

umwelt • medizin gesellschaft

HUMANÖKOLOGIE • SOZIALE VERANTWORTUNG • GLOBALES ÜBERLEBEN

Polarisation:

**Ein wesentlicher Faktor für das
Verständnis biologischer Effekte von
gepulsten elektromagnetischen Wellen
niedriger Intensität**

Dr. Klaus Scheler

Polarisation: Ein wesentlicher Faktor für das Verständnis biologischer Effekte von gepulsten elektromagnetischen Wellen niedriger Intensität

Dr. Klaus Scheler

In den letzten 20 Jahren wurden zahlreiche zellbiologische Befunde unter dem Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen, unter anderem von Mobilfunkstrahlung,⁽¹⁾ vor allem bei Intensitäten weit unterhalb der Grenzwerte, in der Fachliteratur dokumentiert. Auf Zellebene zeigen sich u. a. veränderte Produktionsraten und Konzentrationen von verschiedenen aggressiven Biomolekülen (Oxidantien, reaktive Sauerstoffspezies (ROS), u. a.), die zum Teil in der Lage sind, Proteine und die DNA zu schädigen, was ggf. zu Krebs führen kann. Darüber hinaus wurden mehrere plausible Mechanismen vorgeschlagen, wie der Kausalzusammenhang zwischen der auftretenden Strahlung und diesen Befunden begründet werden könnte. Eine Übersicht hierzu findet sich z. B. in der Arbeit von Yakymenko et al.^(1,2) Ein hochplausibles und experimentell untermauertes Modell wurde von Warnke⁽³⁾ und Neitzke⁽⁴⁾ vorgeschlagen, das kürzlich auch durch Arbeiten von Barnes und Greenebaum^(5,6) bestätigt wurde. Ein weiterer bisher wenig beachteter, aber einleuchtender Mechanismus wurde von den Forschern Dr. Dimitris J. Panagopoulos (Universität Athen, Griechenland), Prof. Olle Johansson (Karolinska Institut, Stockholm, Schweden) und Dr. George L. Carlo (Institute for Healthful Adaptation, Washington, DC, USA) vorgeschlagen, der auf der Grundlage früherer Beiträge in einer erweiterten Fassung am 12.10.2015 in den „Scientific Reports“⁽¹¹⁾ veröffentlicht wurde:⁽⁷⁾ Im Rahmen der allgemein anerkannten elektrischen Eigenschaften der Zellmembran und ihrer Funktionen können sie unter Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten folgende Erkenntnisse ableiten: Polarisierte(!) elektromagnetische Wellen – wie z. B. die Mobilfunkstrahlung – sind bereits aufgrund ihrer Polarisation und schon bei schwachen Intensitäten in der Lage, die spannungssensiblen Ionenkanäle (Kanalproteine) in der Zellmembran ohne biologische Notwendigkeit irregulär zu aktivieren. Unpolarisierte Wellen – wie z. B. das Sonnenlicht und viele andere natürliche elektromagnetische Wellen – können dies auch bei deutlich höheren Intensitäten und vergleichbaren Expositionsdauern nicht, sondern bewirken nur Erwärmungen, die erst bei viel höheren Intensitäten bzw. Expositionsdauern biologisch gefährlich sind. Spannungssensible Ionenkanäle fungieren als Schleusen: Sie steuern in Abhängigkeit von der Membranspannung den Ionenfluss zwischen dem Inneren und Äußeren der Zelle: Bei geöffneter Schleuse fließen Ionen von selbst, d. h. ohne weiteren Energieaufwand, vom Ort der höheren zum Ort der niedrigeren Konzentration. Ein irreguläres, durch äußere Strahlungseinwirkung erzwungenes Öffnen bzw. Schließen dieser Kanäle bringt die natürliche elektrochemische Balance zwischen dem Inneren der Zelle und ihrer Umgebung aus dem Gleichgewicht und kann damit eine Vielfalt von zellbelastenden und ggf. sogar schädigenden chemischen Folgereaktionen im Innern der Zelle in Gang setzen. Das vorherrschende Ergebnis ist oxidativer Zellstress. Panagopoulos et al. können durch ihre Analyse sogar Schwellenwerte für die elektrischen und magnetischen Feldstärken quantitativ abschätzen, ab denen polarisierte elektromagnetische Wellen ein Öffnen der Ionenkanäle auslösen und somit biologisch relevant werden. Damit werden Vergleiche zwischen Theorie und Experiment möglich, die für die weitere Forschung sehr erhellend sein werden. Aus wissenschaftlicher Sicht stellen diese Erkenntnisse einen weiteren wichtigen Schritt dar, die Wechselwirkung zwischen polarisierter Strahlung und der Zellmembran im Einzelnen zu verstehen. Insbesondere wird im Rahmen dieses physikalischen Modells auch verständlich, warum niederfrequent gepulste hochfrequente elektromagnetische Wellen biologisch wirksamer sind als un gepulste, hochfrequente sinusförmige Wellen.

1. Markante Ergebnisse der experimentellen Zellforschung (Überblick)

Über nichtthermische Wirkungen von gepulster Hochfrequenzstrahlung am Ort der Zellmembran wurde in der Fachliteratur schon lange vor Einführung des Mobilfunks – seit etwa 1976 – berichtet. Dabei zeigten sich in den frühen Untersuchungen vor allem Veränderungen in der Permeabilität (Durchlässigkeit) von Zellmembranen, insbesondere für die Ionen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , aber auch Effekte bei den Rezeptoren und anderen Proteinen in der Zellmembran.⁽⁸⁾

Die Strahlenschutzkommission fasste die Befunde in ihrer Empfehlung zum „Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk“ vom 12.12.1991 wie folgt zusammen:⁽⁹⁾ „... Zum Beispiel wurde festgestellt, dass bei einer Hochfrequenzstrahlung mit einer Frequenz von 147 MHz, die mit Frequenzen zwischen 6 und 20 Hz moduliert war, der Calciumausstrom aus Zellkulturen (Ca^{2+} -Ionen) bei bestimmten

Frequenzen signifikant (um 10 bis 20 %) erhöht war. Insgesamt wurde eine komplexe Abhängigkeit dieser Effekte von Intensität und Frequenz beobachtet, wobei spezielle Frequenzbereiche besonders wirksam sind. Die Membraneffekte wurden vielfach bestätigt, so dass ihre Existenz heute als gesichert gilt. Hervorzuheben ist, dass die SAR-Werte⁽¹¹⁾ hierbei teilweise kleiner als 0,01 W/kg (= 10 mW/kg) sind und damit erheblich unterhalb thermisch relevanter Intensitäten liegen.“

Zum Vergleich: Die SAR-Werte, die heute gesetzlich erlaubt sind, liegen für Ganzkörperbestrahlung (z. B. durch Basisstationen) bei 0,08 W/kg und bei Teilkörperbestrahlung (z. B. beim Telefonat mit dem Handy/Smartphone) bei 2 W/kg.

Auch nach Einführung der Mobilfunktechnologie wurden nichtthermische Effekte im Zusammenhang mit der Zellmembran intensiv erforscht. Einen Überblick über den Forschungsstand bis 2006 geben Funk et al. in ihrem Review Paper „Effects of electromagnetic fields on cells“⁽¹⁰⁾ und in ihrer Veröffentlichung

„Electromagnetic effects – From cell biology to medicine“⁽¹¹⁾. Darin zeigen sie u. a., dass elektrische Felder mit einer elektrischen Feldstärke von 1 Millivolt pro Meter (mV/m) – dies entspricht einer Leistungsflussdichte von ca. 0,0027 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ – bereits biologisch relevante Änderungen der Ladungsdichte an der Zellmembran und daher störende Reaktionen in der Zelle verursachen können. Die Größenordnung dieser kritischen elektrischen Feldstärke liegt um einige 10.000-stel niedriger als die heutigen Grenzwerte (GSM – 900 MHz: 41 V/m, UMTS: 61 V/m).

Experimentell gut belegt ist dabei die Öffnung spannungssensibler Ionenkanäle durch Mikrowellenstrahlung niedriger Intensität: Vornehmlich werden die spannungssensiblen Ca^{2+} -Ionenkanäle (VGCC = voltage gated calcium channel) in der Zellmembran aktiviert, die besonders sensibel auf elektromagnetische Felder (EMF) reagieren: Etwa 23 Studien haben bisher belegt, dass VGCCs nicht-thermische und andere Reaktionen auf schwache EMF zeigen.⁽¹²⁾ Wurden aber die VGCCs durch einen für den jeweiligen Typ spezifischen Calciumkanalblocker geblockt, traten die vorher gezeigten Reaktionen auf eine EMF-Exposition entweder gar nicht mehr oder nur noch in deutlich abgeschwächter Form auf.⁽¹³⁾

Diese Ergebnisse beweisen nicht nur, dass Mikrowellenstrahlung niedriger Intensität tatsächlich biologisch hochwirksam ist, sondern zeigen auch, dass die VGCCs an vielen biologischen Effekten beteiligt sind. Dies ermöglicht weitere Erkenntnisse über mögliche biophysikalisch plausible Folgewirkungen von schwachen elektromagnetischen Feldern. Es zeigt sich, dass sowohl physiologische und therapeutische Reaktionen, als auch pathophysiologische Reaktionen nach EMF-Exposition auftreten können. Ein gut dokumentiertes Beispiel für eine pathophysiologische Reaktion auf EMF ist die Schädigung der DNA (durch Einzel- und Doppelstrangbrüche), die als Folge von oxidativem Stress durch den Stickoxid-Peroxy-nitrit-Zyklus auftreten kann, bei dem Ca^{2+} -Ionen als Vermittler wirken (Abb. 1).⁽¹⁴⁾

Die Aktivierung von VGCCs durch schwache Mobilfunkstrahlung kann daher mit hoher Wahrscheinlichkeit als Schlüsselmechanismus für die zellbelastenden Einflüsse dieser Strahlung angesehen werden.

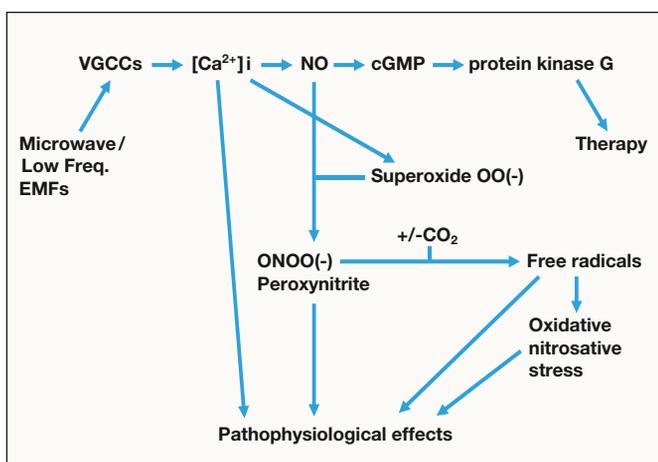


Abb. 1: Therapeutische und pathophysiologische Effekte der VGCC-Aktivierung durch schwache EMF

Dass Mobilfunkstrahlung oxidativen Stress in vielen Zellen auslösen kann, ist mittlerweile in über 93 Studien sehr gut belegt. Einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zum oxidativen Stress in Zellen findet man in einer Veröffentlichung von Yakymenko et al. von 2015: „Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation“.^(1,2) Der vorherrschende Effekt von Hochfrequenzbestrahlung niedriger Intensität – dokumentiert ab einer Leistungsflussdichte von 1000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ bzw. einer Absorptionsrate (SAR) von 3 $\mu\text{W}/\text{kg}$ = 0,003 mW/kg – besteht in einer erheblichen Überproduktion von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS), sog. oxidativem Stress. Dieser Zellstress hat ein enormes pathogenes Potential,^(12,15) das Krebs und verschiedene andere Krankheitsbilder und Störungen erklären kann (DNA-Schädigungen, Spermien- und Embryoschädigungen, Entwicklungs- und Verhaltensstörungen bei Kindern und Jugendlichen, Entzündungen, Kopfschmerzen, Erschöpfung und andere neuropsychiatrische Effekte, Allergien, Elektrohypersensibilität u. a.).

Insgesamt zeigt sich, dass die Zellmembran als entscheidender Angriffspunkt der Mobilfunkstrahlung angesehen werden muss: Mobilfunkstrahlung aktiviert ohne biologische Notwendigkeit irregulär Funktionen der Zellmembran und stört so das elektrochemische Gleichgewicht zwischen der Oberfläche der Membran und dem Zellinneren. Als Folge davon werden Signalkaskaden innerhalb der Zelle ausgelöst, die wiederum zellschädigende Reaktionen in Gang setzen können. Entsprechend vielfältig und weitreichend können daher die biologischen Wirkungen sein.

2. Das Wirkungsmodell nach Panagopoulos et al. im Einzelnen

Auch wenn die experimentellen Ergebnisse bereits deutlich die schädigenden Einflüsse der Mobilfunkstrahlung für die Zelle aufzeigen können, so erfordern die Kriterien für einen wissenschaftlichen Beweis zusätzlich die Angabe eines überzeugenden Wirkungsmodells, das die zugrundeliegende Wechselwirkung zwischen der auftretenden Mobilfunkstrahlung und der Zellmembran identifiziert und Vorhersagen ermöglicht, die experimentell geprüft werden können.

Bevor hierzu das Wirkungsmodell von Panagopoulos et al. vorgestellt werden kann, sollen zunächst einige wichtige Grundlagen dargestellt werden.

2.1 Natürliche und künstliche elektromagnetische Wellen im Vergleich

Auffällig und bisher wenig verstanden ist die Tatsache, dass künstliche elektromagnetische Wellen biologisch deutlich schädlicher sein können als natürliche Wellen bei gleicher Intensität und Einwirkungsdauer. Dies zeigen u. a. folgende Befunde:

Wir sind ständig umgeben von natürlichen elektromagnetischen Wellen verschiedener Herkunft, die zum Teil recht hohe Intensitäten haben können: Bereits die Sonne bestrahlt uns in Mitteleuropa im Hochsommer bei wolkenlosem Himmel mit einer Intensität von etwa 700 W/m^2 , im Winter sind es am Mittag nur etwa 240 W/m^2 , bei Bewölkung sinkt die Bestrahlungsstärke auf unter 100 W/m^2 ab.

Auch jeder Mensch strahlt entsprechend seiner Temperatur elektromagnetische Wellen im (unsichtbaren) infraroten Spektralbereich ab. Im Ruhezustand verliert er ständig Energie in der Größenordnung von ca. 80 W. Wenn wir einfach neben einem anderen Menschen in einem Abstand von etwa 1 m stehen, werden wir daher von ihm mit elektromagnetischen Wellen im infraroten Spektralbereich der Intensität von 2–3 W/m² bestrahlt. Die Wirkung dieser im Vergleich zur Mobilfunkstrahlung starken elektromagnetischen Infrarotstrahlung besteht in einer biologisch unerheblichen Erwärmung des bestrahlten Körpers.

Künstliche elektromagnetische Wellen, insbesondere Mobilfunkstrahlung, können schon bei viel niedrigeren Intensitäten vielfältige biologische Effekte bewirken. Bereits Intensitäten von 100 W/m² erzeugen schwerwiegende gesundheitliche Schäden, etwa Missbildungen an Embryonen, Fehlgeburten, Störungen der DNA-Synthese, Chromosomenschäden, Zellwucherungen, Augenschädigungen u.v.m. Diese Befunde sind wissenschaftlich unstrittig und gelten als bewiesen.

Zum Vergleich: Der derzeitige Grenzwert für Ganzkörper(dauer) bestrahlung durch Mobilfunkfrequenzen liegt für die Allgemeinbevölkerung bei einem SAR-Wert von 0,08 W/kg, was für UMTS-Wellen etwa 10 W/m² entspricht. Für die Teilkörperbestrahlung (z. B. für das Handy am Kopf), die bei der Festlegung der Grenzwerte nicht als Dauerbestrahlung betrachtet wurde, gilt der höhere Grenzwert von SAR = 2 W/kg. Dies entspricht Intensitäten, die den Wert von 10 W/m² deutlich überschreiten können.

Ein Vergleich mit natürlichen elektromagnetischen Wellen zeigt also deutlich, dass es bei den biologisch bedeutsamen Wirkungen nicht (allein) auf die Intensität bzw. die Leistungsflussdichte der Welle ankommt, sondern andere Eigenschaften für die biologische Relevanz mit ausschlaggebend sein müssen. Es ist das Verdienst von Panagopoulos et al., erkannt zu haben, dass hierfür neben der Intensität und Einwirkungsdauer die Polarisation der elektromagnetischen Wellen ein entscheidender Faktor (neben ggf. weiteren anderen Faktoren) ist: Denn sie können physikalisch erklären, warum polarisierte elektromagnetische Wellen bereits aufgrund ihrer Polarisation und schon ab einer schwachen Intensität in der Lage sind, die spannungssensiblen Kanalproteine der Zellmembran zu aktivieren, was bei natürlichen elektromagnetischen Wellen vergleichbarer Intensität nicht geschieht. Damit kann die unterschiedliche biologische Gefährlichkeit von natürlichen (überwiegend unpolarisierten) und künstlichen (polarisierten) Wellen in natürlicher Weise erklärt werden.

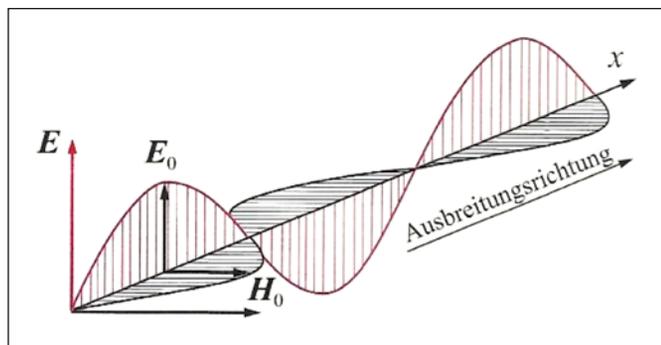


Abb. 2: Modell einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle

2.2 Was heißt Polarisation?

Polarisation gibt es nur bei transversal schwingenden Wellen, bei denen die Auslenkung des Mediums senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt – daher der Name „transversal“. Hierzu gehören auch Radiowellen und Lichtwellen: Bei solchen elektromagnetischen Wellen steht das wellenförmige elektrische Feld E und das zugehörige magnetische Feld H senkrecht aufeinander und die Felder schwingen beide senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Lineare Polarisation liegt vor, wenn die beiden Ebenen, in denen die Felder schwingen, ihre einmal erzeugte Lage im Raum im Laufe der Zeit beibehalten (vgl. Abb. 2).

In Abb. 2 beschreibt E_0 die Schwingungsamplitude der elektrischen Feldstärke, analog dazu bezeichnet H_0 die Amplitude der magnetischen Feldstärke. Die Schwingungsrichtung der elektrischen Feldstärke heißt auch Polarisationsrichtung. Die Ausbreitung des elektrischen Teils der Welle erfolgt in der sog. Polarisationsebene. Generell kann eine elektromagnetische Welle in jeder Ebene linear polarisiert sein.

Von elliptischer Polarisation spricht man, wenn die Spitze des elektrischen Feldvektors auf einer Ellipse um die Ausbreitungsrichtung rotiert. Ein Spezialfall dieser Polarisation ist die zirkulare Polarisation, bei der sich der Feldvektor kreisförmig bewegt (Abb. 3). Man unterscheidet bei diesen Polarisationsarten links- und rechtsdrehende Wellen, was von der Drehrichtung abhängt, in die der Feldvektor rotiert. Die Drehrichtung wird dabei vom Beobachtungsstandpunkt aus angegeben, an dem die Welle ankommt. Abb. 3 stellt demnach eine linkszirkular polarisierte Welle dar, die sich entlang der z-Achse ausbreitet, da der elektrische Feldvektor eine Kreisbahn gegen den Uhrzeigersinn um die z-Achse beschreibt. Wellen dieser Art treten zum Beispiel um Hochspannungsleitungen auf, die mit 3-Phasen-Wechselstrom arbeiten.^(IV)

Elektromagnetische Wellen werden überall dort abgestrahlt, wo elektrische Ladungen schwingen bzw. beschleunigt werden, z. B. in den Leitungen für den Haushaltsstrom, in Licht-

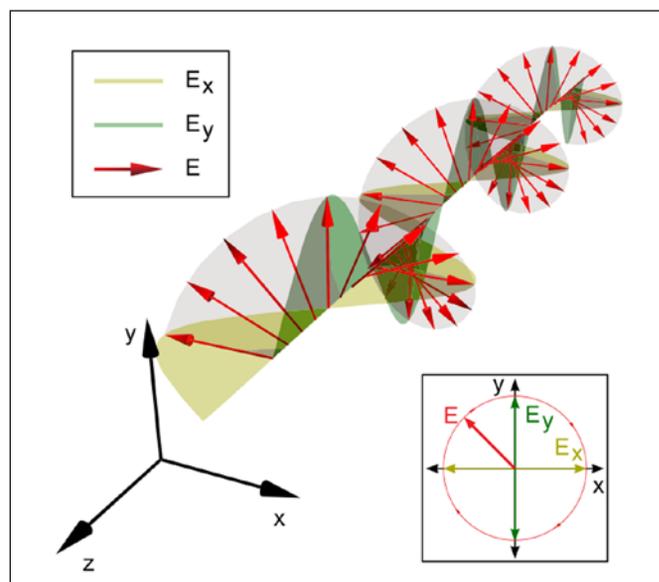


Abb. 3: Modell einer zirkular polarisierten transversalen Welle

quellen, oder in Radio- und Mobilfunkantennen. Wenn eine solche elektromagnetische Welle auf Materie trifft, werden die Elektronen der Atome, polare Moleküle, sowie Ionen (geladene Atome bzw. Moleküle) der Materie angeregt bzw. in Schwingung versetzt. Ihnen wird insbesondere die Schwingungsfrequenz der einfallenden elektromagnetischen Welle aufgezwungen.

Viele künstlich erzeugte elektromagnetische Wellen, zu denen auch die Mobilfunkstrahlung gehört, sind aufgrund der Art ihrer Erzeugung linear polarisiert, da zum Beispiel alle Elektronen in einer Antenne in einer durch ihre Lage im Raum bestimmten festen Richtung schwingen, was sich in der Polarisation der ausgesandten Welle widerspiegelt. Im einfachsten Fall einer Dipolantenne (gerader Metallstab bestimmter Länge) liegt das E -Feld parallel zu ihr.

Natürliche elektromagnetische Wellen wie die Sonnenstrahlung oder das Licht z. B. von Glühlampen und Leuchtstofflampen sind dagegen überwiegend nicht polarisiert: In einer Lichtquelle entsteht Licht dadurch, dass Elektronen einer Vielzahl von Atomen oder Molekülen von einem angeregten Zustand nach kurzer Zeit (in ca. 10^{-8} s) wieder in ihren strahlungslosen Grundzustand übergehen. Dabei sendet jedes Atom einen linear polarisierten elektromagnetischen (Licht-) Wellenzug endlicher Länge aus. Da die Schwingungsrichtungen der Elektronen dabei jedoch zufällig verteilt sind, gilt dies auch für die verschiedenen ausgesandten Lichtwellen: Natürliches Licht besteht also aus einer Überlagerung vieler linear polarisierter Wellen endlicher Länge mit festen, aber verschiedenen Schwingungsrichtungen (Polarisationsebenen) und zufällig verteilten Schwingungsphasen. Außerdem ändert sich die Phasenbeziehung der einzelnen Wellen im Laufe der Zeit, da die Lichtquelle meist nicht streng monochromatisch (nur eine Frequenz aussendend) ist. Es ergibt sich eine resultierende Schwingung, deren Schwingungsebene sich ständig in völlig unregelmäßiger Folge ändert. Solche Wellen nennt man unpolarisiert.

Durch Streuung z. B. an Luftmolekülen und auch bei Reflexionen unter dem Brewster-Winkel z. B. an Glasscheiben können aus unpolarisierten optischen Wellen polarisierte (Teil-) Wellen entstehen. Ihr Anteil an der Gesamtstrahlung ist jedoch gering.

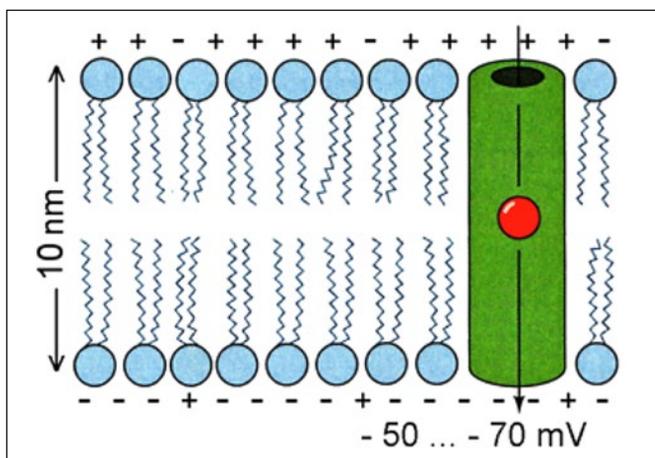


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Ausschnitts der Zellmembran (Doppellipidschicht) mit integriertem Ionenkanal, der ein Ion (rot gefärbt) enthält.

2.3 Elektrophysikalische Aspekte der Zellmembran

Alle lebenden Zellen besitzen eine Membran, die aus einer Doppelschicht von Phospholipiden (bestimmten Fettsäuren) besteht, in die mehrere hundert Proteine verankert sind, die verschiedene Funktionen haben, z. B. als Ionenpumpen, Ionenkanäle (Kanalproteine), Anker (Ankerproteine), Rezeptoren (Rezeptorproteine) oder Enzyme.

Manche Proteine durchdringen die Membran vollständig (sog. Integrale Membranproteine (IMP)), etwa die Rezeptorproteine und die Kanalproteine. Solche Proteine können damit nach beiden Seiten der Membran Wirkungen ausüben oder erfahren.

Die Membran und damit alle Membranproteine befinden sich in einem elektrischen Feld, das quer über die Membran vorhanden ist: Die Spannung dieses Feldes beträgt etwa $U_R = -50$ bis -70 mV^(V) (Ruhepotential) bei einer Membrandicke d von ungefähr $d = 10$ nm = 10^{-8} m = 10 Millionstel Millimeter (Abb. 4). Trotz des zahlenmäßig kleinen Wertes der Spannung bedeutet dieser für die mikroskopischen Verhältnisse der Zelle eine außerordentlich hohe Änderung zwischen Innen und Außen, wie die Berechnung der elektrischen Feldstärke zeigt: Die elektrische Feldstärke E_R hat einen Wert von $E_R = U_R/d = 5$ bis $7 \cdot 10^6$ V/m = 5 bis 7 Millionen Volt pro Meter. Derartig hohe Feldstärken würden unter normalen Umständen krachende Blitzentladungen auslösen^(16, S. 24), was darauf hindeutet, dass die Zellmembran ein sehr guter Isolator ist. Zur Auslösung von Blitzen in einer Gewitterwolke reicht bereits eine elektrische Feldstärke von ca. 2.000 V/m aus. Maximal werden bei Gewitter Feldstärken von (nur) 25.000 V/m erreicht.

Das Innere der Zelle ist im Ruhezustand – unter Berücksichtigung aller elektrisch negativen und positiven Beiträge – insgesamt elektrisch negativ geladen, wogegen das Zelläußere entsprechend eine elektrisch positive Netto-Ladung aufweist. Zum Beispiel ist die Na^+ -Konzentration außerhalb der Zellmembran im Ruhezustand höher als im Innern, während es für die K^+ -Konzentration umgekehrt ist. Zwischen diesen wirkt die Doppellipidschicht der Zellmembran als schützende Isolationsschicht (sog. Dielektrikum). Die Zellmembran ist damit im Ruhezustand einem elektrischen Kugelkondensator mit Dielektrikum ähnlich.

Die elektrische Spannung U_R zwischen dem Äußeren und Inneren der Zellmembran wird dabei unter Energieaufwand durch „Ionenpumpen“ (IMPs) aktiv aufgebaut (in Abb. 4 nicht dargestellt). Die Zellmembran ist darüber hinaus für viele andere Funktionen zuständig, z. B. für die Aufnahme von Nährstoffen, Abgabe von Abfallstoffen, für den Signalaustausch zwischen Zelle und Außenwelt, den Austausch von Wasser und insbesondere für den Austausch von Ionen, wie z. B. Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Kalium (K^+) und Chlor (Cl^-) über die in die Membran verankerten Ionenkanäle, die offen oder geschlossen sein können und ionenselektiv angelegt sind.

Das Entscheidende ist, dass das Öffnen und Schließen der Ionenkanäle gesteuert ist: Die Ionenkanäle sind normalerweise verschlossen. In Abhängigkeit von Stimulationen – die vielfältigen Ionenkanäle sind für verschiedene Arten von Stimulationen sensitiv – werden die Ionenkanäle für den Ionenaustausch durchlässig (offen) und lassen bestimmte Ionen für einen kurzen Zeitraum hindurch diffundieren. Das Öffnen und Schließen der Ionenkanäle wird als „gating“ (Torsteuerung) bezeichnet.

Eine besondere Rolle spielen die spannungsgesteuerten Ionenkanäle, die durch Änderungen der Membranspannung aktiviert werden. Sie sind zum Beispiel bei der Signalleitung in Nervenzellen bedeutsam: Sobald eine Nervenzelle lokal erregt wird, öffnen sich kurzzeitig (ca. 1 ms (Millisekunde) lang) die Na^+ -Kanäle und Na^+ -Ionen können spontan entsprechend ihrem Konzentrationsgefälle in die Zelle einströmen.^(vi) Hierdurch wird die Membranspannung zunächst dem Betrage nach abgebaut (Depolarisierung) und sogar auf positive Werte von etwa +30 mV angehoben, da die negativen elektrischen Ladungen im Innern der Zelle durch die Na^+ -Ionen elektrisch überkompensiert werden. Die im Vorzeichen veränderte Membranspannung wiederum bewirkt, dass sich benachbarte spannungsgesteuerte K^+ -Kanäle – nach etwa 0,5 ms – öffnen, so dass K^+ -Ionen spontan entsprechend ihrem Konzentrationsgefälle aus der Zelle ausströmen, bis sich der Kanal nach ca. 2 ms auch wieder schließt. Die Depolarisierung eines Membranabschnitts führt nun dazu, dass sich weitere Na^+ -Kanäle in benachbarten Membranabschnitten öffnen. Der oben beschriebene Vorgang wiederholt sich und so pflanzt sich die kurzzeitige lokale Änderung der Membranspannung – das sog. Aktionspotential – entlang des Axons der Nervenzelle mit einer Geschwindigkeit von etwa 10 m/s fort. Nach einer „Erholungsphase“ des aktivierten Zellabschnitts ist die ursprüngliche Membranspannung wieder hergestellt (Repolarisierung) und die Zelle kann dort erneut erregt werden: So kann eine Nervenzelle etwa alle 10 ms einen Nervenimpuls übermitteln. Ionenpumpen stellen die geringfügig veränderten Na^+ - bzw. K^+ -Konzentrationen zu beiden Seiten der Membran unter Energieaufwand wieder her (nach Voet et al.⁽¹⁷⁾, S. 331).

Die schnellen Änderungen der Membranspannung sind also nur durch die hohe Durchlässigkeit (Permeabilität) der verschiedenen Ionenkanäle möglich, die bei geöffnetem Kanal kurzzeitig vorhanden ist. So kann die Zelle effektiv auf Umweltreize reagieren.

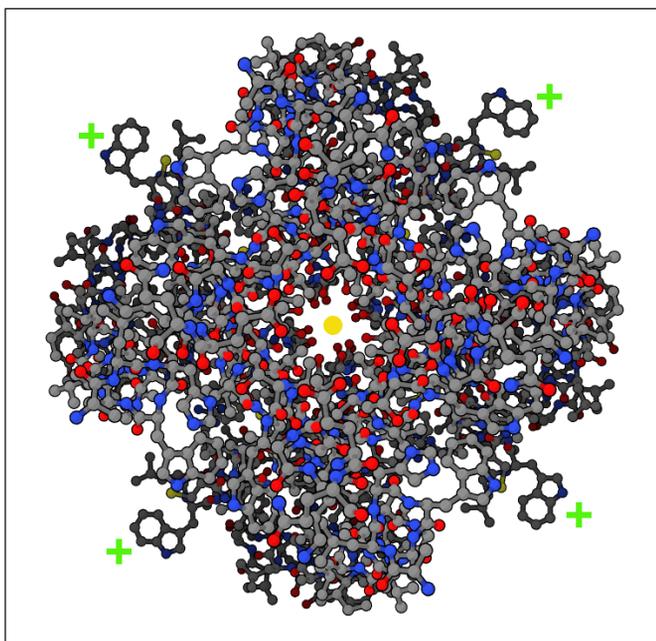


Abb. 5: Ansicht vom extrazellulären Bereich auf den Querschnitt eines K^+ -Ionenkanals: Das Zellplasma befindet sich hinter der Ansicht. Ein K^+ -Ion ist durch eine gelbe Kugel im Zentrum des Kanals dargestellt.

2.4 Bedingungen für die Öffnung spannungsgesteuerter Ionenkanäle

Der materielle Aufbau spannungsgesteuerter Ionenkanäle besteht meist aus vier gleichartigen Einheiten, die symmetrisch um den Ionenkanal herum angeordnet sind (ähnlich einem vierblättrigen Kleeblatt ohne Stängel; die Öffnung in der Mitte entspricht dem Kanal). Sie werden daher als Tetramere bezeichnet (Tetra = Vier). Eine anschauliche Darstellung (Proteinstruktur) eines K^+ -Ionenkanals zeigt Abb. 5. Jede der vier Einheiten eines K^+ -Kanals besteht wiederum aus sechs Untereinheiten (Transmembrandomänen), die mit S1 bis S6 bezeichnet werden, und noch weiteren Untereinheiten, auf die hier nicht eingegangen werden kann.

Jede der vier Einheiten enthält einen schraubenförmig gewundenen Spannungssensor, der zur extrazellulären Seite hin positiv geladen ist (in Abb. 5 durch das + Zeichen angedeutet). Sie bilden die Untereinheit S4 und werden auch als S4-Helix bezeichnet. Sie liegen (in kleinem Abstand) ebenfalls symmetrisch um den Ionenkanal herum und sind weitgehend achsenparallel zu ihm ausgerichtet. Im Ruhezustand der Zelle befinden sich die Spannungssensoren in einem elektrochemischen Kräftegleichgewicht. Dieses hält den Boden des Ionenkanals zur intrazellulären Seite hin geschlossen.

Aus vielen experimentellen Untersuchungen weiß man, dass sich ein spannungsgesteuerter Ionenkanal öffnet, sobald sich die Membranspannung U_R um einen Betrag von ca. $\Delta U = 30$ mV ändert. Dies geschieht, wenn zum Beispiel genügend viele negative Ionen an der Membrannenseite durch die Membran auf die andere Seite fließen. Dies führt zu einer Veränderung der elektrischen Kräfte innerhalb der Membran, die insbesondere auf die Spannungssensoren S4 einwirken und ihn zur extrazellulären Membranseite verschieben, da die anziehenden Kräfte der negativen Ladungen in der Zelle auf die positiven Ladungen des Sensors nachlassen. Diese Bewegung von S4 spreizt über eine Art Zughebel das Kanalende an der Membrannenseite, so dass sich dieser öffnet und den Ionenfluss freigibt. Dieser Vorgang ist wissenschaftlich gut erforscht und stellt biophysikalisches Grundwissen dar.⁽¹⁷⁾ Die durch die Spannungsänderung ΔU auftretende Kraft F_{open} , die auf die positiven Ladungen der Spannungssensoren S4 einwirkt und zur Öffnung des Kanals führt, lässt sich aus dem Wert in Höhe von $\Delta U = 30$ mV, der Membrandicke $d = 10^{-8}$ m und der effektiven Ladung q_{eff} des Spannungssensors ($q_{\text{eff}} = 2,72 \cdot 10^{-19}$ Coulomb) einfach berechnen:

$$F_{\text{open}} = q_{\text{eff}} \cdot \Delta U / d = 8,16 \cdot 10^{-13} \text{ N} \quad (*)$$

N steht für Newton, die Einheit der Kraft. Bereits diese extrem kleine Kraft F_{open} ist in der Lage, den Ionenkanal zu öffnen. Normalerweise entsteht die Kraft F_{open} durch entsprechend große Ladungsänderungen auf einer oder beiden Seiten der Zellmembran. Andererseits ist aus experimentellen Untersuchungen bekannt (S. 3), dass sich die Ionenkanäle auch unter Einwirkung von äußeren elektromagnetischen Wellen, z. B. von Mobilfunkwellen, öffnen können. Es ist das Verdienst von Panagopoulos et al. erkannt zu haben, dass diese Kraft F_{open} insbesondere durch die Polarisation von elektromagnetischen Wellen, die von außen auf die spannungsgesteuerten Ionenkanäle einwirken, entstehen kann. Der bemerkenswerte und aufschlussreiche Mechanismus ist dabei folgender:

2.5 Die Öffnung spannungsgesteuerter Ionenkanäle durch ungepulste EMF

Ohne die Einwirkung einer elektromagnetischen Welle befinden sich alle (frei beweglichen und fest gebundenen) positiv und negativ geladenen Ionen in der Zellmembran in einem dynamischen elektrochemischen Gleichgewichtszustand. Dabei üben alle Ionen aufeinander elektrisch anziehende oder abstoßende Coulombkräfte (verschiedener Stärke je nach Abstand) aus. Im Gleichgewichtszustand gilt, dass jedes Ion in etwa an seiner Position verbleibt (aufgrund der thermischen Bewegung gibt es keine Ruhe) und um diese Gleichgewichtsposition schwingt (aufgrund der rücktreibenden Coulombkräfte durch die anderen Ionen). Im Gleichgewichtszustand ist die Summe der Coulombkräfte aller der Ionen, die auf ein herausgegriffenes Ion A einwirken, zusammen mit den chemischen Kräften des umgebenden Mediums Null. Erst bei Bewegungen dieses Ions A weg von seiner Gleichgewichtsposition kommen Reibungskräfte mit der umgebenden „Flüssigkeit“ und rücktreibende Kräfte durch alle anderen Ionen in der Umgebung zur Geltung, die bei kleinen Abweichungen allerdings sehr schwach sind, wie Panagopoulos et al. in ihrer Veröffentlichung⁽¹⁹⁾ zeigen.

Bei Einwirkung einer elektromagnetischen Welle übt der elektrische Feldvektor E auf alle Ladungsträger der Zelle eine oszillierende Kraft aus. Für das Folgende bedeutsam sind dabei genau die frei beweglichen Ionen, die sich in der Nähe eines spannungssensiblen Ionenkanals befinden, also einige Ionen auf der Außen- und Innenseite der Zellmembran und insbesondere die Ionen, die im geschlossenen Ionenkanal selbst eingeschlossen sind. Typisch ist, dass jede periodisch schwingende elektromagnetische Welle diesen Ionen ein Mitschwingen aufzwingt, und zwar mit der Frequenz f der anregenden Welle, da alle Ladungen von elektromagnetischen Feldern Kräfte erfahren.

Polarisierte (!) elektromagnetische Wellen bewirken darüber hinaus während ihrer Einwirkungsdauer ein zusätzliches Phänomen, das erst Panagopoulos et al. durch ihre Berechnungen erkannt haben: Da der elektrische Feldvektor E der polarisierten Welle am Ort jedes Ions in einer räumlich festen Ebene schwingt, werden insbesondere die frei beweglichen Ionen räumlich kohärent von ihrer normalen Gleichgewichtsposition in der Zelle entsprechend der Richtung des elektrischen Feldvektors auf eine neue benachbarte Gleichgewichtsposition verschoben, um die sie nun in Phase mit der Welle schwingen (Abb. 6). Die neue Gleichgewichtsposition verschiebt sich nur

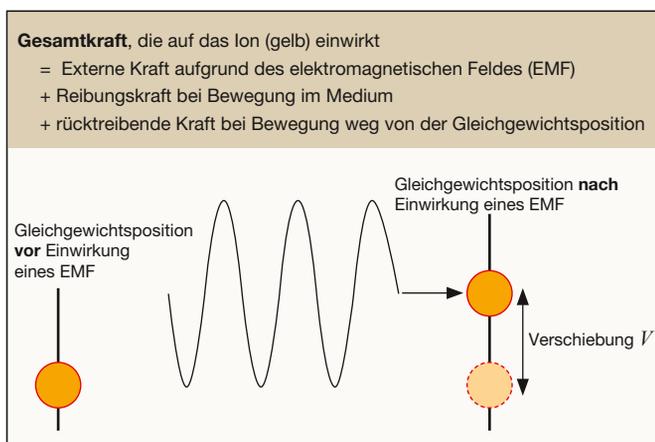


Abb. 6: Kräfte und ihre Wirkung auf ein frei bewegliches Ion in der Zellmembran

sehr langsam wieder in Richtung der alten Gleichgewichtsposition, so dass sie für eine längere Zeit wie eine neue Gleichgewichtsposition erscheint. Die fest gebundenen Ionen dagegen, insbesondere die Ladungen der Spannungssensoren, werden durch die einwirkenden Felder nicht verschoben und bleiben an ihrer Position. Dieses Ergebnis ist überraschend und widerspricht der Erwartung, dass die frei beweglichen Ionen durch EMF nur stärker – also mit größerer Amplitude – um ihre „alte“ Gleichgewichtsposition schwingen. Erst diese wider Erwarten anhaltende mittlere Verschiebung ist der Grund dafür (s. u.), dass die Ionen den Spannungssensoren S4 der Ionenkanäle genügend nahe kommen und dabei so große Coulombkräfte auf sie ausüben können, dass diese den Kanal freigeben.

Bei unpolarisierten Wellen dagegen kann eine länger anhaltende Verschiebung nicht auftreten, da sich die Verschiebungsrichtungen ständig räumlich ändern und sich daher im Mittel keine quasi konstante Verschiebung während der Einwirkungsdauer ergeben kann.

Die Höhe der Verschiebung V der frei beweglichen Ionen hängt von drei einleuchtenden Faktoren ab: Die Verschiebung V nimmt proportional zur maximalen Kraft F_0 zu, die von der elektromagnetischen Welle auf die Ladungsträger ausgeübt wird (sie ist gleich dem Produkt aus der Amplitude E_0 der elektrischen Feldstärke und der Größe der elektrischen Ladung q des Ions), und nimmt mit der Frequenz f der Schwingung der anregenden Welle ab, d. h. je schneller sich die Richtung – das Auf und Ab – der elektrischen Feldstärke E (bei gleicher Amplitude) ändert, desto weniger Zeit bleibt dem Ion zu folgen, desto geringer die Verschiebung. Weiterhin wird sie bestimmt durch die Dämpfung $k^{(VII)}$ des umgebenden, viskosen Mediums, in dem die Ladung schwingt. Die Berechnungen von Panagopoulos et al. zeigen folgenden plausiblen Zusammenhang:

$$\text{Verschiebung } V = F_0 / f \cdot k = \frac{q E_0}{4 f} \cdot 10^{11} \frac{s}{kg} \quad (**)$$

Anders gesagt: Je stärker die elektrische Feldstärke E_0 der polarisierten elektromagnetischen Welle – und damit die Intensität bzw. Leistungsflussdichte dieser Welle – und je geringer ihre Frequenz f ist, desto größer ist die Verschiebung eines frei beweglichen Ions in der Zelle.

Panagopoulos et al. haben dieses Ergebnis mit Hilfe der mathematischen Lösung der Newtonschen Grundgleichung für erzwungene Schwingungen von Ionen in viskosen Medien bei Vorhandensein rücktreibender Kräfte durch eine aufwändige Rechnung erhalten, die tiefliegende mathematische Kenntnisse voraussetzt und daher im Einzelnen hier nicht dargestellt werden kann. Sie kann ausführlich in Panagopoulos et al.⁽¹⁹⁾ nachgelesen werden.

Biologisch besonders wirksam ist die Verschiebung in dem Fall, wo die im Ionenkanal eingeschlossenen z. B. Na^+ -Ionen entlang der Achse des Ionenkanals in Richtung der positiven Ladungen der Spannungssensoren S4 (in Abb. 5 zum Leser hin) verschoben und ihnen damit angenähert werden. Hierdurch erfahren die einzelnen Spannungssensoren eine erhöhte abstoßende Coulombkraft $F^{(VIII)}$ (gleiche Ladungen stoßen sich ab, umso mehr, je näher sie sich sind). Wenn

diese erhöhte Coulombkraft F gleich oder größer wird als die oben angegebene Kraft $F_{\text{open}} = 8,16 \cdot 10^{-13}$ N (vgl. S. 6, Gleichung (*)), kommt der Spannungssensor in Bewegung und der Kanal öffnet sich.

Panagopoulos et al. konnten mit Hilfe des Coulombgesetzes berechnen, dass für diese Kraft bereits eine minimale Verschiebung von $V_{\text{open}} = 10^{-12}$ m von vier frei beweglichen Ionen in der Nähe von S4 im Ionenkanal ausreicht.^(IX) Diese kleine Verschiebung beträgt nur etwa ein 10.000-stel der Membrandicke bzw. etwa ein 100-stel des Ionendurchmessers (vgl. Panagopoulos et al. ⁽⁷⁾). Die entsprechende aktivierende Verschiebung der frei beweglichen Ionen auf der Innen- bzw. Außenseite der Zellmembran, die sich in der Nähe des Spannungssensors S4 befinden, liegt dagegen bei etwa 20-fach höheren Werten.^(X)

Damit ist ein einsichtiger und überzeugender Mechanismus aufgezeigt, wie von außen einwirkende polarisierte elektromagnetische Wellen die Öffnung spannungsgesteuerter Ionenkanäle hervorrufen können. Die Aktivierung kommt dabei nicht durch eine direkte Einwirkung der EMF auf die Spannungssensoren der Ionenkanäle zustande, denn dafür sind sie zu schwach. Erst über die frei beweglichen und leicht verschiebbaren Ionen in der Nähe der Spannungssensoren können genügend große Kräfte auf die Spannungssensoren entstehen, die dann den Kanal öffnen.

2.6 Schwellenwerte für die Öffnung spannungsgesteuerter Ionenkanäle

Mit den bisher dargestellten Ergebnissen lassen sich Schwellenwerte der einwirkenden polarisierten Wellen abschätzen, die in der Zellmembran vorliegen müssen, um den Kanal öffnen zu können:

Der Ionenkanals öffnet sich, wenn innerhalb des Ionenkanals die Ionenverschiebung V , die durch die anregende polarisierte elektromagnetische Welle hervorgerufen wird, größer ist, als der mindestens erforderliche Wert von $V_{\text{open}} = 10^{-12}$ m, d. h.

für $V > 10^{-12}$ m öffnet sich der Ionenkanal.

Diese Bedingung lässt sich mit Hilfe der Gleichung (**) auf S. 7 für V in eine äquivalente Bedingung für die elektrische Feldstärke E_0 der anregenden elektromagnetischen Welle umschreiben:

$$E_0 \geq \frac{4f}{q} \cdot 10^{-23} \text{ kg m/s} = \frac{f}{4z} \cdot 10^{-3} \text{ s} \frac{V}{\text{m}} \quad (***)$$

f : Frequenz der Welle, z : Ladungszahl; q : Ladung des frei beweglichen Ions, d.h. für die Ionen Na^+ , K^+ und Cl^- ist $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C bzw. $z = 1$, für Ca^{++} ist $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$ C bzw. $z = 2$ einzusetzen.

Die rechte Seite der Gleichung (***) stellt Schwellenwerte für die elektrischen Feldstärken dar, die mindestens vorliegen müssen, damit sich der Kanal öffnet. Sie steigen proportional mit der Frequenz der Welle an und verringern sich umgekehrt proportional zur Größe der Ladung des frei beweglichen Ions. Setzt man die Werte für q bzw. z ein, ergeben sich folgende Bedingungen für das Öffnen der Ionenkanäle:

	Bedingungen für das Öffnen der Ionenkanäle	
	Na^+ , K^+ und Cl^-	Ca^{++}
Elektrische Feldstärke E_0 der anregenden Welle	$E_0 \geq f \cdot 0,25 \text{ s mV/m}$	$E_0 \geq f \cdot 0,125 \text{ s mV/m}$

Diese Gleichungen sind sehr aufschlussreich, wenn man für die Frequenz f die heute gebräuchlichen technischen Trägerfrequenzen einsetzt. Dann ergeben sich für die verschiedenen Ionenkanäle für einfach geladene Ionen (Na^+ , K^+ und Cl^-) folgende Schwellenwerte:

Trägerfrequenz f	Elektrische Feldstärken E_0 , die den Kanal öffnen	Leistungsflussdichten I_0 , die den Kanal öffnen ^(XI)
50 Hz Haushaltsnetz-Trägerfrequenz	$E_0 > 12,5 \text{ mV/m}$	$I_0 > 0,4 \mu\text{W/m}^2$
10 kHz Atmospheric (Wetterfelder)	$E_0 > 2,5 \text{ V/m}$	$I_0 > 16,6 \text{ mW/m}^2$
900 MHz Mobilfunk-Trägerfrequenz	$E_0 > 2,25 \cdot 10^5 \text{ V/m}$	$I_0 > 1,34 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$

Für die spannungssensiblen Ca^{2+} -Ionenkanäle sind die Schwellenwerte für die elektrischen Feldstärken E_0 zu halbieren, für die Leistungsflussdichten I_0 zu vierteln. Sie gehören nach diesem Modell zu den sensibelsten Ionenkanälen.

Die Tabelle zeigt sehr deutlich, dass bei niedrigen Frequenzen bereits äußerst schwache polarisierte Wellen an der Zellmembran (im mV/m-Bereich) ausreichen, um die Ionenkanäle zu öffnen. Bei den Trägerfrequenzen der Mobilfunkstrahlung müssten dagegen die Feldstärken äußerst hoch werden, was in der Praxis nicht vorkommt. Bereits die Grenzwerte beschränken ja die Felder auf maximal 10 W/m² bzw. 61,4 V/m. Auf der anderen Seite enthalten alle verwendeten Wellen des Mobilfunks offensichtliche oder versteckte Pulsungen, die im niederfrequenten Bereich (etwa 10 bis 2.000 Hz) liegen. Über diese Pulsungen sind Mobilfunkfelder dann doch in der Lage, die Ionenkanäle zu öffnen, wie im Folgenden dargestellt wird.

2.7 Die Wirkung gepulster EMF auf die Ionenverschiebung

Die Pulsung von elektromagnetischen Wellen bedeutet im einfachsten Fall, dass die (hochfrequente) Welle ständig ein- und wieder ausgeschaltet wird. Erfolgt dieses Ein- und Ausschalten in immer gleichartiger Folge, liegt eine periodische Pulsung vor. Zum Beispiel sind rhythmisch blinkende Lämpchen ein anschauliches Beispiel für eine periodische Pulsung von Lichtwellen. Die Abb. 7 zeigt die niederfrequente Pulsung eines WLAN-Senders im Bereitschaftsmodus (Ausschnitt von zwei Pulsen, Abstand nicht maßstabsgerecht):

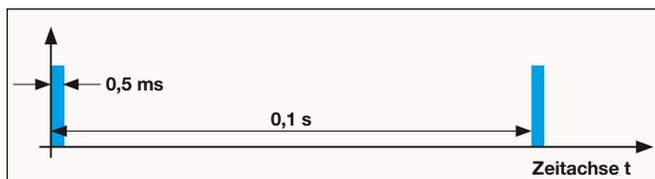


Abb. 7: WLAN-Pulsung im Bereitschaftsmodus

Die Pulse folgen in einem regelmäßigen Abstand von 0,1 s, was einer Pulsfrequenz $f_p = 10$ Hz, also von 10 Pulsen pro Sekunde, entspricht. Die Pulsdauer τ beträgt dabei nur $\tau = 0,5$ ms, was nur ein 200-stel der Zeitdauer zwischen zwei Pulsen ausmacht. Innerhalb eines Pulses (blaues Rechteck) schwingt eine hochfrequente elektromagnetische Trägerwelle der WLAN-Frequenz von z. B. $f_T = 2,4$ GHz = $2,4 \cdot 10^9$ Hz. In der Zeit eines Pulses von 0,5 ms erfolgen damit 1,2 Millionen Schwingungen der Trägerwelle!

Wie in Abschnitt 2.6 gezeigt wurde, ist eine hochfrequente Welle bei den heute erlaubten und typischen Werten für die elektrischen Feldstärken bzw. Leistungsflussdichten nicht in der Lage, eine genügend große mittlere Verschiebung der Ionen zu bewirken, so dass sich der Ionenkanal öffnet. Wir können nur von einer kleinen Verschiebung V_{min} ausgehen, die durch den Puls entsteht und nach Gleichung (**) auf S. 7 berechnet werden kann. Wie kann dann aber eine niederfrequente Pulsung der hochfrequenten Welle in der Lage sein, eine genügend große Verschiebung zu bewirken? Mit Hilfe der Überlegungen und Ergebnisse von Panagopoulos et al. ist hierzu folgender Mechanismus vorstellbar und plausibel begründbar:

Panagopoulos et al. konnten in ihrer Arbeit⁽¹⁹⁾ zeigen, dass sich eine einmal erreichte Verschiebung von alleine – also ohne Einfluss eines äußeren Feldes – nur sehr langsam abbaut, das Ion sich also nur sehr langsam wieder in den ursprünglichen Gleichgewichtszustand zurückbewegt. Dies liegt an den sehr speziellen physikalischen Verhältnissen in der Zelle: Die Masse des Ions ist äußerst klein, ebenso die rücktreibenden Kräfte, wenn das Ion seine Gleichgewichtsposition verlässt. Darüber hinaus ist das Medium, in dem sich das Ion bewegt, sehr „zäh“ (viskos), was zu einer starken Dämpfung jeder unbeeinflussten Bewegung führt. Für das WLAN-Bereitschaftssignal etwa bedeutet dies konkret, dass eine durch den ersten Puls (bereits durch den Pulsanstieg) ausgelöste Verschiebung des Ions innerhalb der Pause von 0,1 s zwischen zwei Pulsen praktisch erhalten bleibt und sich nur minimal abbaut: die prozentuale Abnahme der Verschiebung liegt in der Größenordnung von 10^{-12} ! Dies ist ein extrem kleiner Wert! Wir können also davon ausgehen, dass das Ion in den Pausen zwischen zwei Pulsen seine einmal erreichte Position am Ende eines Pulses beibehält.

Während eines Pulses schwingt das Ion um eine (mittlere) Verschiebung V_{min} . Die Rechnung zeigt, dass maximal die Verschiebung $2 V_{min}$ erreicht wird, minimal die Verschiebung 0. Wenn wir davon ausgehen, dass das Ion am Ende des Pulses die (mittlere) Verschiebung V_{min} nach Gleichung (**) auf S. 7 aufweist, dann liegt diese Verschiebung zu Beginn des nächsten Pulses immer noch vor, das Ion ist noch (lange) nicht in seiner ursprünglichen Gleichgewichtslage wieder angekommen. Eine erneut einsetzende hochfrequente Welle kann dann wiederum für eine weitere mittlere Verschiebung V_{min} sorgen, so dass nach einer Zahl von n Pulsen ($n = 1, 2, \dots$) eine mittlere Gesamtverschiebung von

$$V = n V_{min}$$

entsteht. Ob am Ende eines Pulses das Ion genau um den Wert V_{min} verschoben wurde, hängt von den Details der Welle innerhalb des Pulses ab: Denn die Welle ist entsprechend der Daten, die übertragen werden, in bestimmter Weise moduliert,

sodass die wahre Verschiebung am Ende des ersten Pulses kleiner oder auch größer ausfallen kann. Lediglich im statistischen Mittel stellt sich die Verschiebung V_{min} ein. Entscheidend ist aber, dass der nächste Puls die erste erreichte Verschiebung auf jeden Fall weiter anheben bzw. vergrößern wird, und zwar wieder im statistischen Mittel um V_{min} , wenn der Pulsanstieg immer in der gleichen Weise erfolgt, was technisch üblich ist. Dieser Mechanismus ist in seinem Effekt vergleichbar mit dem Einschlagen z. B. eines Nagels in eine Wand: Mit jedem Schlag (Puls) vergrößert sich die Verschiebung, denn zwischen zwei Schlägen wird die erreichte Verschiebung nicht aufgehoben, sondern bleibt erhalten.

Die Zahl n der Pulse steht mit der Pulsfrequenz f_p und der Zeit t , die nach n Pulsen vergangen ist, in einer einfachen Beziehung:

$$n = f_p \cdot t$$

Daher ist die Verschiebung des Ions nach der Zeit t gegeben durch die Gleichung:

$$V = n V_{min} = V_{min} \cdot f_p \cdot t \quad (****)$$

Eine genauere Rechnung im Rahmen der Theorie von Panagopoulos et al. zeigt, dass diese Gleichung eine Näherung darstellt, die aber für alle typischen Expositionsdauern eine sehr gute Näherung darstellt. Erst für (sehr) lang andauernde Einwirkungen nähert sich die Verschiebung einem Sättigungswert.

Wie auf S. 8 dargestellt wurde, öffnet sich der Ionenkanal für $V > 10^{-12}$ m. Diese Bedingung lässt sich mit Hilfe der Gleichung (**) auf S. 7, die jetzt für V_{min} zu nutzen ist, in eine äquivalente Bedingung für die Zeitdauer t umschreiben, die vergehen muss, damit sich bei einer gegebenen elektrischen Feldstärke E_0 der anregenden elektromagnetischen Welle der Ionenkanal öffnet:

$$t \geq \frac{1}{4z E_0} \frac{f_T}{f_p} \cdot 10^{-3} \frac{V}{m} s \quad (*****)$$

z : Ladungszahl des Ions, f_T : Trägerfrequenz, f_p : Pulsfrequenz.

Die Gleichung (*****) besagt, dass es im Prinzip bei jeder Feldstärke E_0 zu einer Öffnung des Ionenkanals kommen kann, wenn die Expositionszeit nur entsprechend lange genug andauert. Es gibt daher bei diesem Mechanismus für gepulste Wellen theoretisch keine minimale Feldstärke, oder einen Schwellenwert, unterhalb dessen keine störenden biologischen Effekte auftreten. Allerdings werden die erforderlichen Bestrahlungsdauern immer länger, je kleiner die Feldstärken sind, so dass es hier zu unrealistischen Werten kommen kann. Typische Beispiele aus der Praxis sollen im Folgenden die Aussagekraft der Gleichung (*****) für Calciumionenkanäle ($z = 2$) verdeutlichen. Für die anderen Ionenkanäle ($z = 1$) ergeben sich doppelt so lange Zeitdauern.

a) WLAN im Bereitschaftsmodus und bei voller Übertragungskapazität

Trägerfrequenz $f_T = 2,4$ GHz, Pulsfrequenz im Bereitschaftsmodus $f_p = 10$ Hz, Pulsdauer (ohne Anstiegs- und Abfallzeit) $\tau = 0,46$ ms, bei Access-Points auch $\tau \approx 0,25$ ms. Bei Datenübertragungen mit voller Übertragungskapazität werden die Pulse länger. Es kommt zu einem fast kontinuierlichen Signal,

das nur durch kurze Bestätigungssignale des Empfängers unterbrochen wird.⁽²²⁾ Dadurch treten höhere Pulsfrequenzen von etwa 600 Hz auf, d.h. die Pulsfrequenz entspricht dem 60-fachen der Pulsfrequenz im Bereitschaftsmodus. Entsprechend verringert sich die Zeitdauer bis zum Öffnen des Kanals um 1/60, aus Stunden werden Minuten!

Abstand vom WLAN-Sender (Laptop)	Leistungsflussdichte I_0 während eines Pulses (Spitzenwert)	Elektrische Feldstärke E_0 während eines Pulses	Mittlere Zeitdauer t , nach der sich der Ionenkanal öffnet	
			im Bereitschaftsmodus	bei voller Übertragungskapazität
0,2 m	$I_0 = 200.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 = 8,68 \text{ V}/\text{m}$	ca. 1,0 h	ca. 1,0 min
0,5 m	$I_0 = 32.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 = 3,47 \text{ V}/\text{m}$	ca. 2,4 h	ca. 2,4 min
1,0 m	$I_0 = 8.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 = 1,74 \text{ V}/\text{m}$	ca. 4,8 h	ca. 4,8 min

Die Tabelle zeigt, dass die mittleren Zeitdauern, nach denen sich der Ionenkanal öffnet, mit der Entfernung von der Strahlungsquelle proportional zunehmen und bei voller Übertragungskapazität etwa um einen Faktor 60 kürzer sind als im Bereitschaftsmodus der Quelle.

b) DECT-Telefon im Bereitschaftsmodus und bei voller Übertragungskapazität

Trägerfrequenz $f_T \approx 1,9 \text{ GHz}$; Pulsfrequenz $f_p = 100 \text{ Hz}$; Pulsdauer bei fehlender aktiver Verbindung: $\tau = 0,083 \text{ ms}$, bei aktiver Sprechverbindung $\tau = 0,368 \text{ ms}$. Jeder HF-Puls (Burst) wird mit maximaler Leistung gesendet, also mit 250 mW (Basisstation wie Mobilteil). Die mittlere Leistung ist entsprechend der Pulsdauer niedriger, für die biologische Wirkung auf den Ionenkanal ist aber der Spitzenwert maßgeblich.

Abstand vom DECT-Sender	Leistungsflussdichte I_0 während eines Pulses (Spitzenwert)	Elektrische Feldstärke E_0 während eines Pulses	Mittlere Zeitdauer t , nach der sich der Kanal öffnet
0,3 m	$I_0 = 265.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 10 \text{ V}/\text{m}$	ca. 4,0 min
0,5 m	$I_0 = 95.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 6 \text{ V}/\text{m}$	ca. 6,6 min
1,0 m	$I_0 = 24.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 3 \text{ V}/\text{m}$	ca. 13,2 min
1,5 m	$I_0 = 11.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 2 \text{ V}/\text{m}$	ca. 19,8 min

Quelle der Daten in den ersten 3 Spalten: The Introduction of DECT in Health Care Environments, SP report 97:18. Internet: <http://www.sp.se/electronics/RnD/reports/EMC/DECT.pdf>

Auch hier wird wieder an der Tabelle erkennbar, dass die mittleren Zeitdauern, nach denen sich der Ionenkanal öffnet, mit der Entfernung von der Strahlungsquelle proportional zunehmen. Im Nahbereich (Mobilteil am Kopf) können sie sehr kurz werden!

c) GSM 900 – Mobilfunk

Trägerfrequenz $f_T \approx 0,9 \text{ GHz}$; Pulsfrequenz des genutzten (von acht verfügbaren) Zeitschlitzes (beim Handy/Smartphone) $f_p = 216,66 \text{ Hz}$; die Basisstation funkt je nach Zahl der belegten Zeitschlitzes mit Vielfachen der Pulsfrequenz von f_p , so dass auch Pulsfrequenzen von $2 \times 216,66 \text{ Hz} = 433,33 \text{ Hz}$, $3 \times 216,66 \text{ Hz} = 650 \text{ Hz}$ usw. bis $8 \times 216,66 \text{ Hz} = 1733,33 \text{ Hz}$ vorkommen, wenn alle 8 Zeitschlitzes im Einsatz sind.

Pulsfrequenz f_p	Leistungsflussdichte I_0 während eines Pulses (Spitzenwert)	Elektrische Feldstärke E_0 während eines Pulses	Mittlere Zeitdauer t , nach der sich der Kanal öffnet
Handy GSM 900 216,66 Hz	$I_0 = 100.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 6,14 \text{ V}/\text{m}$	ca. 1,4 min
	$I_0 = 10.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 1,94 \text{ V}/\text{m}$	ca. 4,5 min
	$I_0 = 1.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 0,61 \text{ V}/\text{m}$	ca. 14 min
	$I_0 = 100 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 0,19 \text{ V}/\text{m}$	ca. 46 min
Basisstation GSM 900 1733,33 Hz	$I_0 = 100.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 6,14 \text{ V}/\text{m}$	ca. 11 s
	$I_0 = 10.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 1,94 \text{ V}/\text{m}$	ca. 34 s
	$I_0 = 1.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 0,61 \text{ V}/\text{m}$	ca. 1,8 min
	$I_0 = 100 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 0,19 \text{ V}/\text{m}$	ca. 5,7 min

d) UMTS

Trägerfrequenzen: $f_T = 1.900\text{--}2.170 \text{ MHz}$; Pulsfrequenz im TDD-Betrieb des genutzten (von 15 verfügbaren) Zeitschlitzes (beim Handy/Smartphone) $f_p = 1.500 \text{ Hz}$. Im FDD-Betrieb gibt es keine Pulsung wie bei WLAN, DECT und GSM. Daher lassen sich die Zeitdauern, bis sich der Calciumionenkanal öffnet, mit den Überlegungen von Panagopoulos und der Gleichung (*****) nicht unbedingt sinnvoll abschätzen. Für den TDD-Betrieb gilt:

Pulsfrequenz f_p	Leistungsflussdichte I_0 während eines Pulses (Spitzenwert)	Elektrische Feldstärke E_0 während eines Pulses	Mittlere Zeitdauer t , nach der sich der Kanal öffnet
1500 Hz für UMTS im TDD-Betrieb bei 2.025 MHz	$I_0 = 100.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 6,14 \text{ V}/\text{m}$	ca. 28 s
	$I_0 = 10.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 1,94 \text{ V}/\text{m}$	ca. 87 s
	$I_0 = 1.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 0,61 \text{ V}/\text{m}$	ca. 4,6 min
	$I_0 = 100 \mu\text{W}/\text{m}^2$	$E_0 \approx 0,19 \text{ V}/\text{m}$	ca. 15 min

Auch hier zeigen die Werte wiederum, dass im Nahbereich (z. B. Handy/Smartphone am Kopf mit $I_0 > 100.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$) sehr kurze Expositionsdauern ausreichen, um Ionenkanäle zu öffnen.

3. Diskussion und Folgerungen

Experimentelle Bestimmungen der Schwellenwerte an präparierten Gewebeproben zeigen, dass die von Panagopoulos et al. theoretisch berechneten Schwellenwerte für ungepulste EMF nach Gleichung (***) in guter Übereinstimmung mit diesen Untersuchungen sind. Weiterhin können Panagopoulos et al. auch die Schwellenwerte für die magnetischen Feldstärken der polarisierten Welle abschätzen. Dies wird ausführlich in Panagopoulos et al. ⁽²³⁾ dargelegt. Auch ein Vergleichstest mit anderen theoretischen Wirkungsmodellen zeigt, dass das Wirkungsmodell von Panagopoulos et al. diesen überlegen ist. ⁽²⁴⁾

Vergleicht man die theoretisch bestimmten Schwellenwerte bzw. Expositionsdauern, bis sich der Ionenkanal öffnet, mit den Feldstärken E_0 , die die derzeitigen künstlich erzeugten polarisierten und gepulsten Wellen (WLAN, DECT, GSM, UMTS, TETRA, LTE usw.) aufweisen, dann sind alle biologisch potentiell wirksamen Feldstärken bei den normalerweise auftretenden Expositionsdauern im Überfluss in unserer unsichtbaren Umwelt vorhanden. Auch schwache gepulste Hochfrequenzfelder können im Rahmen des dargelegten Wirkungsmechanismus bei entsprechend anhaltender Expositionsdauer (z. B. während der Nachtruhe) biologisch wirksam werden. Funkwellen können vom lebenden Organismus nicht einfach abgeschirmt werden (er ist kein Faraday-Käfig), sondern sie dringen über die Körperoberfläche mit abnehmender Intensität in den Körper ein (5–10 cm, je nach Gewebe). Die elektrischen Felder werden dabei geschwächt, die magnetischen nicht. Die Stärke der Abnahme des elektrischen Feldes (die Dämpfung) hängt dabei von der Frequenz und auch vom Gewebe ab. Allgemein gilt: Je höher die Frequenz, desto niedriger die Eindringtiefe. Alle Zellen an und in der Nähe der Oberfläche des Körpers sind damit besonders von der biologischen Wirkung der Mobilfunkstrahlung betroffen. Optische Strahlung dringt zum Beispiel nur Bruchteile von Millimetern in die Hautoberfläche ein.

Ein weiterer Punkt, auf den Panagopoulos et al. hinweisen, ist die Fähigkeit von polarisierten Wellen zur konstruktiven und destruktiven Interferenz. Bei konstruktiver Interferenz überlagern sich die elektrischen Felder lokal additiv und erzeugen so erhöhte Leistungsflussdichten. Für eine große Zahl von polarisierten Feldern gleicher Frequenz, wie in Gebieten mit einer Vielzahl von WLAN-Sendern, kann es leicht zu sog. hot spots kommen: Diese Zonen verstärkter Intensität führen entsprechend zu einer biologisch höheren Wirksamkeit, wenn man sich in solchen Zonen aufhält. Im Normalfall liegt eine Vielzahl von Mobilfunkwellen gleicher Polarisation, aber verschiedener Phasenlage und Leistungsflussdichte vor. Die Überlagerung führt dann nicht zu räumlich feststehenden hot spots, sondern zu zeitlich veränderlichen Orten konstruktiver Interferenz, deren Lage zu einem bestimmten Zeitpunkt unvorhersehbar ist.

Anwachsende biologische Zellaktivitäten resultieren nicht notwendig in beobachtbaren Gesundheitsbeeinträchtigungen, da der Organismus mit Gegenmaßnahmen reagiert und so die Störung zu kompensieren versucht, was für die Zelle Stress bedeutet. Diese adaptiven Reaktionen sind nur in Grenzen wirksam und nicht 100%-ig effektiv, vor allem dann nicht,

wenn der Organismus durch äußeren Stress, Erkrankungen oder (Leicht- bzw. Schwer-)Metalle und andere Umweltgifte (vor)geschwächt ist. Wenn er dann polarisierten gepulsten Wellen ausgesetzt wird, steigt die Wahrscheinlichkeit für gesundheitlich schädigende Effekte an, vor allem dann, wenn die Wellen dauerhaft auf den Organismus einwirken.

Bis heute wird der Einfluss der Polarisation von gepulsten elektromagnetischen Wellen auf den Organismus in der wissenschaftlichen Literatur wenig beachtet und in seiner Bedeutung unterschätzt. Es ist das Verdienst von Panagopoulos et al., die Polarisation und die Pulsung als wesentliche Faktoren für die biologische Relevanz dieser Wellen erkannt zu haben. Darüber hinaus haben sie theoretische Schwellenwerte abgeleitet, die in guter Übereinstimmung mit den bisherigen experimentellen Befunden stehen. Ihre Arbeit ist damit ein wegweisender Beitrag zum besseren Verständnis des Mechanismus, der biologischen Effekten durch Mikrowellenstrahlung zugrunde liegt.

Autor:

Dr. rer. nat. Klaus Scheler, Physiker
E-Mail: k.scheler@posteo.de

Fußnoten

- (I) Die Begriffe Welle und Strahlung werden im Folgenden synonym verwendet.
- (II) Die „Scientific Reports“ werden von der Nature Gruppe herausgegeben und gehören damit zu den einflussreichsten Publikationen. Sie liegen weltweit auf Platz 5. „Nature“ ist neben der US-amerikanischen Zeitschrift „Science“ die weltweit angesehenste Zeitschrift für Naturwissenschaften.
- (III) SAR = Strahlungsabsorptionsrate: Sie ist ein Maß für die pro Sekunde aufgenommene Strahlungsenergie pro kg.
- (IV) In drei Hochspannungsleitungen vibriert der Strom mit 50 Hz jeweils um 120° phasenverschoben, was zu entsprechend polarisierten Feldern in der Umgebung der Leitungen führt.
- (V) Das Ruhepotential wird negativ gezählt, also mit – 50 bis – 70 mV angegeben. Das Äußere der Zellmembran gilt als Bezugspunkt.
- (VI) Die Stromstärke im offenen Kanal beträgt aufgrund von Messungen ca. $4 \cdot 10^{-12}$ A, d. h. dass $2,5 \cdot 10^7$ Na⁺-Ionen pro Sekunde durch den offenen Kanal strömen. Ihre Geschwindigkeit v beträgt dabei etwa $v = 25$ cm/s nach (Panagopoulos et al. (19), S. 637).
- (VII) Innerhalb eines Ionenkanals gilt: $k \approx 4 \cdot 10^{-11}$ kg/s, wie sich aus experimentellen Untersuchungen ergibt.
- (VIII) Wegen actio = reactio wirkt diese Kraft auch auf die frei beweglichen Ionen zurück. Diese wird aber durch die Coulombkräfte aller anderen Ionen der Zellmembran teilweise kompensiert, so dass die resultierende rücktreibende Kraft viel schwächer ausfällt (vgl. S. 10).
- (IX) Die Zahl 4 ist wirklichkeitsnah. Es wurde in anderen experimentellen Untersuchungen gezeigt, dass im geschlossenen Ionenkanal stets mehrere Ionen eingeschlossen sind. Für ein einzelnes Ion beträgt $l_{\text{open}} = 4 \cdot 10^{-12}$ m.
- (X) Der höhere Wert ergibt sich durch die höhere Dielektrizitätskonstante des inner- und extrazellulären Mediums im Vergleich zum Medium im Ionenkanal (19).
- (XI) l_0 lässt sich aus E_0 nach folgender Formel berechnen: $l_0 = (E_0)^2 / 377 \Omega$

Referenzen

- (1) Yakymenko et al. (2015): Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med.* Aug 19, 1 – 16 [Epub ahead of print]
- (2) Deutsche Übersetzung von Diagnose-Funk e.V. (Hrsg.): Mobilfunkstrahlung weit unterhalb der Grenzwerte führt zu oxidativem Stress in Zellen. *brennpunkt – Ausgabe 15.10.2015* (<https://www.diagnose-funk.org>)
- (3) Warnke U (2009): Ein initialer Mechanismus zu Schädigungseffekten durch Magnetfelder bei gleichzeitig einwirkender Hochfrequenz des Mobil- und Kommunikationsfunks. *umwelt-medizin-gesellschaft 22. Jhg. 3/2009*, 219 – 232
- (4) Neitzke H-P (2012): Einfluss schwacher Magnetfelder auf biologische Systeme: Biophysikalische und biochemische Wirkungsmechanismen. *EMF-Monitor 18. Jhg. 4/2012*, 1 – 5
- (5) Barnes F, Greenebaum B (2015): The Effects of Weak Magnetic Fields on Radical Pairs. *Bioelectromagnetics 36*, 45-54. Published online 15 November 2014 in Wiley Online Library (<http://onlinelibrary.wiley.com/>)
- (6) Barnes F, Greenebaum B (2016): Some Effects of Weak Magnetic Fields on Biological Systems. RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates. *IEEE Power Electronics Magazine March 2016*, 60 - 68
- (7) Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL (2015): Polarization – A Key Difference between Man-made and Natural Electromagnetic Fields, in regard to Biological Activity. *Sci. Rep. 5*, 14914; doi: 10.1038/srep14914
- (8) Nonner W, Eisenberg B (2000): Electrodiffusion in ionic channels of biological membranes. *J. Mol. Liq. 87*: 149–162
- (9) Strahlenschutzkommission (SSK) (1991): Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk – Empfehlung der Strahlenschutzkommission. In: *Bundesanzeiger Nr. 43 vom 03. März 1992 – Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 24*, S. 6
- (10) Funk R et al. (2006): Effects of electromagnetic fields on cells: physiological and therapeutical approaches and molecular mechanisms of interaction. A review. In: *Cells Tissues Organs 182 (2)*, 59-78
- (11) Funk R et al. (2009): Electromagnetic effects – From cell biology to medicine. *Progress in Histochemistry and Cytochemistry 43 (2009)*, 177–264. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079633608000375>
- (12) Pall ML (2013): Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. *J. Cell. Mol. Med. 17*, 958-965
- (13) Pall ML (2015): Elektromagnetische Felder wirken über die Aktivierung spannungsabhängiger Calciumkanäle, um günstige oder ungünstige Wirkungen zu erzeugen. *umwelt medizin gesellschaft 2015; 28 (1)*, 22-31
- (14) Pall ML (2015): How to Approach the Challenge of Minimizing Non-Thermal Health Effects of Microwave Radiation from Electrical Devices. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM) ISSN: 2350-0557, Volume-2, Issue -5, September 2015*
- (15) Pall ML (2015): Review: Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression. *J. Chem. Neuroanat. (2015)*, in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jchemneu.2015.08.001>
- (16) Kiontke S (2014): Tatort Zelle. Wie Elektromog-Attacken unseren Organismus bedrohen. VITATEC Verlagsgesellschaft, Münsing
- (17) Voet D, Voet JG, Pratt CW (2010): Lehrbuch der Biochemie. Hrsg. von Annette G. Beck-Sickinger, Ulrich Hahn. Wiley-VCH, Weinheim. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.
- (18) Ketabi N, Mobasheri H, Faraji-Dana R (2013): Electromagnetic fields (UHF) increase voltage sensitivity of membrane ion channels; possible indication of cell phone effect on living cells. *Electromagn Biol Med*, 2015; 34(1): 1–13. <http://informahealthcare.com/ebm>
- (19) Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarbounis A, Filippetti AL, Margaritis LH (2000): A Mechanism for Action of Oscillating Electric Fields on Cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications 272*, 634–640
- (20) Virnich H: Neue Funksysteme: Gepulst, ungepulst oder...? (2007) In: BUND (Hrsg.): 6. Rheinland-Pfälzisches Mobilfunksymposium. Tagungsband S. 55-73
- (21) Virnich H: Nach der Frequenzversteigerung 2010: Mit LTE in die 4. Mobilfunkgeneration. (2011) In: BUND (Hrsg.): 10. Rheinland-Pfälzisches Mobilfunksymposium. Tagungsband S. 43-58
- (22) Schmid G, Lager D, Preiner P (2004): Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Teil 2: Mess- und Berechnungsverfahren. Im Auftrag des BfS Deutschland. ARC Seibersdorf research GmbH. Internet: http://www.emf-forschungsprogramm.de/home/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_030.html
- (23) Panagopoulos DJ, Karabarbounis A & Margaritis LH (2002): Mechanism for Action of Electromagnetic Fields on Cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications 298*, 95–102
- (24) Halgamuge MN, Abeyathne CD (2011): Behavior of Charged Particles in a Biological Cell Exposed to AC-DC Electromagnetic Fields. *Environmental Engineering Science Volume 28, Number 1*

Bildquellennachweis

Abb. 1: Entnommen aus (14), S. 325

Abb. 2: Schenk W., Kremer F. (Hrsg.) (2014). *Physikalisches Praktikum* (14. Auflage). Springer Spektrum, Wiesbaden, S. 44

Abb. 3: Prior, M. (2009). Polarisation von Licht. Aus: <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/5356>, Stand: 17.12.2015

Abb. 4: Entnommen aus (17), S. 325; die Darstellung wurde bearbeitet und ergänzt

Abb. 5: Entnommen aus https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Potassium_channel1.png; die Abb. wurde bearbeitet, die Ladungsvorzeichen ergänzt

Abb. 6: Nach einer Abb. in (23)