

Warum wird gep eine höhere biologisc

Lutz Haberland

Ein Versuch der Beurteilung
der Fragestellung
aus biophysikalischer Sicht

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 sind es unter anderem 217 Hz, die Mobilgeräte des TETRA-Systems (für Behörden und Sicherheitsdienste) 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 der Modulationen 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?

Leider, oder besser zu unserem Glück, ist die Sache nicht ganz so einfach. Vergegenwärtigen wir uns zuerst die verschiedenen Arten von Modulationen (Abb. 1). Bei der **Amplitudenmodulation (AM)** wird die Stärke (die Amplitude) des hochfrequenten, sinusförmigen Trägersignals im Takt des niederfrequenten Signals variiert, d. h. ein niederfrequentes Feld, das die zu übertragende Information enthält, wird mit dem hochfrequenten Feld zusammengeführt. Ein Spezialfall der Modulation ist die **Pulsmodulation (PM)**, hier wird das hochfrequente Feld immer wieder ein- und ausgeschaltet, was zu einem Rechtecksignal führt. Die **Frequenzmodulation (FM)** zeichnet sich dadurch aus, dass die Amplitude des Feldes konstant bleibt bzw. nur wenig schwankt, sich dafür jedoch die Frequenz ändert, je nach aufmoduliertem niederfrequenten Si-

Welchen Stellenwert haben elektromagnetische Signale in der Biologie? Ihre Relevanz zugemessen?

Signal mehr oder weniger stark. Als letzte grundsätzliche Modulationsart sei noch die **Phasenmodulation** erwähnt (oft auch mit **PM** abgekürzt, oder mit **PSK**, von „Phase Shift Keying“ – Phasenumtastung). Vereinfacht ausgedrückt wird der hochfrequente Wellenzug zur Modulation an bestimmten Stellen um 90° , 180° oder 270° versetzt fortgeführt. Die konkreten Modulationen der heutigen Kommunikationssysteme sind meist eine Mischung aus mehreren dieser Grundmodulationen.

Wie wirken solche Felder nun im biologischen System? Lassen wir zuerst die Modulation beiseite und betrachten das reine hochfrequente Signal, eine periodische, sinusförmige Schwingung zwischen elektrisch und magnetisch positiven und negativen Werten. 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. Ladungen können Ionen sein, aber auch Dipole (wie Wasser) oder Multipole (wie z. B. Proteine). Je höher die Frequenz wird, desto geringer wird die Amplitude der Schwingung, da die Teilchen aufgrund ihrer Trägheit dem Feldverlauf nicht mehr folgen können. Sie „vibrieren“ selbst nur noch um ihren Mittelpunkt. Die Teilchen „reiben“ dabei an den Nachbarmolekülen, wodurch Wärme entsteht, der Hauptmechanismus der Wechselwirkung Feld-Teilchen, besonders im hier betrachteten MHz- und GHz-Bereich.

Widmen wir uns jetzt der niederfrequenten Modulation. Damit diese im Körper wirksam werden kann, muß sie vom hochfrequenten Signal abgekoppelt – demoduliert werden, erst dann ist sie für ihn „sichtbar“. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, wie eine solche Demodulation stattfinden kann.

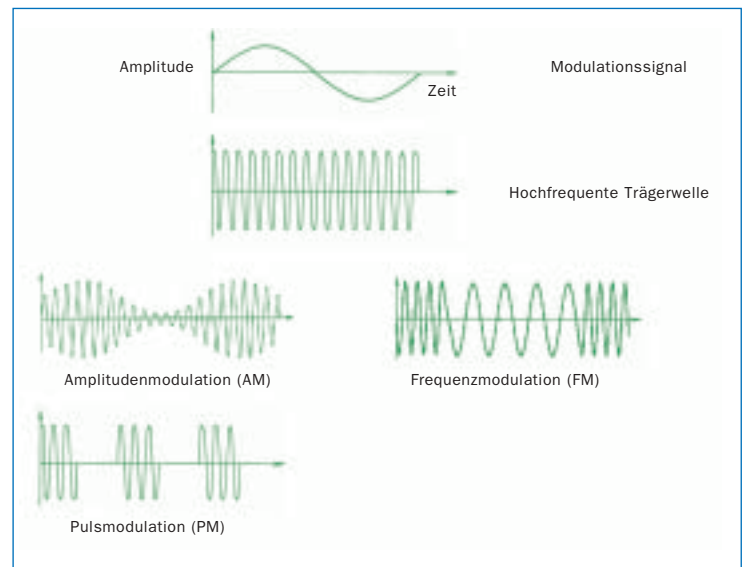


Abb. 1 Die grundsätzlichen Modulationsarten

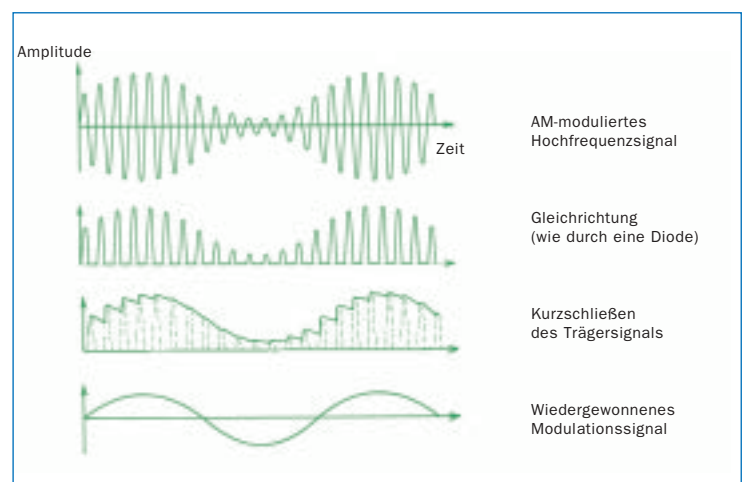


Abb. 2 Elektrische Demodulation am Beispiel der Amplitudenmodulation (AM)

Als erste sei die

- **elektrische Demodulation** beschrieben: Sie bedeutet, dass ein der Hochfrequenz aufmoduliertes elektrisches Signal seine Ursprungsform in Frequenz und Amplitude zurückerhält. Dafür ist ein nichtlineares Element notwendig, was heißt, dass das Ausgangssignal sich nicht proportional zum Eingangssignal verhält. In unserem Fall der elektrischen Demodulation wird das modulierte Signal gleichgerichtet, d. h. es kann nur die positive oder negative Halbwelle ab einer bestimmten Schwellenspannung passieren. In der Elektronik wird dafür normalerweise eine Diode verwendet. Durch nachgeordnete Kondensatoren und Widerstände (sogenannte RC-Glieder) wird das hochfrequente Träger-signal kurzgeschlossen und man erhält das niederfrequente Modulationssignal (Abb. 2).

In der Biologie ist die Zellmembran als nichtlineares Element bekannt und sie besitzt auch die Eigenschaften eines RC-Gliedes – nur fehlen ihr die besonderen Diodencharakteristika, die eine Gleichrichtung bewirken könnten. Es gibt zwar Vorstellungen dazu, nur treffen diese nicht auf den betrachteten Frequenzbereich zu: Jiri Silny beschreibt in seiner Übersichtsbrochure zu Wirkungsmechanismen gepulster Funkwellen [Silny 2004] den selektiven Transport von Ionen durch Membrankanäle aufgrund der anziehenden bzw. abstoßenden Wirkung einer positiven bzw. negativen Halbwelle auf eine Ionenart, was nach einer bestimmten Zeit zu einem Ladungsüberschuss dieser Ionen in der Zelle führt und damit eine selbständige Erregung bewirken kann: 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 Halbwelle im Mobilfunkbereich aber nur ca. 10^{-8} bis 10^{-10} ist, wird dieser Mechanismus als zu träge und daher als unwahrscheinlich für den betrachteten Frequenzbereich angesehen.

Eine rein mathematische Betrachtung der Membran als Gleichrichter unter moduliertem Hochfrequenzeinfluss wurde kürzlich von Iftekhar Ahmed auf einem Workshop in Zürich vorgestellt [Ahmed and Excell 2005, siehe auch den Bericht zum COST

281-Workshop im FGF- Newsletter Nr. 1/2005: Haberland 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.

Somit wird nach derzeitigem Wissensstand eine direkte elektrische Demodulation als unmöglich angesehen, so dass die niederfrequenten Modulationen auch keine direkten Wirkungen auf die niederfrequenten Felder und Ströme im Körper ausüben können.

- **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 Erwärmung einhergehende Ausdehnung kann zu regelrechten thermoelastischen Wellen im Körper führen, die mit der Pulsdauer korrelieren. Diese Phänomene werden als die Ursache des vielzitierten Mikrowellenhörens angesehen. Anwendungen, die solche Pulse generieren, sind vor allem das Radar und UWB-(Ultra Wideband) Pulse. In den Grenzwertempfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICNIRP; siehe [SSK 1999]) sind diese Wirkungen berücksichtigt: Pulsmodulationen, die mindestens das 32fache der durchschnittlichen Feldstärke bzw. mind. das 1000fache der mittleren Leistungsflussdichte erreichen, werden gesondert geregelt. 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 Pulslänge bei GSM beträgt $577\mu\text{s}$, das Mikrowellenhören wurde jedoch erst ab Feldstärken von ca. 2 kV/m und Pulslängen kleiner als $30\mu\text{s}$ 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 induziert, dass sich z. B. Löcher (Poren) in Zellmembranen bilden - der sogenannte „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 existieren eine Anzahl weiterer Vorstellungen zu Demodulationsmöglichkeiten in biologischen Systemen, die auch unterhalb der Grenzwerte wirken sollen, doch konnte bislang keine bewiesen werden. Verwiesen werden soll hierzu auf einen Artikel von Kenneth Foster und Michael Repacholi, sowie dessen deutsche Aufarbeitung durch Roland Glaser [Foster and Repacholi 2004, Glaser 2004].

Besonders umstritten ist weiterhin der Einfluss modulierter Hochfrequenzfelder auf Kalzium-Ionen. In den 1970er und 1980er Jahren hatten mehrere Arbeitsgruppen mit etwas unterschiedlichem Versuchsdesign einen erhöhten Kalzium-Ausstrom aus Gehirngewebe gemessen – insbesondere bei um die 16 Hz-modulierten Feldern (nahe der Modulation der TETRA-Handgeräte). Neuere Ansätze, diese Versuche mit verbesserten Methodiken zu wiederholen (allerdings mit anderen Trägerfrequenzen) konnten keinen (Demodulations-)Effekt finden. Erklärungsversuche, wie diese Felder demoduliert werden könnten, bezogen sich meist auf Resonanzphänomene an Rezeptorbindungsstellen und Kanälen von Membranen. Sie scheiterten jedoch an der Nichtberücksichtigung der Störungen solcher Phänomene durch das thermische Rauschen und die Dämpfung durch das umgebende Medium. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Demodulations-Mechanismen im biologischen System existieren – allerdings sind die bekannten Wirkungen durch

die geltenden Grenzwerte abgedeckt. Trotzdem gibt es eine Reihe von Studien, die von modulations-spezifischen biologischen Effekten auch unterhalb der Grenzwerte berichten, in den meisten Fällen allerdings noch nicht repliziert - gute Übersichten finden sich bei Rainer Meyer und den Ergebnissen des diesjährigen COST 281-Workshop in Zürich zum Thema Modulation [Meyer 1998, Meyer 2003, Haberland 2005]. Gibt es einen bislang unbekanntem Demodulations-Mechanismus oder sind die erwähnten Studien fehlerhaft? Dieser Frage gehen eine Reihe von derzeit laufenden Forschungsprojekten nach. Erwähnt seien hier das Deutsche Mobilfunkforschungsprogramm, das sich im Mechanismus-Teil auch mit möglichen Demodulationen beschäftigt (siehe [Gimsa et al. 2003]), und das Britische „Mobile Telecommunications and Health Research“-Programm, dessen Fokus unter anderem auf spezifischen Effekten des TETRA-Systems liegt. Eine endgültige Antwort auf die Frage nach eventuellen modulationsspezifischen Wirkungen unterhalb der Grenzwerte steht also noch aus.

Lutz Haberland ist Biophysiker an der Universität Rostock und arbeitet als wissenschaftlicher Berater für die Forschungsgemeinschaft Funk.

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/documents.php?node=96&dir_session=
- Foster and Repacholi: Biological Effects of Radiofrequency Fields: Does Modulation Matter? *Radiation Research* 162, 2004, 219-225
- 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: In vitro und in vivo Studien zu biologischen Wirkungen von hochfrequenten Feldern. 1998, <http://www.fgf.de/fup/themen/biologie.html>
- Meyer: *In vitro*-Studien zu biologischen Wirkungen hochfrequenter Felder aus den Jahren 1997 bis 2002. Edition Wissenschaft 20, 2003
- Silny: Gepulste Funkwellen. Wirkungsmechanismen gepulster Mikrowellen im Organismus. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004, <http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/funkwellen/pulswellen.pdf>
- SSK: Deutsche Übersetzung der „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz).“ der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Berichte der Strahlenschutzkommission* 23, 1999