

Gepulste Funkwellen

Wirkungsmechanismen niederfrequent
gepulster Mikrowellen im Organismus



Bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. habil. med. J. Silny
Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu)
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

Januar 2004



Baden-Württemberg



1 Zusammenfassung

Elektromagnetische Felder üben Kräfte auf Träger elektrischer Ladungen und elementare Magnete aus, welche im Körper zahlreich vorhanden sind. Sie führen unter dem Einfluss dieser Felder synchrone Schwingungen um ihre Ruhelage aus. Wegen der Trägheit der Partikel nimmt die Amplitude der Schwingung mit zunehmender Frequenz des Feldes ab. Bei Resonanzsystemen findet bei Übereinstimmung der Feld- und Resonanzfrequenz eine Anregung statt, wobei sich die Amplitude der Schwingung erhöht.

Das elektromagnetische Feld überträgt in das biologische System Energie, die zum größten Teil die „Reibungsverluste“ der zu Schwingungen angeregten Partikel deckt. Der Energieverlust wird in Wärme umgewandelt. Auf nicht thermischem Wege können elektromagnetische Felder biologische Pro-

zesse nur dann beeinflussen, wenn ihre Periodendauer vergleichbar (bei Resonanzsystemen) oder wesentlich länger ausfällt als die Dauer der biologischen Reaktion.

Die Periodendauer von Mikrowellen des Mobilfunks und anderer Systeme der neuen Technologien ist aber z. T. um mehrere Zehnerpotenzen kürzer als die Dauer der meisten physiologischen Prozesse, weshalb ihre direkte Beeinflussung durch diese Felder sehr unwahrscheinlich erscheint.

An nicht linearen Strukturen wie z. B. Zellmembranen können elektromagnetische Felder gleichgerichtet werden. Dabei entstehen niederfrequente Signale, die bei wesentlich niedrigeren Schwellen Effekte erzeugen als es bei der nicht gepulsten hochfrequenten Welle der Fall ist. Von diesem sogenannten Gleichrichtereffekt

wird eine besondere Wirkung der niederfrequent pulsmodulierten Mikrowellen abgeleitet. Die Voraussetzung dafür ist, dass die einzelnen positiven und negativen Halbwellen des elektromagnetischen Feldes einen unterschiedlichen Einfluss auf die im Körper auflaufenden Prozesse haben. Da die Dauer der Halbwellen im Bereich der Mikrowellen wesentlich kürzer ist als die Dauer der biologischen Prozesse, ist die Existenz eines Gleichrichtereffektes für Mikrowellen ebenfalls sehr unwahrscheinlich.

Für eine besondere Wirkung der in den neuen Kommunikationssystemen angewandten niederfrequent gepulsten Mikrowellen auf den Organismus fehlen plausible biophysikalische Mechanismen, die eine Hypothese über nicht thermische Wirkungen dieser Felder im Organismus stützen würden.

2 Fragestellung

Neue Technologien der drahtlosen Kommunikation wie z. B. Mobilfunk im D- und E-Netz, digitale schnurlose Telefone oder drahtlose Übertragungssysteme der Computertechnik (drahtloser Netzwerkzugang WLAN, Bluetooth) halten stürmisch Einzug in das berufliche und private Umfeld. Die genannten Technologien haben folgende gemeinsame Merkmale:

- Es werden hochfrequente elektromagnetische Felder/Wellen im Frequenzbereich zwischen 800 MHz und 5500 MHz, auch als Mikrowellen bezeichnet, genutzt. Hierzu werden diese Felder in unseren Lebensbereichen mehr oder weniger dauerhaft aufgebaut.
- Die verwendeten Mikrowellen weisen eine unterschiedliche niederfrequente Pulsmodulation auf. Diese dient zur Kodierung der übertragenen Informationen mittels Wellenpaketen.
- Die Stärke der Mikrowellen nimmt grundsätzlich mit dem Abstand von der Antenne ab.

Diese Art von Mikrowellen stellt keine gänzlich neue Qualität der Exposition durch elektromagnetische Felder dar. Bereits seit vielen Jahrzehnten ist die Bevölkerung Mikrowellen von Fernsehsendern ausgesetzt, deren Feldstärke ebenfalls schnell variiert.

Die niederfrequent gepulsten Mikrowellen werden unter dem Begriff „Elektrosmog“ gelegentlich mit subjektiven Beschwerden oder sogar mit Erkrankungen wie Herzinfarkt, Fehl- und Totgeburten oder Krebs in Verbindung gebracht. Als Grund für diese vermeintliche Gefährdung wird pauschal und meist ohne nähere Konkretisierung angeführt, die niederfrequent pulsmodulierten Mikrowellen seien im Organismus besonders wirksam.

Die Bestätigung oder Ablehnung dieser Meinung aufgrund der bisher durchgeführten biologisch-medizinischen Experimente ist nicht Gegenstand dieser Abhandlung. Vielmehr wird versucht, die Behauptung besonderer Wirksamkeit der niederfrequent gepulsten Mikrowellen im Körper mit Hilfe belegter und verstandener

physikalischer und physiologischer Effekte zu hinterfragen. Argumente und Widersprüche sollen allgemein verständlich dargestellt werden.

Dabei müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wirken pulsmodulierte hochfrequente Felder im Körper anders als nicht modulierte?
- Wenn ja, trifft dies auch auf Mikrowellen zu?

3 Physikalische Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder im Gewebe

Elektromagnetische Felder wirken im Körper mit ihrer elektrischen und magnetischen Feldkomponente nach unterschiedlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Bei der Betrachtung möglicher physikalischer Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder im Körper muss von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Körpermaterie ausgegangen werden. Der Körper besteht zu rund 60 % aus Wasser. Darin sind zahlreiche, unterschiedlich große Atome, Moleküle und Zellen (**Bild 1**, rechts) frei beweglich, oder sie werden in einem Gewebeverband zusammen gehalten. Sie tragen nach außen keine elektrische Ladung und werden deshalb als elektrisch neutral bezeichnet.

Daneben sind in den Körperflüssigkeiten viele verschiedene Mineralien gelöst, die in

positive (+) wie auch negative (-) frei bewegliche Ladungsträger, die als Ionen bezeichnet werden, zerfallen. Elektrische Felder üben nur auf diese Ladungsträger eine Kraft aus: hierbei findet eine Energieübertragung vom elektrischen Feld auf die Ladungsträger statt. Konzentration und Beweglichkeit der Ladungsträger bestimmen die elektrische Leitfähigkeit und damit auch den Strom in einzelnen Geweben und Körperflüssigkeiten beim Anlegen einer Spannung.

Bei genauer physikalischer Betrachtung weist der Körper lokal auch zahlreiche Teilchen auf, die sich wie elementare Magnete verhalten. Auf diese Teilchen übt das Magnetfeld Kräfte aus, wobei ebenfalls Energie vom Feld auf diese Teilchen übertragen wird. Diese magnetischen Materialeigenschaften finden sich bei einigen Atomkernen mit einer ungeraden Anzahl von Protonen

oder Elektronen, die für eine kurze Zeit von Atomen abgespalten wurden.

Nur starke Magnetfelder, die im Alltag nicht vorkommen, können auf diese Partikel eine Kraft ausüben, die mit vorhandenen Kräften konkurrieren kann. Die Kernspintomografie, ein bildgebendes medizinisches Verfahren mit mehreren genau abgestimmten starken Magnetfeldern, nutzt z. B. die Kraftwirkung und Energieübertragung auf die elementaren Magnete einiger Atomarten im Körper. Elektrische oder magnetische Felder üben Kraft nur auf die Ionen bzw. auf die elementaren Magnete aus.

Bild 2 veranschaulicht exemplarisch die Kraftwirkung und Energieübertragung auf die Ionen in elektrischen Feldern. In elektrischen Wechselfeldern, z. B. mit einem sinusförmigen Verlauf (a), führen Halbwellen mit unterschiedlicher Polarität (positiv und negativ) zur Bewegung der Ladungsträger (b) in eine Richtung (negative Ionen) oder in die Gegenrichtung (positive Ionen). Die Amplitude der Auslenkung ist proportional zur Stärke des Feldes (b). Nach Abklingen des Feldes stellt sich die Ausgangslage des Ladungsträgers wieder ein. Es findet also kein Transport des Ladungsträgers statt, die Ladungsträger schwingen nur um ihre Ausgangslage hin und her.

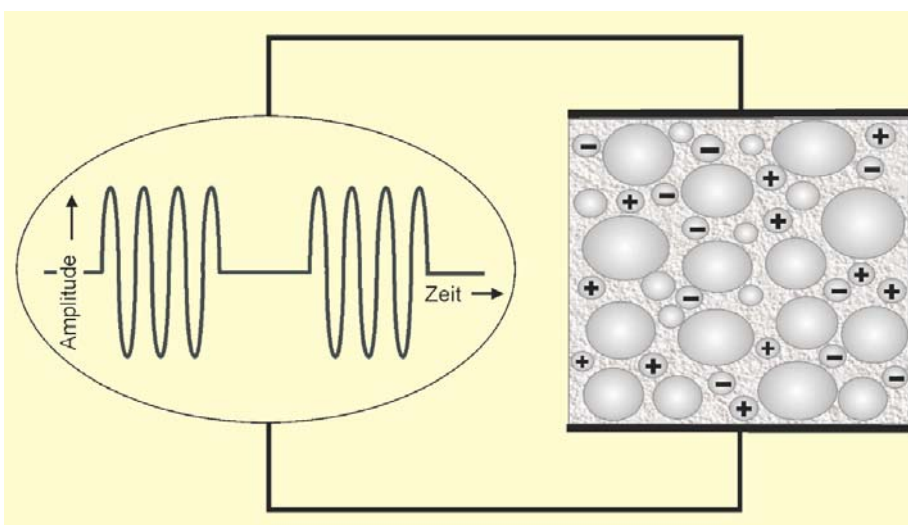


Bild 1: Körpermaterie, bestehend aus Atomen, Wassermolekülen, Ladungsträgern (positive Ladung +, negative Ladung -) und Zellen im elektrischen Wechselfeld

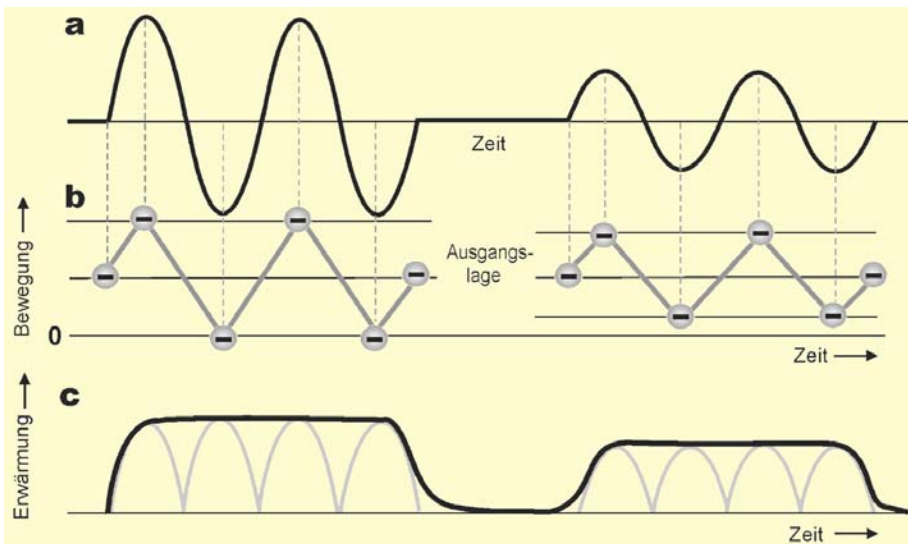


Bild 2: Schwingung negativer Ionen (b) im sinusförmigen elektrischen Feld (a), die zur Erwärmung des Mediums (c) führt. Schematische Darstellung der Vorgänge im zeitlichen Verlauf

Die Amplitude der Schwingungen steigt mit der Feldstärke des einwirkenden Feldes, hängt aber in komplexer Weise von der Frequenz des Feldes sowie den physikalischen Materialeigenschaften des jeweiligen Gewebes ab. Eine besondere Situation entsteht, wenn bei einem Resonanzsystem die Resonanzfrequenz mit

der Frequenz des Feldes übereinstimmt. Bei dieser Übereinstimmung nimmt das System vom Feld die maximale Energie auf und zeigt die stärkste Reaktion. Schwingungen oder Rotationen von Teilchen mit einer elektrischen Ladung oder einem magnetischem Moment im elektromagnetischen Feld sind primär physikalische

Vorgänge, die bis auf eine Erwärmung in der Regel keine biologische oder pathologische Konsequenz haben.

Während die Ionen im betrachteten Beispiel (Bild 2) in beide Richtungen schwingen, „reiben“ sie an den umgebenden Atomen und Molekülen oder aneinander. Unabhängig von der Bewegungsrichtung führt diese Reibung zur Erwärmung des Gewebes (2 c). Der Verlauf der Erwärmung hat die Form einer umhüllenden des gleichgerichteten Feldes. Demnach hängt die Erwärmung von Gewebe im elektrischen Wechselfeld von der Konzentration und Beweglichkeit der positiven und negativen Ionen im betrachteten Körperareal sowie von der Amplitude, Frequenz und Ausrichtung des Feldes an diesem Ort ab. Da die meisten biologischen Prozesse temperaturabhängig sind, werden sie durch den von Mikrowellen induzierten Temperaturanstieg beeinflusst.

4 Wirkungsmechanismen an ionenselektiven Membranen

Die im vorherigen Abschnitt veranschaulichte Darstellung des elektrischen Volumenleiters trifft für Körperareale zu, in denen Ionen sich frei bewegen können. Diese Bedingung ist im Körper weitgehend erfüllt außerhalb der vielen Milliarden Zellen. Die Zellen weisen eine Zellmembran auf, die die intrazellulären Inhalte vom extrazellulären Bereich trennt. Sie ist mit Kanälen ausgestattet, die überwiegend ionenselektiv sind und die jeweiligen Ionen nur bei bestimmten Zuständen der Zellmembran in eine Richtung passieren lassen. In den Zellen befinden sich kleinere Organellen, die ebenfalls von Membranen umgeben sind und deren Inhalte dadurch von der intrazellulären Flüssigkeit separiert werden.

Die Membranen sind allgemein die wichtigsten Katalysatoren unterschiedlicher Transporte und Reaktionen in den Zellen. Wird die Zelle einem sinusförmigen elektrischen Feld ausgesetzt, können die positiven und negativen Halbwellen sehr unterschiedliche Auswirkungen auf den Ionentransport durch die Membran haben. Es wird hierbei von einem nichtlinearen Vorgang gesprochen.

In **Bild 3** ist ein derartiger Vorgang schematisch am Beispiel einer erregbaren Nerven- oder Muskelzelle (b) unter Berücksichtigung nur einer von vielen Arten von Ionen dargestellt.

Positive Natrium-Ionen, die extrazellulär zahlreich und intrazellulär sehr schwach vertreten sind, werden mit der Kraft jeder

negativen Halbwelle durch die spezifischen Natrium-Kanäle in der Zellmembran in die Zelle gebracht. Jedes positive Ion erhöht die negative Ruhespannung der Zelle (3 c), bis es nach dem Erreichen der Reizschwelle zu einer selbständig ablaufenden Erregung der Zelle kommt.

Auf diese Weise können mit sinusförmigen, von außen einwirkenden elektrischen Feldern Nerven und Muskeln erregt und Prozesse der Informationsverarbeitung und -übertragung beeinflusst werden.

Die überschwellige Erregung wird nicht mit einer Halbwelle eingeleitet, sondern viele negative unterschwellige Halbwellen tragen zum Erreichen der Erregungsschwelle bei. Je mehr Halbperioden in einem bestimmten Intervall einwirken, desto kleiner kann die Amplitude einzelner Halbwellen zur

Einleitung der fortgeleiteten Erregung ausfallen.

Bei pulsmodulierten Sinuswellen (Bild 4 a) ist der wirksame Reiz durch die Umhüllende der negativen Wellen gegeben (4 b, orange Linie). Deren Frequenz ist im Normalfall wesentlich niedriger als die der Sinuswelle selbst.

Die Frequenz der niederfrequenten Umhüllenden kann im Bereich der maximalen Empfindlichkeit einer Zelle (40 bis 250 Hz, siehe **Bild 5**) liegen und damit eine wesentlich niedrigere Reizschwelle als die hochfrequentere Grundschwingung aufweisen. Dieser Vorgang kann auch als Demodulation oder einseitige Gleichrichtung der niederfrequent pulsmodulierten sinusförmigen Welle in der Zellmembran verstanden werden. Die Existenz derartiger Gleichrichtereffekte für elektrische Wechselfelder

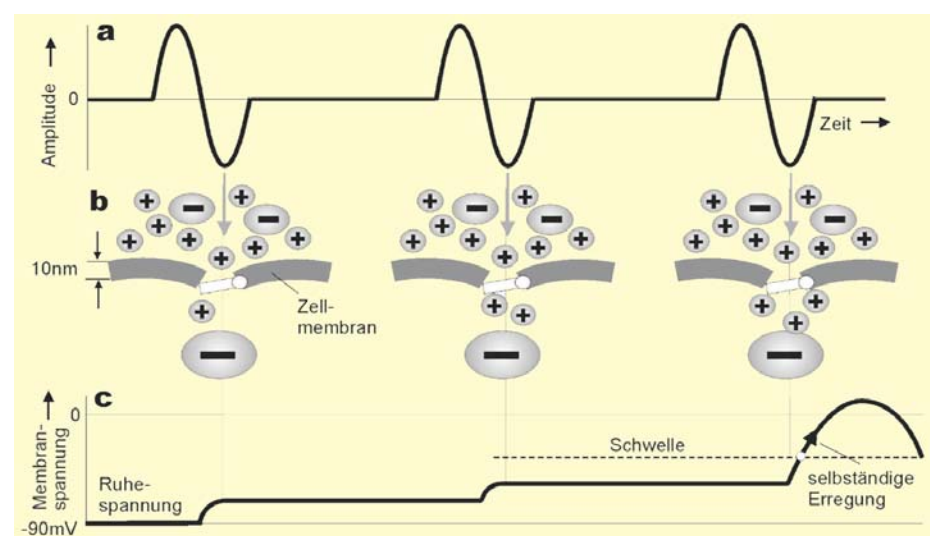


Bild 3: Nur die negative Halbwelle bewirkt, dass positive Ionen die Membran passieren und die Ruhespannung schrittweise bis zur Schwelle einer Erregung erhöhen.

in biologischen Membranen ist experimentell bis zu einer Frequenz der Sinuswelle von einigen Megahertz (MHz) nachgewiesen.

Ein derartiges nichtlineares Verhalten von Zellmembranen im elektrischen Feld lässt sich auch für eine Reihe elektrophysiologischer Vorgänge oder auch für Einwirkungen magnetischer Wechselfelder auf elementare atomare Partikel mit magnetischem Moment konstruieren. Diese Aussage stützt zunächst die Hypothese, dass niederfrequent modulierte hochfrequente Felder (maximal wenige MHz) im Körper demoduliert werden und ihre Umhüllende eine empfindlichere Beeinflussung des Organismus verursachen kann als die hochfrequente Sinuswelle mit einer konstanten Amplitude ohne Pulsmodulation.

Die Frage ist, ob und in wie weit die Ladungsträger im Gewebe auch den sehr raschen Schwingungen (Frequenzen oberhalb 900 MHz) der hier im Vordergrund stehenden Mikrowellen des Mobilfunks folgen und an biologischen Strukturen wie z. B. der Zellmembran ähnliche Effekte wie die oben beschriebenen auftreten können. Nur auf diese Weise könnte die niederfrequent modulierte Signalform der pulsmodulierten Mikrowellen im Körper zur Wirkung kommen. Dieser Frage wird im nächsten Abschnitt nachgegangen.

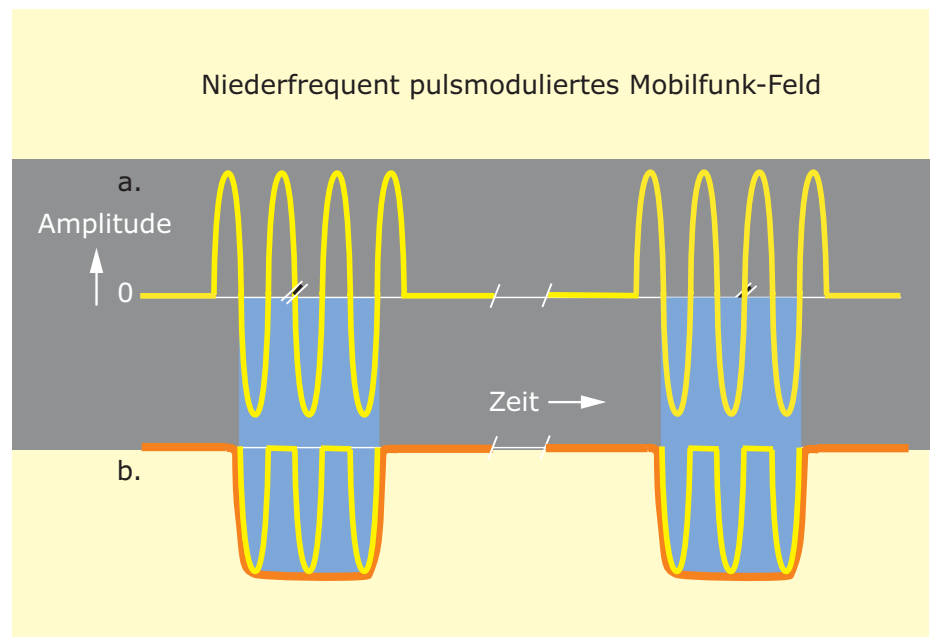


Bild 4: An Zellmembranen von Nerven und Muskeln kann bei Anwesenheit pulsmodulierter Sinuswellen eines elektrischen Feldes (a) die Umhüllende der negativen Halbwellen (b, orange Linie) wirksam werden.

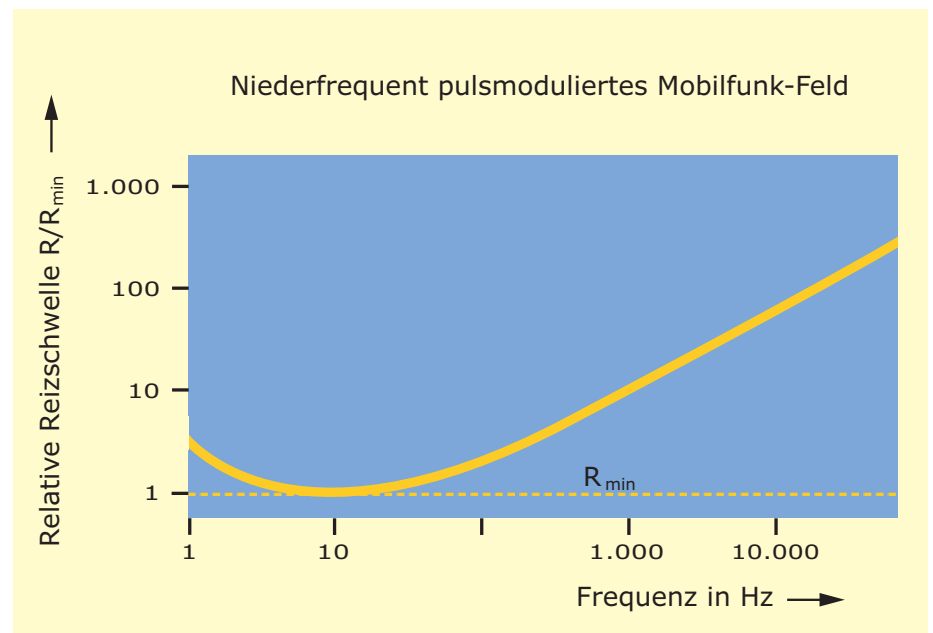


Bild 5: Die Reizschwelle von Nerven und Muskeln im elektrischen niederfrequenten Feld ist frequenzabhängig und sie zeigt ein Minimum.

5 Frequenzabhängigkeit elektromagnetischer Kraftwirkungen

Mit zunehmender Frequenz nimmt die Periodendauer elektromagnetischer Wellen ab; die Zeit, in der die positiven und negativen Halbwellen die Ladungsträger oder elementare Magnete in die eine oder die entgegen gesetzte Richtung treiben, wird immer kürzer. Dem gegenüber steht die relativ hohe Trägheit der Partikel im Gewebe. Aus diesem Grund wird die Schwingungsamplitude der Ladungsträger mit zunehmender Frequenz des einwirkenden Feldes immer kleiner. Die Trägheit der Bewegung von Ladungsträgern und der zu überbrückende Abstand bestimmen maßgeblich die Dauer unterschiedlicher biologischer Reaktionen im Körper. Das **Bild 6** zeigt die Dauer einiger wichtiger Prozesse im Körper.

Biologische Prozesse können durch die Kraftwirkung elektromagnetischer Felder nicht-thermisch nur dann beeinflusst werden, wenn

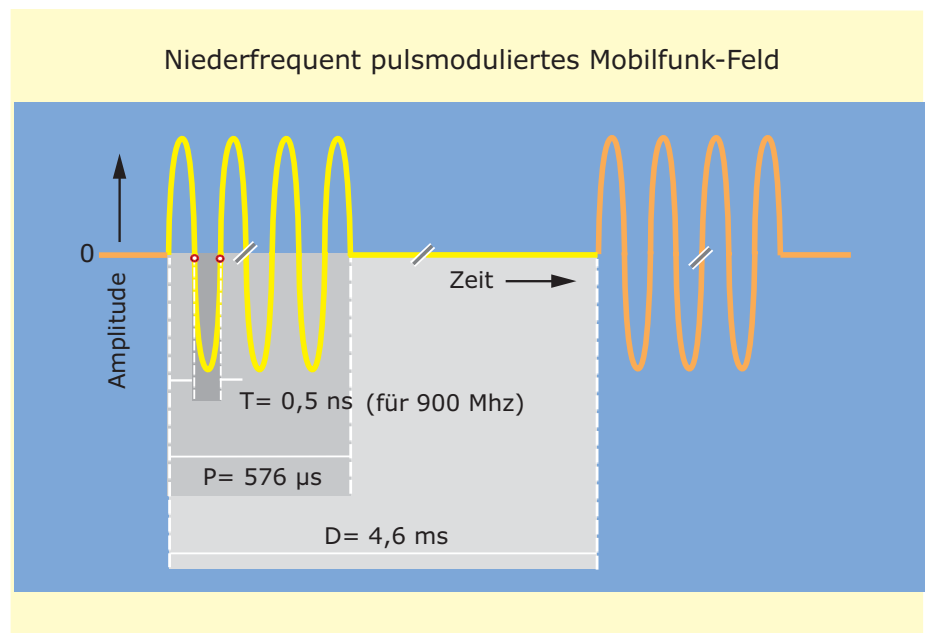


Bild 7: Typische zeitliche Abläufe der niederfrequent gepulsten Mikrowellen des Mobilfunks im D-Netz

- die Halbperiodendauer T größer als oder vergleichbar mit der Dauer des biologischen Prozesses ist und
- eine ausreichende, eventuell Schwellen überschreitende Kraft auftritt, d. h. eine ausreichende Stärke des Feldes einwirkt.

Bild 7 zeigt den typischen Zeitverlauf eines GSM-Mobilfunksignals bei einer Erregung von 900 MHz. Bei anderen neuen Technologien ist die Periodendauer noch geringer.

Im Vergleich zur Dauer der biologischen Reaktionen in Bild 6 ist die Halbperiodendauer der Mikrowelle z. T. um viele Zehnerpotenzen kürzer. Aus diesem Grund ist eine Beeinflussung der biologischen Reaktionen durch nichtthermische Wirkungsmechanismen der betrachteten Mikrowelle sehr unwahrscheinlich.

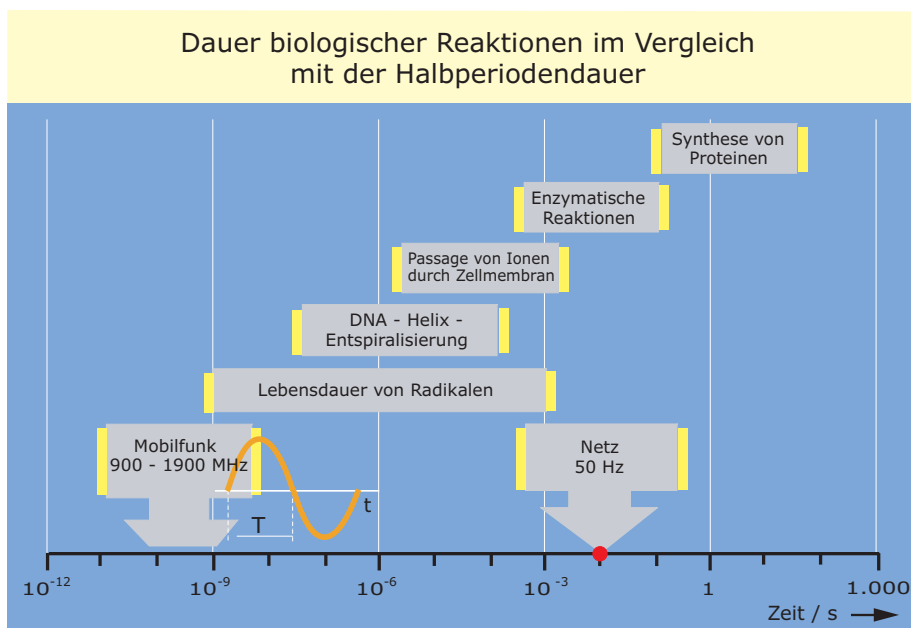


Bild 6: Dauer von biologischen Prozessen im Vergleich zur Halbperiodendauer T einwirkender Felder des Mobilfunks und der Netzversorgung