

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

Eine ganze Reihe von physiologischen Vorgängen im menschlichen Körper verläuft in – mehr oder weniger – regelmäßigen Intervallen, die man mit gutem Gewissen als „gepulst“ bezeichnen kann. Bekannte Beispiele dazu sind der Herzschlag und die Atmung. Aber auch weniger sofort ins Auge springende 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 (oder stellen oft selbst solche Signale dar). Unser Körper verständigt sich also in seinem Inneren mit Impulsen. Die Pulsgeschwindigkeiten (Frequenzen) dieser Vorgänge sind dabei sehr unterschiedlich.

Es wird bisweilen die Vorstellung verbreitet, dass technisch erzeugte, niederfrequente Anteile der regelmäßig gepulsten, hochfrequenten, elektromagnetischen Felder (EMF) von Funkanwendungen (z. B. die digitalen Signale des Mobilfunks nach GSM-Standard) direkt die natürlichen gepulsten Vorgänge im Körper von außen beeinflussen und daher Beeinträchtigungen oder gar Gefahren für den Menschen entstehen könnten. Ob diese Möglichkeit der Einflussnahme aus physiologischer Sicht überhaupt besteht, soll in dem nachstehenden Beitrag näher betrachtet werden.

Einige technische Aspekte finden Sie im hinteren Teil dieses Artikels ab S. 58 genauer beschrieben.

Gepulste Signale werden beim Telefonieren mit dem Handy nach dem GSM-Standard (GSM = „Global System for Mobile Communications“), dem weltweit am meisten verbreiteten Mobilfunksystem zur mobilen Kommunikation benutzt. Da liegt es für viele Laien nahe, einen Zusammenhang mit bzw. eine störende Beeinflussung der „Informationsverarbeitung“ des menschlichen Körpers zu vermuten.

Es herrschen zum Teil Vorstellungen, dass diese technisch erzeugten, induzierten Impulse („Pulse“) im Körper des Menschen trotz schwacher Grundenergie des Signals enorme Auswirkungen haben können. Und zwar in der Art, dass es geradezu zu einem „Angriff“ solcher fremder, technischer Impulse auf die natürlichen, harmonisierten

Dr. rer. nat. Frank Gollnick
ist Biologe und als Berater
für die FGF tätig.

Pulse im Körper kommen kann, dass die fremden Pulse sich dort irgendwie „einklinken“ können und die guten, natürlichen Pulse aus der Bahn werfen. Wie das genau biologisch gehen soll, wird in entsprechenden Aussagen nie erwähnt. Triftige Nachweise von biophysikalischen Einwirkungsmöglichkeiten („Wirkungsmechanismen“) auf der Ebene der Körperzellen und der Moleküle können nicht genannt werden. Jedenfalls seien die Folgen davon beispielsweise nervöse Störungen, Schlaflosigkeit, verschiedenste Schmerzsymptome bis hin zu epileptischen Anfällen – eben die gesamte Bandbreite an Beschwerden, die von „elektrosensiblen“ oder „elektrogestressten“ Menschen angegeben wird. Was hat es also wirklich damit auf sich?

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 durch die „aufmodulierten“ regelmäßigen Veränderungen des hochfrequenten Trägersignals als relativ niederfrequente „Pulsung“ in digitalen Funksignalen steckt (aber nur erkennbar wird, wenn diese niedrigen Frequenzen „demoduliert“, also herausgefiltert werden). Und zumindest diese *schnellen* Körpersignale sind auch noch in der Mehrzahl den *elektrischen* Impulsen zuzuordnen. Das scheint im ersten Moment den Beweis darzustellen: „Sind also diese schwachen, gar nicht spürbaren, subtilen elektrischen ‘Energieflüsse’ des Körpers somit nicht täglich einer ‘Übermacht’ von scharfkantigen, groben, unerbittlich hämmernden und pulsenden 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 schon 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 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. 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 elektronische 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 werden die „Pulsanteile der Handystrahlung“, manchmal sehr öffentlichkeitswirksam, mit Hilfe eines Radioempfängers dem Publikum bei Versammlungen oder Fernsehsendungen als Geräusch demonstriert. Aber: Es ist es 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 fehlt.

Körperimpulse und gepulste Funksignale

Wir befinden uns bei diesem Thema natürlich 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 körpereigene 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 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“) angeben lassen. Neben elektrischen Reizen spielen in der Reizphysiologie vor allem *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 und außerdem noch 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 den genannten, in Frage stehenden Frequenzbereich treffen, 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,

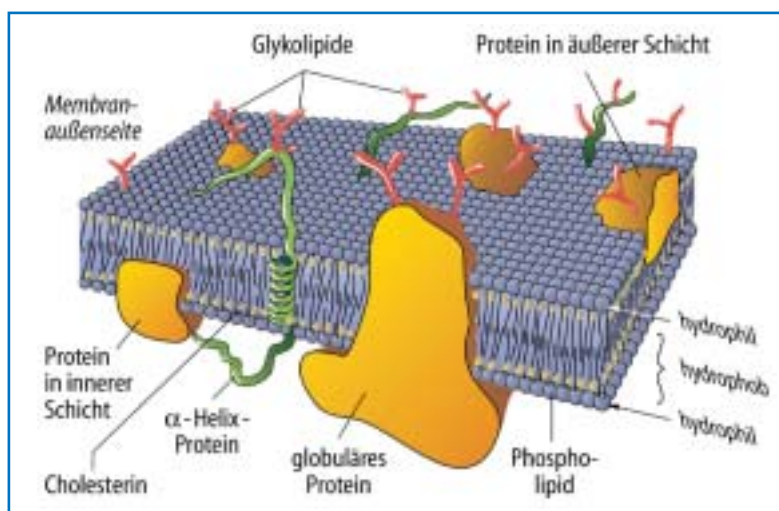


Abbildung 1: Schema der Zellmembran (= Plasmamembran) mit eingelagerten Eiweißmolekülen (Proteine). (aus [7])

und einige Beispiele von Reizverarbeitung und Nervenleitung werden die Betrachtung, immer mit Blick auf die Möglichkeit der Einwirkung gepulster Funksignale, ergänzen.

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 ist für Wasser, bestimmte Ionen (elektrisch geladene Atome oder Moleküle) und 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 welche die Membran ansonsten praktisch undurchlässig wäre. Das führt – ebenfalls naturgegeben und genetisch absolut vorbestimmt – dazu, dass sich *in* den Zellen andere Konzentrationen an wassergelösten 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 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. Das „Membranruhepotenzial“ wird immer negativ angegeben. Zusätzlich befinden sich an der inneren und äußeren Oberfläche der Zellmembran überwiegend negative „Oberflächenladungen“ (innen mehr negative als außen), welche die Potenzialdifferenz über die Membran hinweg noch größer machen [6].

Grundlegende Ereignisse bei der internen Kommunikation im Körper und bei der Steuerung der Zellaktivität sind Änderungen des Membranpotenzials und Reaktionen von Rezeptoren der Zellmembran mit äußerlich die Zelle erreichenden („extrazellulären“) Wirkstoffen. Wenn interne Informationen durch eine sogenannte „elektrische Erregung“ der Zellen vermittelt werden, spielt dabei das sogenannte „Aktionspotenzial“ fast immer die entscheidende Rolle. Andere Signalmöglichkeiten sind zum Beispiel kurzzeitige („transiente“), deutliche Ionenkonzentrationsänderungen (häufig bei Kalziumionen) oder Konzentrationsänderungen anderer Stoffe, die ebenfalls in der Art von „Pulsen“ ablaufen können (Beispiel: regelmäßige Kalzium-„Spikes“ = kurze, spitze Erhöhungen der Konzentration). Das erwähnte „Aktionspotenzial“ 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 Rücktransporte von Ionen stellen nach Erreichen des positiven Spitzenwerts das „Membranruhepotenzial“ wieder her („Repolarisation“). Die Ionenverschiebungen sind aber außerordentlich klein im Verhältnis zu den vorhandenen Ionenkonzentrationen auf beiden Seiten der Zellmembran. Im Zusammenhang dieser

Wie werden im Körper schnelle Informationen verarbeitet und weitergeleitet?

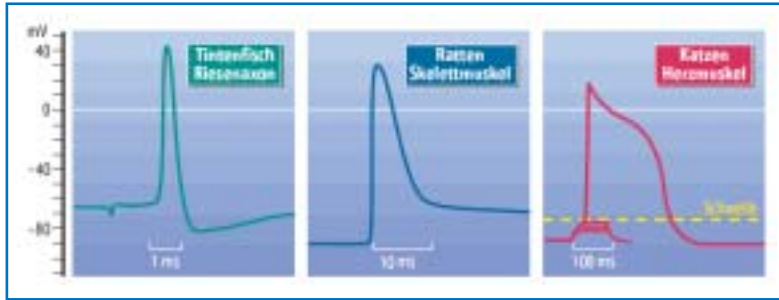


Abbildung 2: Gemessene Aktionspotenziale verschiedener erregbarer Zelltypen. Aufgetragen ist das Transmembranpotenzial im zeitlichen Verlauf. Angabe der Zeit in Millisekunden (ms). Die Formen der Potenzialverläufe sind gleich wie bei den entsprechenden Organen des Menschen. (aus [7])

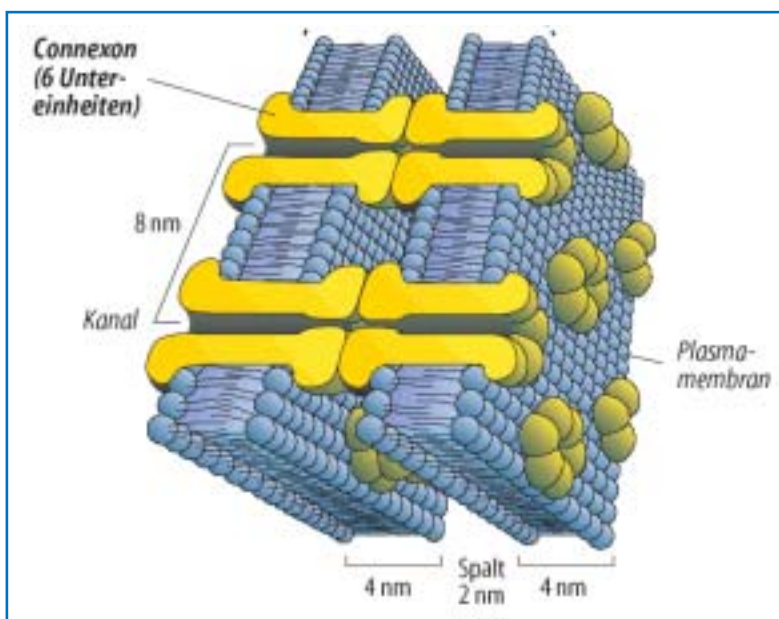


Abbildung 3: Schema einer „Gap Junction“ mit mehreren in die aneinander grenzenden Zell-membranen eingelagerten „Connexonen“; das sind Eiweißmolekülkomplexe, welche die elektrische Verbindung zwischen den benachbarten Zellen herstellen. Die Innenräume der Zellen zeigen in der Darstellung nach rechts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

komplizierten Regelmechanismen kann das Aktionspotenzial selbst wiederum bestimmte Ionenkanäle zum elektrisch gesteuerten Öffnen oder Schließen bewegen („spannungsgesteuerte Kanaltypen“). Beteiligt sind an all diesen Vorgängen hauptsächlich Natrium-, Kalium-, Kalzium- und Chloridionen. Aktionspotenziale können in den sogenannten „erregbaren“ Zellen, das sind hauptsächlich Nerven- und Muskelzellen, ausgelöst werden. Sie dauern am Nerv etwa 1 Millisekunde, am Muskel etwa 10 Millisekunden und am Herzmuskel mehrere 100 Millisekunden ([7], Abb. 2).

In sehr langgestreckten Zellen oder solchen mit langen Zellausläufern, wie es typischerweise Nervenzellen sind, kann sich ein Aktionspotenzial 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 Längs-

achse. Durch diesen elektrischen Mechanismus kann im Körper Information schnell über weite Strecken übertragen werden. Die Übertragung des elektrischen Signals von Zelle zu Zelle findet an den Endigungen der Nervenzellen an speziellen Übertragungspunkten, den „Synapsen“, durch *chemische* Botenstoffe statt, die per Diffusion über einen winzigen Spalt zwischen den aneinander grenzenden Zellmembranen übertragen werden. Außerdem kann es, zum Teil auch bei Zellen außerhalb des Nervensystems (beispielsweise im Herzmuskel), zu einer *direkten elektrischen* Informationsübertragung durch massive Ionenströme von einer Zelle zur anderen an speziellen Kontaktstellen zwischen ihnen, den sogenannten „Gap Junctions“, kommen (**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 verbinden meist funktionell zusammenarbeitende Gruppen von Zellen. Die elektrische Informationsübertragung an „Gap Junctions“ findet häufig nicht 1:1 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 „ankommenden“ Depolarisation [Begriff s.o.], aber nur ein kleiner Strom bei einer ebenfalls möglichen „ankommenden“ ‘Hyperpolarisation’, einer Verschiebung des Membranpotenzials in den negativen Bereich). Dieses sogenannte „nichtlineare“ Verhalten elektrischer Übertragungsstrukturen im Körper könnte hier für die weitere Betrachtung 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 mehr positiver 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 körperlern 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* stellt in dem Zusammenhang eine gewisse Ausnahme dar, da dort besondere Aktionspotenzial-Verläufe eine Rolle spielen.

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 (= Sen-

Reizstärken und
-qualitäten werden
„digital umcodiert“

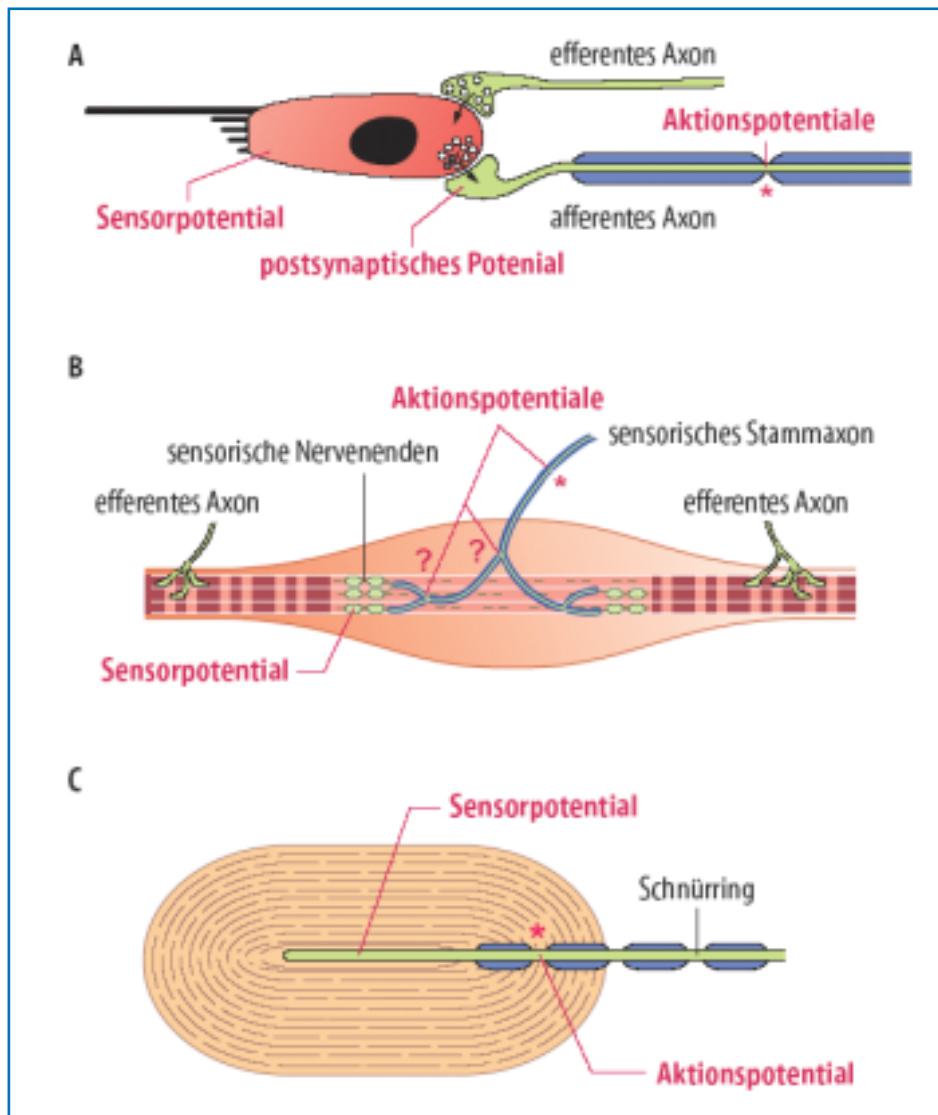


Abbildung 4: Verschiedene Sensortypen mit Darstellung der Orte, an denen vermutlich die „Umkodierung“ von Sensorpotentialen zu Aktionspotentialen erfolgt. **A** Haarzelle aus dem Hörorgan oder dem Gleichgewichtsorgan. **B** Muskelspindel des Frosches. **C** Drucksensor in der Haut. (aus [7])

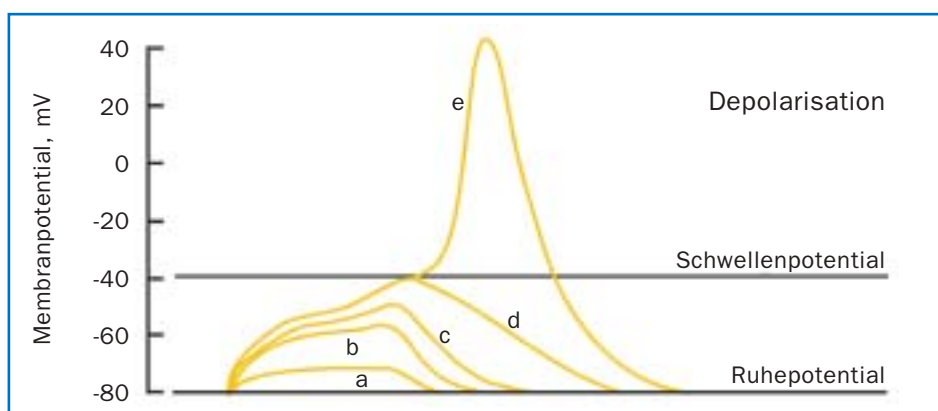


Abbildung 5: Generatorpotenziale und Aktionspotential eines Drucksensors der Haut. Die Reizung führt bei schwacher Einwirkung zu Sensorpotentialen, deren Amplitude die Reizstärke codiert (a-d). Ein überschwelliges Sensorpotential löst ein Aktionspotential (e) aus.

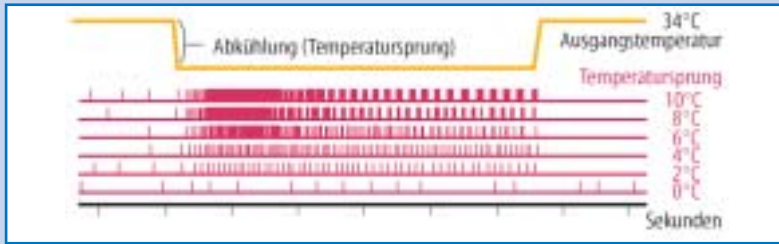
soren), die Sinnesreize aufnehmen, immer eine relativ langsame, anhaltende Membranpotenzialänderung in den beteiligten Sinneszellen statt. Solche sogenannten „Sensorpotenziale“ oder „Generatorpotenziale“ sind kontinuierlich abgestufte Antworten, das heißt sie bilden mit ihrer Signalthöhe (= Amplitude) die Reizgröße ab (oder bei qualitativen Reizen die Reizqualität) (**Abb. 5**). Die Sensorpotenziale sind meist depolarisierend (also Verschiebungen von negativen zu mehr positiven Membranpotenzialen hin), 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 Beispiel ein bestimmter Geschmack eindeutig wahrgenommen wird, sind noch wesentlich kompliziertere Umsetzungsprozesse der beteiligten Nervenfasern-Gruppen notwendig. Einige Beispiele für die „*Transformation*“ genannten Umkodierung von Primärreizen werden auf Seite 52 in der **Abbildungsbox** gezeigt.

Auch bei der netzwerkartigen Übertragung von Information von einer Nervenzelle zur nächsten an den Synapsen summieren sich die gewöhnlich von vielen Zellen an einer „Zielzelle“ ankommenden „synaptischen Potenziale“ zu einer langsamen Änderung des Membranpotenzials 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 werden dann, entsprechen ihrer Summengröße im zeitlichen Verlauf, in der „Zielzelle“ wieder – wie oben für die Sinnesreize beschrieben – in Aktionspotenzialserien für die Weiterleitung umcodiert. Die Frequenz solcher Serien ergibt sich von selbst aus der *Steilheit der Depolarisation*, welche wiederum vom Öffnungs- und Schließverhalten der hierfür verantwortlichen Ionenkanäle, hauptsächlich solche für Natrium- und Kaliumionen, abhängt. Auch Gruppenentladungen („Bursts von Aktionspotenzialserien“) sind bei anhaltendem Reiz anstelle von Aktionspotenzialserien hoher Frequenz möglich (**siehe Abbildungsbox** S. 52, Temperatursensor).

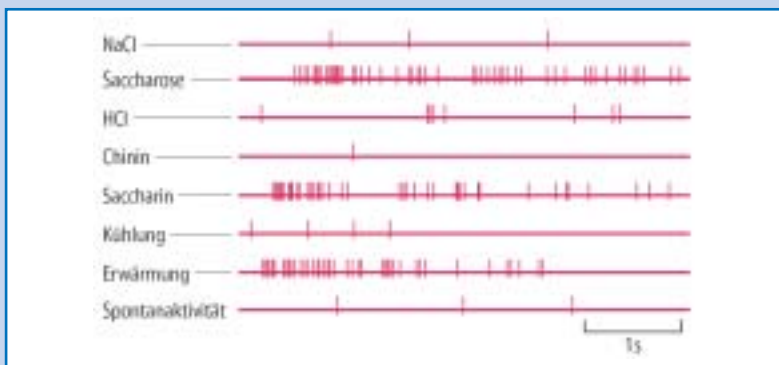
Die *maximale Frequenz* von Aktionspotenzialserien ist beim Menschen und bei Wirbeltieren begrenzt durch die sogenannte „absolute Refraktärzeit“, in der nach einem erfolgten Aktionspotenzial wegen der zugrunde liegenden Ionenverschiebungs-Mechanismen kein neues gestartet werden kann. Die Refraktärzeit, 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 Hertz erregt werden kann. Normal sind Frequenzen darunter, es kommen aber bei bestimmten Zelltypen kürzere Refraktärzeiten und Aktionspotenzialfrequenzen von bis zu 1000 Hertz vor.

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 Hertz, 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

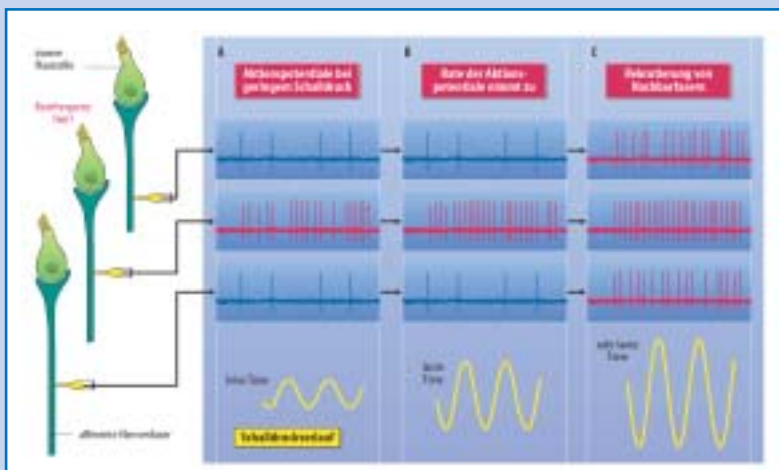
Beispiele für die Umkodierung von Primärreizen in Aktionspotenzialserien



Temperatursensor: Abgestuftes Antwortverhalten eines Kalsensors 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])

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. 6**). In der Schlafforschung ist 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.

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) 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 irgend etwas 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 stehen, ob es bei ihnen einen Mechanismus gibt, über den gepulste Funksignale realistisch betrachtet in das körpereigene Geschehen störend eingreifen können.

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 *elektrischer* Natur sein. Wechselwirkungen 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, also auch auf die damit verbundenen Signalvorgänge annehmen könnte. Dabei spielt das „*Resonanzverhalten*“ eine entscheidende Rolle, welches 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 die elektrische Ladungsungleichverteilung („Dipolmoment“), die sie tragen, an die elektromagnetischen Felder angekoppelt [8]. Dies ist für das Wasser-Dipolmolekül (negative Ladung zum Sauerstoffatom hin verschoben, positive Ladung zu den beiden Wasserstoffatomen hin verschoben)

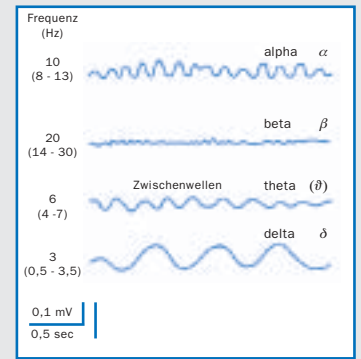


Abbildung 6: EEG-Wellenarten, die bei Gesunden vorkommen können.

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

Resonanz bei unmodulierten Funkwellen

ben) 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 ihre „kinetische Energie“ durch die Ankopplung des Hochfrequenzfelds an die Dipolmoleküle 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 einem Drittel Watt, und so passiert zumindest auf diesem Weg nichts, außer dass man ein warmes Ohr und vielleicht eine warme Wange nur davon bekommt, dass man sich beim Telefonieren ein Plastikgehäuse isolierend auf die Haut hält, welches seinerseits von innen vom Batteriestrom erwärmt wird [9, 10]. Die minimale zusätzliche Bewegung der sich ohnehin schon ständig bewegendes Wassermoleküle durch das zusätzliche Drittel Watt Energieeintrag 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 zuende 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.

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 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 neuen Berech-

Dämpfung in molekularen Dimensionen

nungen – 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/m^2 (entsprechend einer elektrischen Feldstärke von etwa 200 V/m) für unwahrscheinlich gehalten, dass sie physiologische Vorgänge durch athermische Mechanismen beeinflussen können [11]. Demnach spielt noch eine Reihe anderer Kräfteabschätzungen eine Rolle, deren Darstellung hier den Rahmen des vorliegenden Artikels sprengen würde. Im Ergebnis wurde kein Mechanismus gefunden, der soviel zusätzliche Energie aus den Funkwellen auf kleine („subzelluläre“) biologische Elemente (wie Zellorganellen oder Moleküle) überträgt, als 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. Einziger durch „*Elektrostriktion*“ (Deformation eines dielektrischen Mediums durch ein angelegtes elektrisches Feld) *größerer* Elemente, etwa ganzer Zellen, könnte bei Feldern der genannten Stärke zwar das „thermische Rauschen“ überschritten werden, dieser Effekt wäre jedoch gegenüber den normal vorkommenden Deformationskräften an Zellmembranen so klein, dass dadurch ausgelöste biologische Effekte unwahrscheinlich seien. Resonanzeffekte sind aufgrund der Dämpfung in wässrigem Milieu vernachlässigbar klein.

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 Newton, 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 Zellmembran-Protein mit 100 ungleich verteilten Ladungen einwirkt, so lässt sich ein

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

Kräfteverhältnisse

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

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

Was bleibt, ist ein Paradoxon und – die Frage nach der Demodulation. 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 biologische 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 unterstützten diese Erkenntnisse [15], [16].

Demodulation?

Trotzdem 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 [17], [18]. Hierbei spielt der weiter oben erwähnte „Gleichrichtereffekt“ an den zum Beispiel in Nervengewebe vorkommenden „Gap Junctions“ wieder ganz aktuell eine Rolle. Letztlich bleibt abzuwarten, ob dieser Ansatz den ausstehenden Nachweis für einen plausiblen Wirkungsmechanismus erbringen wird. Bisläng jedenfalls kann nicht davon ausgegangen werden, dass die gepulsten Vorgänge im menschlichen Körper wirkliche Angriffspunkte für gepulste elektromagnetische Felder bieten.

Technische Aspekte

Beim Mobilfunk werden auf einen hochfrequenten „Träger“ niederfrequente „Informationen“ aufmoduliert. Die niederfrequenten „**Tastfrequenzen**“, die bei den grundsätzlich hochfrequenten „Trägersignalen“ der digitalen Funkanwendungen aus den mehr oder weniger regelmäßigen „Aussetzern“ im Träger-Signalstrom hervorgehen, liegen im Bereich von einigen Hertz (Hz = Ereignisse pro Sekunde; hier also „Signalpausen“ pro Sekunde) bis zu wenigen tausend Hertz. Die Techniker sprechen hier auch von einer „Amplitudentastung“.

Die **Trägerfrequenzen**, welche also periodisch „ausgetastet“ werden, liegen selbst im GHz (Gigahertz = Milliarden Hertz) 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). Für die technisch Versierteren unter uns ist noch am bekanntesten die durch die „**Amplitudentastung**“ entstehende „Modulationskomponente“ von 217 Hz in den bei ungefähr 0,9 GHz (= 900.000.000 Hz) oder 1,8 GHz (= 1.800.000.000 Hz) liegenden Trägersignalen, mit denen hier zur Zeit noch die meisten „Handys“ nach dem bekannten GSM-Standard betrieben werden.

Es gibt in der Amplitude (Signalstärke) der ausgesendeten, hochfrequenten Mobilfunksignale aber noch eine Reihe anderer Modulationsfrequenzen, zum Beispiel 2,08

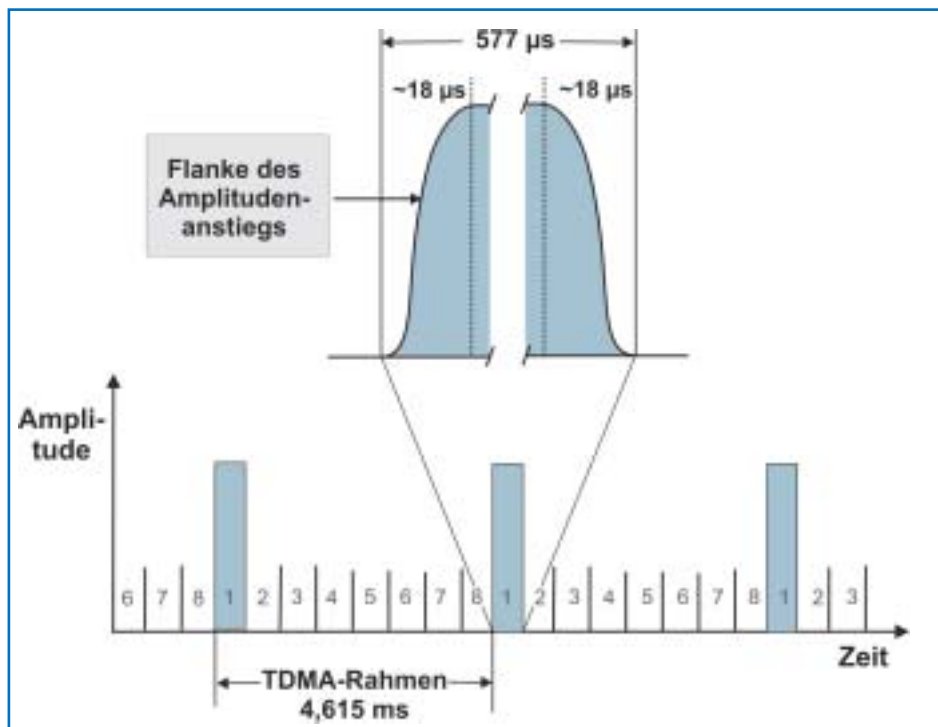


Abbildung 7: Darstellung von „Sendebursts“ in der zeitlichen Abfolge, wenn beim Mobiltelefonieren nach dem GSM-Standard nur *ein* Zeitschlitz eines Sendekanals belegt ist, also nur einer von acht möglichen Teilnehmern auf ihm telefoniert. Die Vergrößerung oben zeigt einen „Burst“ zeitlich etwa 30-fach gestreckt, um den Signalverlauf in der Anstiegsphase und in der abfallenden Phase („Flanken“) deutlicher zu machen. Hierzu wurde der gesamte Mittelteil, in dem die Amplitude eine konstante Größe hat, aus grafischen Gründen herausgenommen. Erklärung im Text. (verändert nach [4])

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 sogenannten „Sendebursts“ übertragen, das sind kurzzeitige, nur einige hundert μs (Mikrosekunden = Millionstel Sekunden) lange Sende-„Schübe“, in denen zum Beispiel bei einem Handy theoretisch sehr kurzfristig mit einer *Spitzensendeleistung* von maximal etwa 2 W (Watt) gesendet werden kann. Typischerweise wird im Gebrauch durchschnittlich aber nur mit Spitzenwerten von ungefähr 0,2 W bis 0,3 W gesendet [1] [2].

Die **Modulation** (also die kurze Ein- bzw. Abschaltung) des Sprachsignals eines Mobiltelefons erfolgt dabei – genau beschrieben – im 4,615 ms-Rhythmus (Millisekunden-Rhythmus = tausendstel Sekunden-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 die selbe Basisstation auf dem selben 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 **Abbildung 7**). Das somit im 4,615 Millisekunden-Rhythmus „zerhackte“ Sprachsignal jedes Teilnehmers wird beim Empfänger wieder richtig zusammengesetzt, wovon man als Telefonierender 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. „Schwach“ heißt hier genau gesagt: der Sender darf in diesen „Pulspausen“ nach dem Standard ETS 300 577 des „European Telecommunications Standards Institute“ (ETSI) [3] im Falle eines GSM 900 Signals nur noch mit maximal 0,25 μW (Mikrowatt = Millionstel Watt) und im Falle eines GSM 1800 Signals mit maximal 0,016 μW senden.

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 **Abbildung 7**). Man kann dies auf dem Bildschirm eines Oszilloskops sichtbar machen, wenn man die Signalkante zeitlich genügend „streckt“. 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, gesundheitlich betrachtet, wegen der 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 (zur Vertiefung in weitere technische Details siehe [4] und [5]).

Es herrscht also schon in bezug auf die technischen Eigenschaften gepulster Funksignale in Teilen der Öffentlichkeit ein Meinungswirrwarr, der zum Teil auf fehlenden oder falschen Informationen beruht.

Die Bilder 1,2, 4 und die untere Abbildung auf Seite 52 wurden mit freundlicher Genehmigung von Springer Science and Business Media Bild 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.: Radiofrequency 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 niederfrequent 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.php?node=96&dir_session=
- [17] Mobile Telecommunications and Health Research (MTHR) Programme (Großbritannien): Zur Zeit laufendes Projekt "Nonlinear and Demodulation Mechanisms in Biological Tissue". http://www.mthr.org.uk/research_projects/HO_funded_projects_excell.htm
- [18] 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/doc/bioem2005-abstracts.pdf>