurden, und die zeigen, dass der Problembereich „Pulsierende Felder“ eng mit jenem verbunden ist, den man als „Mikrodosimetrie“ umschreiben kann und der letztlich eben diese „subtilen“ thermischen Reaktionen umfasst, die oftmals missverständlich als „nicht-thermisch“ bezeichnet werden. Darauf wurde im Beitrag zu biophysikalischen Primärreaktionen hochfrequenter Felder bereits ausführlich eingegangen.

Wenden wir uns jedoch zunächst der Frage zu: Gibt es eigentlich experimentelle Anhaltspunkte, die eine besondere Wirkung pulsierender oder amplitudenmodulierter HF-Felder wahrscheinlich machen? Hat man solche Unterschiede gemessen? Die in diesem Band enthaltene Literaturanalyse zu diesem Thema ergibt ein unklares Bild. Einige ältere Befunde ließen solche Unterschiede vermuten; die Autoren glaubten sogar, bestimmte Resonanzfrequenzen gefunden zu haben. Experimente der letzten zwei bis drei Jahrzehnte mit ausgereifterer Methodik konnten diese Ergebnisse jedoch nicht bestätigen. In den meisten Fällen waren Unterschiede dieser Art nicht nachweisbar. Allerdings gibt es einige neuere Arbeiten, die, wenn auch nicht auf Resonanzfrequenzen, so doch auf gewisse Unterschiede in der Wirkung zwischen kontinuierlichen und gepulsten Feldern hinweisen.

Zwei Beispiele seien exemplarisch herausgegriffen: Zum einen sind es die Ergebnisse einer Schweizer Arbeitsgruppe, die in mehreren Publikationen zeigte, dass gepulste und ungepulste Felder des Mobilfunks unterschiedliche Änderungen der Durchblutung des Gehirns auslösen können (Huber et al. 2002, 2005). Zum anderen sei eine Arbeit erwähnt, nach welcher in embryonalen Stammzellen, die sich in hängenden Tröpfchen befanden, nicht bei konstanten, wohl aber bei gepulsten Feldern Unterschiede in der Bildung von Hitzeschockproteinen auftraten (Czyz et al. 2004). In beiden Fällen war der SAR-Wert bei der gepulsten und ungepulsten Bestrahlung gleich.

SAR – die „Leistungsabsorptionsrate“ in W/kg – ist ein Wert, der sich auf ein bestimmtes Volumen bezieht und über eine bestimmte Zeit gemittelt wird. Dabei ist weder eine mögliche mikroskopische oder gar molekulare Heterogenität der Energieabsorption berücksichtigt, noch schnelle zeitliche Änderungen bei niederfrequenten Pulsationen oder Amplitudenmodulationen des Feldes. Diese Definition setzt eine Homogenität zumindest im Zentimetermaßstab und eine Kontinuität des Feldes in einem Zeitraum voraus, der weit über einer Sekunde liegt.

Unter dieser Prämisse können die oben genannten experimentellen Ergebnisse tatsächlich als Spezifikum gepulster Felder angesehen werden. Selbst bei gleichem SAR-Wert im Sinne der Definition ist jedoch die Intensität der Strahlung während der Pulse höher als jene der ungepulsten Felder. Anderenfalls wäre der zeitliche Mittelwert nicht gleich. Lässt man jedoch zu, dass kleinere Volumina eventuell in kürzerer Zeit auf die Intensität der Einzelpulse reagieren, dann kann man nicht mehr von gleicher Expositionintensität der gepulsten im Vergleich zu den kontinuierlichen Feldern sprechen. Im Falle der neurologischen Untersuchung könnten auf diese Weise Thermorezeptoren im Gehirn angesprochen sein, welche die lokale Durchblutung steuern; im Falle des in-vitro-Experimentes könnte es sein, dass die winzigen Volumina der Tröpfchen und die sich darin befindlichen Zellen in unterschiedlicher Weise periodisch erwärmt wurden. Dafür spricht auch, dass ähnliche Experimente einer japanischen Gruppe, die jedoch die Zellen in normalen Kulturbehältern hielten, diese Ergebnisse nicht bestätigen konnten (Hirose et al. 2006).

Die Ergebnisse der beiden genannten Experimente und auch anderer entsprechender Studien lassen allerdings nicht auf eine gesundheitliche Relevanz der gemessenen Effekte schließen. Vielmehr handelt es sich um Reaktionen, die im Streubereich biologischer Variabilität und normaler Umwelteinflüsse liegen. Die Autoren fordern deshalb keine Änderung der zulässigen Grenzwerte aus den Ergebnissen ihrer Untersuchungen.

Trotzdem ist es erforderlich, diesen Befunden nachzugehen, sie zu überprüfen und im Falle einer Bestätigung nach den Ursachen zu suchen. Nur die Kenntnis der Zusammenhänge erlaubt es, auf andere Bedingungen zu extrapolieren und damit die Sicherheit festgelegter Grenzwerte zu erhöhen. Wie bereits erwähnt, betrifft dies außer weiteren empirischen Beobachtungen im Experiment auch die Klärung möglicher mikrodosimetrischer Effekte, insbesondere den Vorgang der Energieabsorption in Molekülen und den nachfolgenden Prozess der Wärmeableitung.

Literatur

Czyz J, Guan K, Zeng Q, Nikolova T, Meister A, Schönborn F, Schuderer J, Kuster N, Wobus AM: High frequency electromagnetic fields (GSM signals) affect gene expression levels in tumor suppressor p53-deficient embryonic stem cells. *Bioelectromagnetics* 2004, 25, 296-307.

Hirose H, Sakuma N, Kaji N, Suhara T, Sekijima M, Nojima T, and Miyakoshi J: Phosphorylation and gene expression of p53 are not affected in human cells exposed to 2.1425 GHz band CW or W-CDMA modulated radiation allocated to mobile radio base stations. *Bioelectromagnetics* 2006, 27, 494-504.

Huber R, Treyer V, Borbely A A, Schuderer J, Gottselig J M, Landolt H P, Werth E, Berthold T, Kuster N, Buck A, and Achermann P: Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG. *J. Sleep Research* 2002, 11, 289-295.

Huber R, Treyer V, Schuderer J, Berthold T, Buck A, Kuster N, Landolt H P, and Achermann P: Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow. *Europ. J. Neurosci.* 2005, 21, 1000-1006.

6.2 Was tun mit dem Restrisiko?

Risikowahrnehmung und Risikokommunikation

Peter Wiedemann

Alle vorherigen Ausführungen in diesem Buch führten zu dem Schluss, dass es kein allgemein akzeptiertes eindeutiges Resümee gibt, ob Funkfelder oder insbesondere gepulste Felder die Gesundheit beeinträchtigen. Es bleibt der Umgang mit dem Risiko, dass es vielleicht bisher unerkannte Effekte gibt, die einen Einfluss auf die Gesundheit nehmen könnten. Risiken gehören – bewusst oder unbewusst – überall zu unserem Leben, sei es in der Lebensmittelversorgung, im Wohnumfeld mit den verwendeten Bau- und Ausstattungsmaterialien oder – vielleicht noch am deutlichsten – im Reiseverkehr. Diese Risiken richtig einzuschätzen und ihre Bedeutung angemessen zu bewerten, ist auch für Experten nicht immer einfach.

Subjektive Risikowahrnehmung

Vergleicht man die subjektiven Risikobeurteilungen von Laien mit den entsprechenden wissenschaftlichen Risikoabschätzungen, so zeigen sich meist nur geringe Übereinstimmungen. Eine naheliegende Erklärung für diese Diskrepanz ist, dass Laien nicht über das Wissen verfügen, um zu kompetenten Risikobeurteilungen zu kommen. Zweifellos gibt es solche Wissensdefizite – als Erklärung für die Unterschiede reichen sie aber nicht aus. Vielmehr ist die intuitive Risikobeurteilung durch eine Reihe von Besonderheiten geprägt, von denen einige – die für die Bewertung des Mobilfunkrisikos bedeutsamen – nachfolgend genauer beschrieben werden.

Mehrdimensionalität von Risiko

Die Forschung zur Risikowahrnehmung hat gezeigt, dass Laien Risiken nach anderen Kriterien beurteilen als Experten (Jungermann & Slovic 1993; Slovic 1987). Während für Experten bei der Risikoabschätzung die möglichen Schäden und deren Wahrscheinlichkeit von zentraler Bedeutung sind, beziehen Laien zumeist noch weitere Aspekte in ihre intuitive Risikobeurteilung ein. Hierzu gehört zum Beispiel die Kontrollierbarkeit eines Risikos sowie die Freiwilligkeit der Risikoübernahme. Weitere bedeutsame Aspekte sind das Katastrophenpotenzial, die persönliche Betroffenheit von einem Risiko, die Einschätzung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes zu einem Risiko, der Nutzen einer Risikoquelle oder die Auswirkungen auf zukünftige Generationen.

Einfluss von Emotionen

Im Alltag sind Informationen über Risiken zumeist in einen semantischen Zusammen-

hang eingebettet, der wesentlich von den Massenmedien geprägt ist. Sie werden in Form von Skandalgeschichten, Enthüllungsberichten oder Katastrophen-erzählungen dargestellt, in denen nicht nur das Risiko, sondern die Personen und ihre Rollen bzw. Motive im Risikogeschehen beschrieben werden. Solche Beschreibungen können Emotionen evozieren, die ihrerseits die Risikobeurteilung beeinflussen.

So zeigen experimentelle Untersuchungen, dass die Darstellung eines 'objektiv' gleichen Risikos zu unterschiedlichen Beurteilungen der Schwere eines Risikos führt, je nachdem, welche Emotion mit der Darstellung nahe gelegt wird. Risikogeschichten, die Empörung hervorrufen, führen zu höheren Risikourteilen als Geschichten, die Nachsicht mit dem Risikoverursacher nahe legen (Wiedemann, Clauberg & Schütz 2003). Dazu wurde zum Beispiel die Größe des betroffenen Unternehmens variiert, wobei kleine und mittlere Unternehmen eher mit Nachsicht rechnen können als große multinationale Konzerne. Es wurden z. B. auch verschiedene Ursachen von Schadensereignissen präsentiert: So konnte ein Schaden trotz Vorsichtsmaßnahmen im Unternehmen aufgetreten sein oder die Ursache bewusst akzeptiert oder vernachlässigt worden sein. Letztere Variante zieht Empörung nach sich, während erstere zur Nachsicht veranlasst.

Falsche Vorstellungen

Wie in anderen Lebensbereichen haben Menschen auch in Bezug auf Risiken oftmals Vorstellungen über das Zustandekommen eines Risikos und die dabei bedeutsamen Ursache-Wirkungs-Zu-

sammenhänge. Kognitionspsychologen bezeichnen solche Vorstellungen als „mentale Modelle“. Sie verstehen darunter vereinfachte Abbilder, die Menschen von Vorgängen in der Welt haben.

Mitunter entsprechen die mentalen Modelle, die Laien über das Zustandekommen eines Risikos haben, nicht dem tatsächlichen Sachverhalt. Studien zu mentalen Modellen über die Wirkungsweise toxischer Stoffe haben beispielsweise gezeigt, dass Laien oftmals Aspekte kaum beachten, die aus Expertensicht für die Beurteilung eines Risikos bedeutsam sind: Sie differenzieren beispielsweise bei der Beurteilung des Risikos durch die Exposition mit Chemikalien nicht in dem Maße wie Experten zwischen unterschiedlichen Graden von Toxizität, und sie beachten auch kaum die Dosis-Wirkungs-Beziehung (MacGregor et al. 1999). Solche fehlenden oder falschen Vorstellungen über das Zustandekommen eines Risikos können dann zu einer falschen Risikobeurteilung führen.

Bestätigungsfehler

Bei der Bewertung von Risiken kommt es darauf an, alle relevanten Informationen heranzuziehen. Aber abgesehen davon, dass es häufig schwierig ist, die relevanten Informationen zu identifizieren, kann sich hier noch eine weitere Schwierigkeit ergeben. Menschen tendieren oftmals dazu, bei der Suche und Auswahl von Information vor allem die Informationen zu berücksichtigen, die in ihre Erfahrungswelt passen, d. h. ihre bereits bestehenden Vorstellungen oder Erwartungen unterstützen. Eine solche selektive Informationsbewertung führt dann dazu, dass die Gültigkeit dieser Erwartungen nicht hin-

reichend geprüft und alternative Erklärungen nicht in Betracht gezogen werden. Diese Tendenz zur Suche nach bestätigender Information wird als Bestätigungsfehler bezeichnet und ist in zahlreichen kognitions- und sozialpsychologischen Studien untersucht worden.

Eine weitere Konsequenz des Bestätigungsfehlers ist, dass die Güte des eigenen Wissens und damit auch die Richtigkeit der eigenen Einschätzung leicht überschätzt werden. Denn da nur Informationen betrachtet werden, die untereinander konsistent sind, kommen Informationen, die diese Einschätzung in Frage stellen, nicht zur Geltung und können so auch nicht zu einer Relativierung des eigenen Wissens beitragen.

Schwierigkeiten mit der Bedeutung von Wahrscheinlichkeitsaussagen

Die Bedeutung von Wahrscheinlichkeitsaussagen ist nicht immer klar – zumal es hier auch im wissenschaftlichen Verständnis durchaus unterschiedliche Interpretationen des Wahrscheinlichkeitsbegriffs gibt (z. B. Gigerenzer, Swijtink & Porter 1998; Smithson 1989). Zwar sind auch im Alltag Wahrscheinlichkeitsaussagen allgegenwärtig – etwa im Wetterbericht, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass es morgen regnet, mit 75 % angegeben wird. Aber was wird damit eigentlich ausgesagt? Bedeutet es, dass es in 75 % des Vorhersagegebiets regnen wird? Oder dass es morgen 18 Stunden (d. h. 75 % der Zeit) regnen wird? Oder an 75 % der Tage, an denen Wetterbedingungen wie am morgigen Tag herrschen? Eine ähnliche Situation besteht, wenn ein Arzt einem Patienten sagt, dass bei einem Medikament eine 30 %ige Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Nebenwirkung besteht. Er will damit zum Ausdruck bringen, dass bei 3 von 10 Patienten, die das Medikament einnehmen, mit dieser Nebenwirkung zu rechnen ist. Der Patient dagegen versteht dies vielleicht ganz anders – dass er nämlich in 30 % der Zeit, in der er das Medikament einnimmt, an den Nebenwirkungen leidet (dazu Gigerenzer 2002, 14f.). Es ist nicht immer klar, auf welche Ereignisklasse sich Wahrscheinlichkeitsaussagen beziehen, jedenfalls für Laien.

Negative Folgen der Darstellung von Unsicherheiten von Risikoabschätzungen

Wissenschaftliche Abschätzungen von Gesundheitsrisiken sind häufig mit Un-

sicherheiten behaftet. Beispielsweise stellt das deutsche Bundesinstitut für Risikobewertung bei seiner Einschätzung der Gesundheitsrisiken von Acrylamid in Lebensmitteln fest: „Die genaue Höhe des Krebsrisikos durch Acrylamid für die Bevölkerung lässt sich nicht mit Sicherheit quantifizieren. Konservative Risikoabschätzungen ergeben bei einer angenommenen täglichen Acrylamidaufnahme von 1 µg pro kg Körpergewicht über die gesamte Lebenszeit ein Krebsrisiko im Bereich von 6 bis 100 zusätzlichen Krebsfällen pro 10.000 Individuen“ (BfR 2004, S. 4). Wie wirken sich solche Unsicherheiten (hier immerhin mehr als eine Größenordnung) auf die Adressaten der Risikoinformation aus? Oder wenn in der Broschüre des Internationalen EMF-Projekts der WHO zu lesen ist: „No major public health risks have emerged from several decades of EMF research, but uncertainties remain.“

Untersuchungen zeigen, dass die Thematisierung von Unsicherheiten unterschiedliche Bewertungen zur Folge haben kann. Zum Teil führt sie zu einer Steigerung des Vertrauens in die jeweilige Informationsquelle, zum Teil wird sie aber auch als Zeichen von Inkompetenz und Unehrllichkeit gewertet (vgl. Johnson und Slovic, 1995, 1998). Vor allem aber werden Unsicherheiten meist nicht als in der Natur der Sache liegend gesehen, sondern sozialen Faktoren zugeschrieben (Eigeninteressen der Experten, Inkompetenz).

Risikowahrnehmung: Mobilfunk

Bislang gibt es nur wenige Studien, die sich mit EMF unter dem Aspekt von Risikowahrnehmung und -kommunikation befassen, sieht man einmal von der deskriptiven Umfrageforschung ab, die parallel mit der Entwicklung der Risikodiskussion über den Mobilfunk in der Öffentlichkeit und in den Medien an Bedeutung gewann (vgl. Infas 2006).

Die erste Arbeit stammt von Morgan et al. (1985). Teilnehmer waren 116 Absolventen der Carnegie Mellon Universität. Basierend auf einem psychometrischen Ansatz hatten die Teilnehmer der Studie verschiedene Risikoquellen – darunter auch Hochspannungsleitungen, elektrische Heizdecken, Mikrowellen und Videobildschirme – auf neun Skalen zu bewerten. Eine faktorenanalytische Auswertung ergab drei Faktoren: (1) Schrecklichkeit des

Risikos, (2) Bekanntheit des Risikos und (3) Anzahl der betroffenen Personen. Die Autoren stellen allerdings nur eine 2-Faktorenlösung dar: Danach werden nur die elektromagnetischen Felder der Hochspannungsleitungen („larger powerlines“) als unbekannte und bedrohliche Risiken angesehen. Sie werden ähnlich bewertet wie Pestizide und Röntgenstrahlen. Verglichen mit anderen Alltagsrisiken werden die EMF-Risiken jedoch am wenigsten riskant eingeschätzt. Der zweite Teil der Studie von Morgan et al. (1985) war eine Evaluation. Im Mittelpunkt standen hier die Hochspannungsleitungen und die elektrischen Heizdecken. Untersucht wurde, wie sich unterschiedlich detaillierte Informationen über Hochspannungsleitungen auf die Risikowahrnehmung und die Präferenz für verschiedene Risikomanagement-Maßnahmen auswirken. Dabei wurde der Umfang der Risikoinformation sowie der Informationen über Alltagsexpositionen mit EMF variiert. Es zeigte sich, dass jede Information – unabhängig vom Detaillierungsgrad – die Risikowahrnehmung bezüglich EMF verstärkt.

Im Jahr 1994 veröffentlichten die gleichen Autoren eine weiterführende Arbeit (Mac Gregor et al. 1994). Leitfrage war: Wie wirkt Risikoinformation über EMF auf die Risikowahrnehmung? Untersucht wurde, wie Laien auf eine EMF-Informationsbroschüre reagieren. Insgesamt nahmen 199 Personen in zwei separaten Untersuchungen in den Jahren 1990 und 1993 an der Studie teil. Dabei wurden 22 Risikoquellen verwendet, vier davon waren EMF-Risikoquellen (Hochspannungsleitungen, elektrische Heizdecken, elektrische Dosenöffner und Haarföhne), die auf 8 Skalen zu bewerten waren. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Anstieg der Risikowahrnehmung. Nach Lesen der Broschüre vertreten die Probanden in einem höheren Maß die Meinung, dass elektromagnetische Felder physiologische und kognitive Parameter beeinflussen können und dass sie Auslöser für Krankheiten sind. Das war insbesondere bei der Untersuchung aus dem Jahr 1993 der Fall. Offenbar spielt hierbei auch die Zeit – im Sinne der Intensivierung der öffentlichen Diskussion über die Jahre – eine Rolle.

Sowohl 1990 als auch 1998 veröffentlichten Morgan und Mitarbeiter Studien zu EMF, die Fragen zu Exposition, genauer zur

Abhängigkeit der Expositionsstärke vom Abstand zur Expositionsquelle, in den Mittelpunkt rücken (Morgan et al. 1990, Read & Morgan 1998). An der Untersuchung von 1998 nahmen 112 Personen aus dem akademischen Umfeld teil. Personen mit über die gewöhnliche Schulbildung hinausgehenden Physik-Kenntnissen waren ausgeschlossen. Diese Informationen wurden auf verschiedene Weise gegeben (z. B. nur als Text, mit Hilfe verschiedener Grafiken mit kurzen Texten, als Kombination von ausführlichen Texten und Grafik). Die Ergebnisse zeigten zum einen, dass Laien die Abhängigkeit der Expositionsstärke vom Abstand unterschätzen, anders ausgedrückt: Sie überschätzen die quadratisch mit dem Abstand fallende Expositionsstärke. (Allerdings handelt es sich hier um ideale Beziehungen, in der Praxis ergeben Messungen zuweilen auch andere Zusammenhänge.) Zum anderen zeigte Risikokommunikation positive Effekte: Unter allen Bedingungen der Informationsvermittlung zeigten sich signifikante Verbesserungen der Expositionsschätzungen gegenüber den Pretests.

Ein etwas anderes Interesse haben Siegrist et al. (2006), die die affektive Bewertung des Mobilfunks in den Mittelpunkt rücken. Sie gehen davon aus, dass nicht kognitive Variablen, sondern affektive Wertungen die Risikowahrnehmung beeinflussen. Für ihre Untersuchung nutzten sie eine neue Technik zur Messung impliziter Einstellungen, den Impliziten Assoziationstest (IAT), der auf Reaktionszeitmessungen beruht (vgl. Greenwald et al. 1998). Dabei werden die Reaktionszeiten als Indikator für die Stärke einer assoziativen Verknüpfung zwischen einem Referenzobjekt und affektiven Attributen angesehen. Wenn die Reaktionszeit zum Erkennen von Kombinationen von positiven Attributen und dem Referenzobjekt kleiner ist als die Zeit zum Erkennen von Kombinationen des Referenzobjekts mit negativen Attributen, so geht man davon aus, dass eine positive Bewertung vorherrscht. Umgekehrt gilt: Ist die Reaktionszeit zum Erkennen von Kombinationen von negativen Attributen und dem Referenzobjekt kleiner als die Zeit zum Erkennen von Kombinationen des Referenzobjekts mit positiven Attributen, so herrscht eine negative Bewertung vor.

In ihrer Studie untersuchten Siegrist et al. (2006) in zwei IAT Experimenten einerseits Basisstationen versus Hochspannungsleitungen sowie zum anderen Basisstationen versus elektrische Haushaltsgeräte. Als affektive Attribute nutzten die Autoren verschiedene semantische Varianten von „sicher“ und „riskant“. Teilnehmer an den beiden Experimenten waren 31 Experten und 28 Laien. Der IAT zeigt keine signifikanten Effekte für Basisstationen im Vergleich mit Hochspannungsleitungen – beide werden als vergleichsweise riskant eingeschätzt. Dagegen wurden Basisstationen im Vergleich zu elektrischen Haushaltsgeräten als signifikant riskanter eingeschätzt. Dieses Ergebnis fand sich auch bei den Experten.

Siegrist et al. (2005) haben eine Risikoperzeptionsstudie zum Mobilfunk durchgeführt. Grundlage war eine telefonische Befragung von 1015 Schweizern und Schweizerinnen aus dem Jahr 2002. Dabei interessierten neun verschiedene EMF-Risikoquellen (Handys, Basisstationen, Radiosender, TV Sender, Mikrowellen-Geräte, TV-Geräte, Hochspannungsleitungen, Infrarot-Lampen und Stromtrassen für die Eisenbahn), die bezüglich Risiko, Nutzen und Vertrauen eingeschätzt wurden. Darüber hinaus wurden Assoziationen erhoben und Wissensfragen gestellt. Die Assoziationen zu Basisstationen waren leicht negativ. Bezüglich Risikowahrnehmung stehen Basisstationen und Handys an der Spitze. Das geringste Risiko wird Radiosendern zugesprochen. Insgesamt korrelieren die Risikowahrnehmungen kaum mit der wahrgenommenen Entfernung der Wohnung der Befragten von der nächsten Basisstation, wohl aber findet sich ein schwach negativer Zusammenhang mit der Häufigkeit der Handynutzung. 26 % der Befragten glauben, dass EMF Krebs verursachen kann und 25 % sind der Auffassung, dass EMF-Risiken von Basisstationen nicht hinreichend geregelt sind. Damit einher geht die Überzeugung von 60 % der Befragten, dass wegen der Risiken die Nutzung von Handys bei Kindern und Jugendlichen stärker eingeschränkt werden sollte. Eine Regressionsanalyse zeigt, dass das wahrgenommene EMF-Risiko im Wesentlichen von dem Glauben an paranormale Phänomene, von dem Generalverdacht „Most chemical substances cause cancer“ sowie vom Vertrauen in die Risikoregulation und der Nutzenwahrnehmung abhängt.

Schreiner et al. (2006) untersuchten 2004 in einer repräsentativen Schweizer Studie mit 2048 Teilnehmern die Prävalenz von Symptomen, die EMF Expositionen oder anderen Ursachen wie Stress, Wetter, Lärm usw. attribuiert werden. Die Daten deuten darauf hin, dass 5 % der Befragten ihre Symptome EMF zuschreiben. Dominant sind aber die Zuschreibungen zu Stress und Wetter mit zirka 78 %. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn nach den Ursachen von gesundheitlichen Sorgen gefragt wird. Hier spielen Luftverschmutzung und UV-Strahlung sowie Verkehrsunfälle und Gen-Food die entscheidende Rolle. Basisstationen liegen im Mittelfeld: Immerhin machen sich über 35 % starke und beträchtliche Sorgen um ihre Gesundheit wegen der Basisstationen.

Eine ähnliche Studie stammt von Hutter et al. (2004). Teilnehmer waren 123 Personen, die bei Anhörungen im Zusammenhang mit der Standortwahl für Basisstationen partizipierten sowie 366 Medizinstudenten der Universität Wien. Bis auf Basisstationen und Handys sind die Risikobewertungen in den beiden Gruppen sehr ähnlich. Es ist keine Überraschung, dass die Medizinstudenten bei Basisstationen und Handys geringere Risiken sehen als die Teilnehmer an den Anhörungen.

Zwei Studien befassen sich mit der Risikowahrnehmung von niedergelassenen Ärzten für Allgemeinmedizin. Leitgeb et al. (2005) befragten 196 österreichische Allgemeinmediziner im Jahr 2003. Nur 2 % der Befragten schließen aus, dass EMF Krankheiten verursachen kann. Und nur 1 % verneint die Möglichkeit, dass EMF zusammen mit anderen Umweltfaktoren Krankheiten bewirken kann. Als mögliche Ursache für gesundheitliche Beschwerden sehen die Ärzte vor allem Hochspannungsleitungen, Handys und Basisstationen an. Huss und Rösli (2006) haben eine ähnliche Untersuchung in der Schweiz durchgeführt. Sie befragten 342 Ärzte der Allgemeinmedizin nach Patienten mit EMF-attribuierten Symptomen. Bezogen auf derartige Symptome sind 54 % der befragten Ärzte der Meinung, dass ein Zusammenhang plausibel ist, 29 % halten ihn für nicht plausibel und 17 % wissen es nicht. Bemerkenswert ist, dass 60 % der Ärzte einen Zusammenhang zwischen EMF-Exposition und Tumoren für plausibel halten.

Siegrist und Kollegen haben auch eine Untersuchung zu Vertrauen und Konfidenz durchgeführt (Siegrist et al. 2003). Basierend auf einem Telefon-Survey mit 1313 Teilnehmern aus dem Jahr 2002 prüften die Autoren mittels eines Strukturgleichungsansatzes ihr „Dual-Mode Model of Social Trust and Confidence“. Dieses Modell unterscheidet soziales Vertrauen und Konfidenz. Soziales Vertrauen betrifft hier vor allem Werte-Übereinstimmung (z. B.: „Mobile phone companies value profit more highly than I do.“). Konfidenz baut dagegen auf Erfahrung (z. B.: „It is a fact that radiation from antennas has caused many health problems by people living nearby.“). Im gegebenen Fall wurde im „Dual-Mode“-Modell die abhängige Variable „Kooperation“ als Akzeptanz von Basisstationen in der Nachbarschaft operationalisiert. Siegrist et al. (2003) schlussfolgern, dass ihr Modell die vorliegenden Daten gut erklärt und die Akzeptanz sowohl von der Konfidenz als auch von sozialem Vertrauen abhängt. Dabei ist die Konfidenz die entscheidende Variable; diese aber hängt kaum mit Erfahrung (past performance) zusammen, wie im Modell angenommen, sondern korreliert hoch mit dem sozialen Vertrauen. Dieser Umstand scheint – jedenfalls im EMF-Fall – gegen das „Dual-Mode“-Modell zu sprechen.

Was tun? Und kann man hoffen?

Fischhoff hat 1995 in einem Artikel für die Zeitschrift ‚Risk Analysis‘, seine Lesart der Geschichte des Verhältnisses von Risiko-Laien und Risiko-Experten zusammengefasst. Danach lässt sich folgendes sagen: In längst vergangenen Tagen blieben Experten unter sich und die Laien blieben außen vor. Dem folgte die Ära von Information und Aufklärung, die Blütezeit der klassischen Risikokommunikation. Die Experten versuchten, das Risiko-ABC zu erklären. Das erwies sich aber zumeist als wenig hilfreich. Die Idee der Partnerschaft zwischen Laien und Experten fand immer mehr Anhänger: „All we have to do is make them Partners“. Fairness, Respekt und Vertrauen beschreiben die diesbezüglichen Anforderungen an gute Risikokommunikation. Keine Frage, diese Qualitäten sind für gute Kommunikation unabdingbar. Aber auch hier gilt: Wenn das Thema auf das Risiko kommt, müssen immer noch die Risikozahlen – die „numbers“ – erklärt werden.

Es lohnt sich, hier etwas genauer hinzuschauen. Risikokommunikation als Aufklärung will helfen, Risikowissen zu erzeugen. Beispielsweise soll vermittelt werden, kleine Wahrscheinlichkeiten besser einzuschätzen, Fehler und Fallen zu vermeiden oder die Lücken im eigenen Risiko-Modell zu erkennen. Gegen den Optimismus, dass jeder solche Zusammenhänge lernen kann, wird man keinen vernünftigen Einwand finden. Das ist aber nicht das Problem. Die Schwierigkeit besteht darin, dass Risikowahrnehmungen, einmal ausgebildet, weitgehend stabil sind. Sie lassen sich nicht ohne weiteres verändern. Darüber hinaus zeigt die empirische Forschung zur Risikowahrnehmung, dass emotionale Faktoren die Wahrnehmung und Bewertung von Risiken beträchtlich beeinflussen. Sie bleiben außerhalb des Wirkkreises eines Aufklärungsprogramms der beschriebenen Art. Risikoaufklärung – da sollte man sich nichts vormachen – ist nur ein langfristig erreichbares Bildungsziel.

Risikokommunikation beim Mobilfunk

Eine besondere Herausforderung stellt die Kommunikation über wissenschaftliche Studien und Risikoabschätzungen dar, insbesondere dann, wenn ein Risiko nicht eindeutig festgestellt werden kann. Es geht dann vor allem darum, den Unterschied zwischen einem vermuteten und einem nachgewiesenen Risiko zu vermitteln.

Das Problem besteht darin, dass ohne wissenschaftliches Grundverständnis Risikoinformationen nicht richtig verstanden werden können. Ohne dieses Wissen bleiben Informationen bestenfalls nutzlos, schlechtestenfalls verstärken sie Fehleinschätzungen.

Das erforderliche Bewertungswissen ist komplex: Neben der Qualität der Studie (Kann damit eine Kausalbeziehung abgeschätzt werden?) geht es um das wissenschaftliche Gesamtbild (Was sagen die anderen Studien im gleichen Untersuchungsfeld?), um die Frage der Übertragbarkeit der Befunde auf den Menschen sowie um das Problem, ob die Wirkungen, um die es in der Untersuchung geht, gesundheitlich bedeutsam sind.

Von einem Risiko kann dann ausgegangen werden, wenn es einen Effekt gibt, der durch andere Untersuchungen bestätigt ist und der darüber hinaus auch für die Gesundheit des Menschen bedeutsam ist. Für die Höhe des Risikos ist entscheidend, wie häufig die bestimmte Erkrankung ist und wer in welchem Ausmaß von dem Risikofaktor betroffen ist. Schließlich spielt auch eine Rolle, wie groß der Risikofaktor selbst ist.

Solche komplexen Zusammenhänge müssen in der Risikokommunikation verdeutlicht werden. Das zeigt aber auch die Grenzen auf.

Literatur

BfR: Zwei Jahre Acrylamid in Lebensmitteln – Eine Bilanz aus der Sicht der Risikobewertung, (Stellungnahme des BfR vom 19. März 2004); Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin.

Fischhoff, B. (1995): Risk perception and communication unplugged: twenty years of process. *Risk Analysis*, 15(2), 137-145.

Gigerenzer, G. (2002): Das Einmaleins der Skepsis. Über den richtigen Umgang mit Zahlen und Risiken. Berlin: Berlin Verlag.

Gigerenzer, G., Swijtink, Z. & Porter, T. (1998): Das Reich des Zufalls. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Greenwald, A.G.; MCGhee, D.E. & Schwartz, J.L.K. (1998): Measuring individual differences in implicit cognition: The implicit association test. *Journal of Personality and Social Psychology*, 48, 1464-1480.

Huss, A. & Rösli, M. (2006): Consultations in primary care for symptoms attributed to electromagnetic fields – a survey among general practitioners. *BioMedCentral Public Health*, 6, 267.

Hutter, H.-P.; Moshhammer, H.; Wallner, P. & Kundi, M. (2004): Public perception of risk concerning celltowers and mobile phones. *Soz.-Präventivmed*, 49, 62-66.

Johnson, B.B. & Slovic, P. (1995): Presenting uncertainty in health risk assessment: initial studies of its effects on risk perception and trust. *Risk Analysis*, 15(4), 485-494.

- Johnson, B.B. & Slovic, P. (1998): Lay views on uncertainty in environmental health risk assessment. *Journal of Risk Research*, 1(4), 261-279.
- Johnson-Laird, P.N. (1983): *Mental Models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jungermann, H. & Slovic, P. (1993): Die Psychologie der Kognition und Evaluation von Risiko. In: G. Bechmann (Ed.), *Risiko und Gesellschaft* (pp. 167-207). Opladen: Westdeutscher Verlag.
- MacGregor, D.G., Slovic, P. & Morgan, M.G. (1994): Perception of risks from electromagnetic fields: a psychometric evaluation of a risk-communication approach. *Risk Analysis*, 14 (5), 815-828.
- MacGregor, D.G., Slovic, P. & Malmfors, T. (1999): „How exposed is exposed enough?“ Lay inferences about chemical exposure. *Risk Analysis*, 19(4), 649-659.
- Morgan, G. M., Slovic, P., Nair, I., Geisler, D., MacGregor, D., Fischhoff, B., et al. (1985): Powerline frequency electric and magnetic fields: A pilot study of risk perception. *Risk Analysis* 5(2), 139-149.
- Morgan, G.M, Florig, H.K., Nair, I., Cortes, C., Marsh, K. & Pavlosky, K. (1990): „Lay Understanding of Power-Frequency Fields“, *Bioelectromagnetics*, 11, 313-335.
- Read, D. & Morgan, G.M. (1998): The Efficacy of Different Methods for Informing the Public About the Range Dependency of Magnetic Fields from High Voltage Power Lines. *Risk Analysis*, 18, 5, 603-610.
- Schreier, N., Huss, A. Rösli, M. (2006): The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland. *Soz Präventivmed*. 2006; 51 (4):202-9.
- Siegrist, M.; Earle, T.C. & Gutscher, H. (2003): Test of a Trust and Confidence Model in the Applied Context of Electromagnetic Field (EMF) Risks. *Risk Analysis*, 23, 4, 705-716.
- Siegrist, M.; Earle, T.C.; Gutscher, H. & Keller, C. (2005): Perception of Mobile Phone and Base Station Risks. *Risk Analysis*, 25, 5, 1253-1264.
- Siegrist, M.; Keller, C. & Cousin, M.-E. (2006): Implicit Attitudes Toward Nuclear Power and Mobile Phone Base Stations: Support for the Affect Heuristic. *Risk Analysis*, 26, 4, 1021-1029.
- Slovic, P. (1987): Perception of risk. *Science*, 236, 280-285.
- Smithson, M. (1989): Ignorance and uncertainty. *Emerging paradigms*. New York: Springer.
- Wiedemann, P.M., Clauberg, M. & Schütz, H. (2003). Understanding amplification of complex risk issues: The risk story model applied to the EMF case. In: N. Pidgeon, R. Kasperson & P. Slovic (Eds.), *The social amplification of risk* (pp. 286-301). New York: Cambridge University Press.
- WHO (o.J.) EMF Project Promotional Broschüre. http://www.who.int/peh-emf/about/emf_brochure_webversion.pdf

7 Glossar

Dieses Glossar enthält Erklärungen zu einigen ausgewählten, im Zusammenhang mit dem Thema auftretenden Abkürzungen und Begriffen. Weitere Informationen sind im Internet zu finden im Glossar des EMF-Portals (<http://www.emf-portal.de/glossar.php?l=g>).

Begriff	Erklärung
3G	dritte Generation der Mobilfunktechnik (→ UMTS)
abgeleiteter Grenzwert	messbarer → Grenzwert im freien Feld (elektrische oder magnetische Feldstärke des ungestörten Feldes), der so festgelegt ist, dass bei seiner Einhaltung der → Basisgrenzwert sicher unterschritten wird.
analog	Analog wird ein Signal bezeichnet, wenn seine Stärke (Amplitude) kontinuierlich jeden Wert zwischen einem Minimum und einem Maximum annehmen kann (Beispiel: Auslenkung einer Federwaage oder des Zeigers eines Messgerätes). Der Gegensatz zu analog ist → digital.
Axon	auch Neurit: Fortsatz einer Nervenzelle, der die Signale weiterleitet.
Basisgrenzwert	→ Grenzwert, der direkt auf nachgewiesenen gesundheitlichen oder biologischen Auswirkungen von Feldern beruht. Er bezieht sich auf physikalische Größen im Körper, die als biologisch wirksam gelten. So sind bis 100 kHz Basisgrenzwerte für die Stromdichte, darüber für die spezifische Absorptionsrate (→ SAR) mit einem zusätzlichen Sicherheitsabstand festgelegt.
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz und Reaktorsicherheit
Bluetooth	Standard für die Funk-Kommunikation mit geringen Reichweiten bei 2,4 GHz, um Desktop- und Laptop, Mobiltelefone o. ä. drahtlos miteinander zu verbinden
burst	allgemein: eine Periode intensiver Aktivität, daraus abgeleitet für die Nachrichtentechnik: ein Zeitabschnitt in der Signalübertragung, in dem ein Bündel von Signalen als eine Einheit übertragen wird (Impulsbündel)
CDMA	Code Division Multiple Access = Mehrfachzugriffsverfahren in einem Übertragungssystem: Mehrere Nutzer können gleichzeitig das System nutzen, indem ihre Signale durch verschiedene Codes unterschieden werden
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research = Europäisches Netzwerk von Wissenschaftlern zur Förderung des Informationsaustausches
CW	Continuous Wave = kontinuierlicher Wellenzug, mit konstanter Amplitude und → Frequenz

A

B

C

DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications = Standard für Schnurlos-Telefone bei 1,9 GHz (→ Anhang 5)
Demodulation	in der Nachrichtentechnik der umgekehrte Vorgang der → Modulation, d. h. die Rückgewinnung der niederfrequenten Schwingungen, die einer hochfrequenten Trägerschwingung durch Modulation aufgeprägt wurden. Wesentliche Frage bei der Auswirkung von → EMF auf biologische Systeme ist die, ob auch hier Demodulationen elektromagnetischer Signale möglich sind. (→ Abschnitt 3.1.2)
digital	in diskrete Stufen aufgeteilt und durch ganze Zahlen darstellbar und damit prädestiniert für maschinelle Bearbeitung. Speziell in Computern werden die Daten binär, d. h. nur mit zwei Ziffern, als Abfolge von Nullen und Einsen bzw. zwei elektrischen oder magnetischen Zuständen dargestellt. Der Gegensatz zu digital ist → analog.
Dipol	System mit zwei örtlich getrennten, gegensätzlichen elektrischen Ladungen (+/-) gleicher Größe, so dass im elektrischen Feld eine Ausrichtungskraft (Drehmoment) in Feldrichtung wirkt (in der Biologie z. B. in Molekülen oder Zellen)
DNA	deutsch: DNS, Desoxyribonukleinsäure = Träger der genetischen Information bei allen Lebewesen. Die DNA besteht aus Nukleotiden, die den Zucker 2-Desoxy-D-Ribose und eine der organischen Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) oder Thymin (T) enthalten und über Phosphodiesterbrücken miteinander verknüpft sind. In der Natur kommt DNA meist als Doppelstrang vor, der durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen A und T bzw. zwischen G und C zusammengehalten wird. Die genetische Information liegt in der Abfolge der Basen auf den Einzelsträngen. Die DNA wird bei der Replikation identisch verdoppelt.
DVB	Digital Video Broadcasting (-H = Handy, -T = Terrestrial)
elektrotonisch	Art der Übertragung von Erregungen innerhalb von und zwischen Zellen, hier durch Ionenflüsse
ELF	Extremely Low Frequency = Extrem niedrige → Frequenz, d. h. im Bereich von 30 – 300 Hz.
EMF	Elektromagnetisches Feld = Feld, das bei bewegter elektrischer Ladung entsteht
EMVU	Elektromagnetische Verträglichkeit mit der Umwelt = Einfluss technisch erzeugter elektromagnetischer Felder auf die Natur und den Menschen,
eV	Elektronenvolt (nach DIN: Elektronvolt) = Einheit der Energie in der Atomphysik. (1 eV ist die Energie, die ein Teilchen mit einer Elementarladung erhält, wenn es die Spannung von 1 Volt frei im Vakuum durchläuft. $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$) Sichtbares Licht hat eine (Quanten-) Energie von 1,5 – 3,3 eV, Funksignale 0,00001 – 0,0001 eV. (→ Abschnitt 3.1.4)
FDMA	Frequency Division Multiple Access = Frequenzmultiplex-Verfahren, bei dem das verfügbare → Frequenzband eines Übertragungskanal auf mehrere Teilnehmer so aufgeteilt wird, dass jedem Teilnehmer ein Teil dieses Bandes exklusiv zur Verfügung steht.
FGF	Forschungsgemeinschaft Funk e.V.
Frequenz	allgemein: Wiederholungen eines wiederkehrenden Ereignisses, gemessen: Anzahl der Schwingungen bzw. Durchläufe pro Zeiteinheit (üblicherweise pro Sekunde). Einheit: Hertz (→ Hz), $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$.

D

E

F

GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying = spezielle Phasen → modulation
Gradient	Richtung der größten Steigung (= „Wegweiser“ auf den steilsten Weg nach oben), mathematisch: Ableitung einer Größe (z. B. nach den Raumkoordinaten)
Grenzwert	verbindlich einzuhaltender Maximal- oder Minimalwert einer Größe; bzgl. der → EMVU sind meist Maximalwerte physikalischer Größen angegeben, bis zu denen schädigende Wirkungen auszuschließen sind. Die rechtliche Verbindlichkeit für die → EMVU ergibt sich in Deutschland aus der 26.BImSchV, der Empfehlung des Rates 1999/519/EG und der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11. Man unterscheidet zwischen → Basisgrenzwerten und → abgeleiteten Grenzwerten. In der Arbeitssicherheit spricht man von „zulässigen Werten“.
GSK	vollständig: → GMSK
GSM	Global System for Mobile Communications = Internationaler Standard für den Mobilfunkbetrieb der 2. Generation mit Sendefrequenzen bei 900 und 1800 MHz (→ Anhang 2)
Hertz (Hz)	Maßeinheit für die → Frequenz in Schwingungen bzw. Pulsen pro Sekunde, davon abgeleitet kHz = 1000 Hz, MHz = 1000 kHz, GHz = 1000 MHz.
HF	Hochfrequenz = → Frequenzbereich, der sich für Funkübertragung eignet (bis 300 GHz). Die untere Abgrenzung (zur → NF) ist mit Zahlenwert nicht eindeutig definiert. Technisch liegt sie mit weniger als 30 kHz dort, wo die Eignung als Trägerfrequenz beginnt. Die biologisch orientierte Abgrenzung zwischen NF und HF erfolgt gemäß den wissenschaftlich belegten Effekten im Organismus. Unterhalb 100 kHz ist die Stromdichte die wirkungsvollste Größe, darüber die absorbierte Energie (→ SAR). Unterhalb von ca. 10 MHz können Stimulationseffekte an Nerven, Muskeln, → Neuronen und Sinnesrezeptoren auftreten, oberhalb von ca. 10 MHz konnten bisher nur thermische Wirkungen nachgewiesen werden.
Hüllkurve	in der nachrichtentechnischen → Modulation die Kurve, durch die die → HF moduliert, eingehüllt wird. In der Amplitudenmodulation erhält man die Hüllkurve, indem man die Maxima bzw. Minima des Kurvenverlaufs der HF verbindet. Dies ist das aufmodulierte → NF-Signal.
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection = Internationale Kommission zum Schutz vor nicht → ionisierender Strahlung = 1992 gegründete Organisation internationaler Experten, die offiziell von der WHO als Beratungsgremium anerkannt ist und Empfehlungen zu → Grenzwerten ausarbeitet
IEC	International Electrotechnical Commission, internationales Gremium für Normung im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik
IEEE	Institute of Electrical and Electronic-Engineers = Berufsverband von Ingenieuren in 150 Ländern, führende Organisation zur Standardisierung (Schnittstellenstandards) in Fachgebieten der Elektrotechnik
Ion	durch ungleich viele → Protonen und Elektronen elektrisch geladenes Atom oder Molekül. Ein Ion mit Elektronenüberschuss ist negativ geladen (Anion), mit Protonenüberschuss positiv geladenen (Kation).
ionisierende Strahlung	Teilchen- oder Photonen- → Strahlung mit einer → Frequenz weit oberhalb der Funknutzung (d. h. weit über 300 GHz), die aufgrund ihrer hohen Quantenenergie beim Durchgang durch Materie Ionisation verursacht, d. h. ein Elektron von einem Atom oder Molekül entfernen kann und so ein → Ion und ein freies Elektron produziert (z. B. Alpha-Teilchen, Röntgen- und Gamma-Strahlung), (→ Abschnitt 3.1.1)

G

H

I

IP	Internet-Protokoll = technischer Standard zur Datenübertragung im Internet
IRPA	International Radiation Protection Association
ISM	Industrial Scientific Medical = → Frequenzbereiche u. a. bei 2,4 GHz für unlicenzierte Nutzung
IZGMF	Arbeitsgemeinschaft Informationszentrum gegen Mobilfunk, sieht sich als „Die Kritikerseite zu Mobilfunk und Elektrosmog“
IZMF	Informationszentrum Mobilfunk e.V., 2001 von den deutschen Mobilfunknetzbetreibern gegründet als Ansprechpartner bei allen grundsätzlichen Fragen zum Mobilfunk
Lamor-frequenz	Atomphysik: → Frequenz, mit der der → Spin eines Atomkerns, → Protons oder Elektrons um eine äußere Magnetfeldrichtung kreiselt. (→ Anhang 7)
LAN	Local Area Network = Netzwerk, das verschiedene Computer und Peripheriegeräte auf räumlich begrenztem Gebiet (z. B. in einem Raum oder Gebäude) über Kabelverbindung oder über Funk (→ WLAN) verbindet (→ Anhang 6)
Leistungsflussdichte	Energie, die pro Zeiteinheit eine Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle durchströmt (Werte in W/m ²).
Lipid	Sammelbegriff für Fette und fettähnliche Stoffe, die in organischen Lösungsmitteln gut, in Wasser aber schlecht löslich sind. Lipide umfassen Fette, Wachse, Phospholipide, Glyko-Lipide und Fettsäuren.
Magnetron	spezielle Magnetfeldröhre als HF-Generator zur Schwingungserzeugung hoher Frequenzen (Mikrowellenbereich ca. 0,3 bis 300 GHz), insbesondere bei Radar (Impuls-Magnetron) und Mikrowellen-Geräten.
Mechanismus	naturwissenschaftliche Beschreibung der Ursache und des Ablaufes eines (biologischen) Effektes. (→ Abschnitt 3.1.1)
Melanin	dunkler Farbstoff, der Haut, Haaren usw. ihre Farbe gibt
Melatonin	Hormon, das in der Zirbeldrüse im Gehirn gebildet wird und den Tag-Nacht-Rhythmus steuert.
miniWatt	Forschungsprojekt des „Bundesministeriums für Bildung und Forschung“ zur Minimierung der Immissionen zukünftiger Funkdienste (→ Abschnitt 2.3.2)
Mikrowellen	elektromagnetische Wellen mit einer (mikro=kleinen) → Wellenlänge im Bereich 1 m bis 1 mm, was einem → Frequenzbereich 0,3 bis 300 GHz entspricht. Sie werden z. B. in Mikrowellenherden (2,45 GHz), Radaranlagen und in drahtlosen Kommunikationssystemen (z. B. Mobilfunk, → WLAN, → Bluetooth, GPS, Satellitenfernsehen) verwendet.
Mikrowellen-Hören	durch energiereiche gepulste → Mikrowellen ausgelöster, nachgewiesener → thermischer Effekt im Kopf, bei dem durch thermische Ausdehnung erzeugte Druckwellen im Ohr zu einem Hörempfinden führen
MMF	Mobile Manufacturers Forum = Internationale Vereinigung der Funkausrüstungshersteller

L

M

Modulation	elektrotechnisches Verfahren, durch das die Information eines → NF-Signals einem → HF-Träger aufgeprägt (moduliert) wird und so in einem höheren → Frequenzband übertragen werden kann. Dabei kann als Variable, die sich entsprechend den Schwingungen des NF-Signals ändert, die Amplitude, die Frequenz oder die Phase genutzt werden. Dabei kann das → NF-Signal sowohl digitale als auch analoge Informationen enthalten.
MRT	Magnetresonanztomografie, auch als Kernspinresonanztomografie oder Spinechotomografie bezeichnet, engl.: Magnetic Resonance Imaging (MRI): Bildgebendes Verfahren zur Darstellung der inneren Strukturen des Körpers (speziell der weichen Gewebe und Flüssigkeiten), bei dem starke statische Magnetfelder und elektromagnetische Felder zur Anwendung kommen. (→ Anhang 7)
ms, μ s, ns	Millisekunde = eine tausendstel (10^{-3}) Sekunde, Mikrosekunde = eine millionstel (10^{-6}) Sekunde, Nanosekunde = eine milliardstel (10^{-9}) Sekunde
Sv	Sievert = Maßeinheit für die Äquivalentdosis H, d.h. die im Strahlenschutz angenommene biologische Wirkung → ionisierender Strahlung ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} / 1 \text{ kg}$).
MTHR	Projekt „Mobile Telecommunications and Health Research Programme“, Forschungsprogramm in Großbritannien
Myelinscheide	elektrisch isolierende Ummantelung der Nervenzellen
N	Newton, Maßeinheit für die Kraft ($1 \text{ N} =$ die benötigte Kraft, um 1 kg Masse in 1 Sekunde auf $1 \text{ Meter pro Sekunde}$ [m/s] zu beschleunigen; 1 N entspricht ungefähr der Gewichtskraft eines Körpers der Masse 102 g)
Neuron	Nervenzelle: elektrisch erregbare Zelle im Nervensystem zur Übertragung von Signalen
NF	Niederfrequenz = → Frequenzbereich unterhalb der Funkübertragungsfrequenzen (d.h. unterhalb ca 100 kHz → HF)
NRPB	National Radiological Protection Board = Nationales Komitee für Strahlenschutz in Großbritannien, jetzt Radiation Protection Division der Health Protection Agency (HPA)
Omics	inoffizielle Abkürzung für aktuelle Analysemethoden der Molekularbiologie mit den Teilthemen: Genomics, Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics
peer review	Überprüfung von Publikationsmanuskripten durch Wissenschaftler aus demselben Fachgebiet, die am Forschungsprojekt jedoch nicht beteiligt sind
Phosphen	durch inadäquaten Reiz (z. B. mechanisch, elektrisch oder magnetisch) auf der Netzhaut ausgelöste Lichtempfindung (z. B. Sternchensehen bei Druck auf das Auge) (→ Abschnitt 3.1.4)
Photon	Lichtquant → Quant. Die Energie eines Photons wird durch die Formel $h \times f$ bestimmt. ($h =$ Plancksches Wirkungsquantum $= 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $f =$ → Frequenz).
Proton	Kern des Wasserstoffatoms, elektrisch positiv geladenes „schweres“ Elementarteilchen, Bestandteil der Atomkerne. Die Anzahl der Protonen im Kern bestimmt die Ordnungszahl und die chemischen Eigenschaften des Atoms.

N

O
P

Quant	kleinste Portion einer physikalischen Größe, die nur diskrete Zustände annehmen kann. Nach der Quantentheorie sind im atomaren und subatomaren Bereich Zustandsänderungen nur in festgelegten Sprüngen möglich. So kommen z. B. nur halb- und ganzzahlige → Spins vor. Die Energie elektromagnetischer → Strahlung ist in Lichtquanten (→ Photonen) als kleinste Einheit unterteilt.
Quantelung	Festlegung einer Größe auf nur diskrete Werte bzw. Schritte statt kontinuierlicher Veränderungen
Rauschen	Thermisches Rauschen ist die unregelmäßige (statistische) Bewegung von Teilchen aufgrund ihrer thermischen Energie. Aus der thermischen Bewegung der Ladungsträger in elektrischen Schaltkreisen entstehen unregelmäßige Zustände elektrischer Kenngrößen wie Spannung und Strom, so dass sehr kleine Nutzsignale mit einfachen Methoden nicht mehr erkennbar sind („im Rauschen untergehen“).
RF	Elektrotechnik: Radio Frequency = englische Bezeichnung für → Hochfrequenz Biologie: Rezeptive Felder zur Einteilung des Gesichtsfeldes im Auge = Bereiche aus dem Gesamtbild, das wir sehen (entsprechend bestimmten Feldern auf der Netzhaut)
RFID	Radio Frequency Identification = Funkübertragungsverfahren, mit dem Objekte anhand ihrer per Funk übermittelten Kennung identifiziert werden, z. B. im Warenverkehr
SA	spezifische Absorption: ähnliche Größe wie die → SAR, beschreibt allerdings nicht die absorbierte Leistung, sondern die Energie als Messgröße.
SAR	Specific Absorption Rate = spezifische Absorptionsrate, gibt an, wieviel Leistung pro Masse (W/kg) in biologischem Material bei → HF-Exposition absorbiert wird. Als → Grenzwerte für die allgemeine Bevölkerung gelten in Deutschland bei Exposition des Ganzkörpers 0,08 W/kg und eines Teilkörpers 2 W/kg (gemittelt über 10 Gramm Körpergewebe und 6 Minuten).
Spektralanalyse	Zerlegung eines Signals in seine Anteile bei den einzelnen → Frequenzen (Frequenzspektrum) und frequenzspezifische Betrachtung
Spin	Atomphysik: Eigendrehimpuls von Elementarteilchen, d. h. Atomen oder deren Kernen (z. B. des → Protons), der nicht auf eine Bahnbewegung zurückgeführt werden kann. Er nimmt diskrete Werte an (gequantelt, → Quant). Auf dem Spin beruht das magnetische Moment der Teilchen. (→ Anhang 7)
SSK	Strahlenschutzkommission: 1973 durch das Bundesministerium des Innern geschaffen, um das Ministerium in den Angelegenheiten des Schutzes vor Gefahren → ionisierender Strahlen zu beraten. Seit 1986 berät die SSK das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, inzwischen auch bzgl. des Schutzes vor nicht-ionisierenden Strahlen.
Sterblichkeitsrate	oder auch Mortalität, als exakter demografischer Begriff „rohe Sterberate“, = bevölkerungsbezogene Betrachtung der Sterblichkeit: Sie wird durch Mortalitätsmaße beschrieben, welche die Zahl der Gestorbenen auf die Bevölkerung beziehen.
Strahlung	die Emission und Ausbreitung von Energie in Form von Wellen oder Partikeln im Raum. Wenn der Begriff Strahlung ohne Zusatz verwendet wird, bezieht er sich normalerweise auf elektromagnetische Strahlung (Licht-, Röntgen- oder Gammastrahlen), sonst auf die aus Elementarteilchen bestehende Strahlung (Alpha-, Betastrahlen, Neutronen). Im Bereich der Funkfrequenzen wird eher der Begriff „Wellen“ oder „Felder“ verwendet.

Q

R

S

Synapse	Übertragungsstelle für eine Erregung von einer Nervenzelle auf eine andere Nervenzelle oder eine Muskelzelle. Bei der chemischen Synapse wird ein Neurotransmitter in den synaptischen Spalt abgegeben und von den zugehörigen Rezeptoren der postsynaptischen Membran gebunden. Bei der elektrischen Synapse fließt der Strom direkt über Gap junctions.
TDMA	Time Division Multiple Access = Zeitmultiplex = → digitales Mehrfachübertragungsverfahren, bei dem mehrere Einzelsignale auf derselben → Frequenz durch zeitliche Aufteilung (Zeitschlitz) übertragen werden können
TETRA	Terrestrial Trunked Radio = europaweit anerkannter Standard für den → digitalen Bündelfunk (Betriebsfunk mit Nutzerbündelung durch dynamische Zuweisung von Kanälen), besonders für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) (→ Anhang 4)
thermischer Effekt	Die Begriffe „thermisch“ und „nicht-thermisch“ (oder „athermisch“) werden in der Literatur sehr unterschiedlich gebraucht. Die biophysikalische Definition des Begriffes „nicht-thermisch“ lautet: Ein Effekt ist dann nicht-thermisch, wenn unter dem Einfluss eines Feldes solche Veränderungen entstehen, die nicht durch eine Temperaturerhöhung erklärbar sind. (→ Abschnitt 3.1.1)
Trägerfrequenz	in der Hochfrequenztechnik die Grundfrequenz, der beim → Modulationsverfahren die Information des → NF-Signals aufgeprägt (moduliert) wird. Die Trägerfrequenz bestimmt die Eigenschaften des Signals auf dem Übertragungsweg (z. B. Reichweite, Reflexionsverhalten).
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System = Mobilfunkstandard der 3. Generation, der auf Grund hoher Übertragungsraten im Bereich 1900 – 2170 MHz neben Sprache auch Multimedia-Anwendungen (Bild- und Video) ermöglicht (→ Anhang 3)
V	Volt, Maßeinheit für die elektrische Spannung, d. h. die Potenzialdifferenz, die ein elektrisches Feld bietet; genaue Definition: Zwischen zwei Punkten besteht die Spannung 1 V, wenn die Arbeit 1 Joule [J] verrichtet wird, um die Ladung 1 Coulomb [Cb] von einem Punkt zum anderen zu bringen.
Vesikel	Bläschen; intrazelluläres, membranumschlossenes Gebilde
Vigilanz	wacher, aufmerksamer und reaktionsbereiter Bewusstseinszustand
V/m	Volt pro Meter = Maßeinheit für die elektrische Feldstärke
W	Watt, Maßeinheit für die Leistung: 1 W ist die Arbeit (= 1 Joule [J]) pro Zeit (= 1 Sekunde [s]).
Wellenlänge	kleinster räumlicher Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle, z. B. Abstand zweier Wellenberge. Bei elektromagnetischen Wellen sind Wellenlänge (l) und Frequenz (f) über die Gleichung $l \cdot f = c$ verknüpft (c = Lichtgeschwindigkeit)
Wellenleiter	Medium, in dem Wellen, hier höchstfrequente elektromagnetische Wellen (ab 300 MHz), leitergebunden übertragen werden können. In der Praxis, z. B. der Richtfunk- oder Radartechnik, werden meist rechteckige Hohlleiter verwendet, bei denen die Welle nicht im Material, sondern im Innenraum geführt wird.
Wi-Fi	Wireless-Fidelity = Zusammenschluss aus über 200 Unternehmen mit dem Ziel, den Betrieb verschiedener Funkgeräte nach dem IEEE 802-11-Standard zu gewährleisten.

T

U
V

W

WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access: Synonym für den Standard → IEEE 802.16, mit dem der breitbandige Zugang über Funk zu Netzen wie z. B. dem Internet standardisiert wird.
WLAN	Wireless Local Area Network = auf Funkübertragung basierender Zugriff auf ein → LAN
zirkadian	zirkadianer Rhythmus: Tag-Nacht-Rhythmus, d. h. biologischer Rhythmus, der sich etwa 24-stündig wiederholt wie z. B. Schlaf-/Wachzeiten, Hormonsekretion, Körpertemperatur, Nahrungsaufnahme

Z

8 Autorenverzeichnis

An den einzelnen Beiträgen wie auch der Zusammenfassung in diesem Sonderband waren jeweils mehrere Autoren und Redakteure, Lektoren und Layouter beteiligt. Sie werden hier mit Titel und Fachgebiet aufgeführt, um die besonderen Qualifikationen deutlich zu machen.

Die vollständige Adresse für eine Kontaktaufnahme ist bei der Forschungsgemeinschaft Funk erhältlich (Tel.: 0228 72622-0 oder E-Mail: info@fgf.de).

Dipl.-Biologe Christoph **Bächtle**,
Biologie, techn.

Prof. Dr. med. Hans-Jochen **Heinze**,
Medizin, Neurologie

Dipl.-Ing. Regina **Reichardt**,
Elektrotechnik

Dipl.-Phys. Michael **Baldauf**,
Elektrotechnik

Kristina **Heyer**,
Gesundheitswissenschaft

Prof. Dr. Hans-Dieter **Reidenbach**,
Physik

Prof. Dr. Gabriele **Berg**,
Epidemiologie, Gesundheitswissenschaft

Prof. Dr. Hermann **Hinrichs**,
Medizin, Elektrotechnik

Dr. Olaf **Schulz**,
Biologie

Prof. Dr. Jürgen H. **Bernhardt**,
Physik, Medizin

Dipl.-Ing. Matthias **Johannes**,
Nachrichtentechnik

Inka **Schürmann**,
Gesundheitswissenschaft

Dr. Volker **Bökelmann**,
Physik

Dr. Sheila **Johnston**,
Medizin, Biologie

Prof. Dr. Jiri **Silny**,
Elektrotechnik, Medizin

Dr.-Ing. Fred-Jürgen **Breit**,
Nachrichtentechnik, Physikalische Chemie

Anette **Kellendonk**,
Grafik

Dr. Margarita **Simeonova**,
Biologie, Biophysik

Prof. Dr. med. Eduard **David**,
Medizin

Dipl.-Phys. Ralf **Köper**,
Physik

Dipl.-Ing. Werner **Sörgel**,
Elektrotechnik

Dr. Wilma **Dubois**,
Biologie

Jasmin **Kröber**,
Gesundheitswissenschaft

Dr. phil. Andrea **Thalmann**,
Psychologie

Dr. Siegfried **Eggert**,
Elektrotechnik, Medizin

Prof. Dr.-Ing. Bernhardt **Liesenkötter**,
Elektrotechnik

Dr. med. Peter **Ullsperger**,
Medizin

Dr.-Ing. Wilhelm **Filensky**,
Elektrotechnik, Nachrichtentechnik

Dipl.-Ing. Matthias **Meier**,
Elektrotechnik

Dr. Bernard **Veyret**,
Biologie

Dr.-Ing. Gerd **Friedrich**,
Elektrotechnik

Dipl.-Phys. Wolfgang **Michaelis**,
Physik

Dipl.-Ing. Reinhold **Wehner**,
Nachrichtentechnik

Prof. Dr. Roland **Glaser**,
Biophysik

Dipl.-Ing. Uwe **Möbius**,
Elektrotechnik

Daniela **Wernze**,
Rechtswissenschaft

Dr. Frank **Gollnick**,
Biologie

Dipl.-Ing. Karl-Otto **Müller**,
Nachrichtentechnik

Prof. Dr. Werner **Wiesbeck**,
Elektrotechnik

Dipl.-Biophysiker Lutz **Haberland**,
Biophysik

Dipl.-Ing. Heinz-Günter **Neuse**,
Nachrichtentechnik

Dr. rer. nat. Andreas **Wojtysiak**,
Biologie

Dipl.-Ing. Peter **Hartmann**,
Nachrichtentechnik

Prof. Dr. Bernd **Pohlmann-Eden**,
Medizin

Dipl.-Ing. Jürgen **Zschernitz**,
Elektrotechnik, Nachrichtentechnik

Inhalt der CD-ROM

Wilhelm Filensky:
Entwicklung des Mobilfunks
in Deutschland

Reinhold Wehner: GSM

Reinhold Wehner: UMTS

Reinhold Wehner: TETRA

Reinhold Wehner: Das DECT-System

Reinhold Wehner: WLAN

Fred-Jürgen Breit:
Magnetresonanztomografie

Hans-Jochen Heinze, Hermann Hinrichs:
Bewertung Modulation EEG

Wilma Dubois, Frank Gollnick,
Margarita Simeonova:
Wissenschaftliche Veröffentlichungen
zu Studien über Unterschiede in der
Wirkung von pulsmodulierten und
kontinuierlichen elektromagnetischen
Feldern

Volker Bökelmann, Jürgen Zschernitz:
Statements von Expertengruppen und
unabhängigen Organisationen zu
gesundheitlichen Effekten durch Hoch-
frequenz-Felder

Monografie: Gepulste Felder – eine
besondere Gefahr für die Gesundheit?

Adressen-Links

Zusammenfassungen

Autorenverzeichnis

**Berufsgenossenschaft
Energie Textil Elektro
Medienerzeugnisse**

Gustav-Heinemann-Ufer 130
50968 Köln
Telefon 0221 3778-0
Telefax 0221 3778-1199
www.bgetem.de

Bestell-Nr. M 014