

# Wie magnetische Felder das Nervensystem beeinflussen und was das für den Arbeitsschutz bedeutet

Dr. Florian Soyka, Dr. Sabine Werner, Dr. Carsten Alteköster und Ingo Bömmels

Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e. V. (DGUV)  
Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin

## Zusammenfassung

Aufgrund der zunehmenden Anwendung von elektrisch betriebenen Geräten, Maschinen und Anlagen wird die Bewertung der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (EMF) im beruflichen Umfeld immer wichtiger. Da Menschen keine speziellen Rezeptoren für EMF haben und sie die Felder, wenn überhaupt, nur indirekt wahrnehmen können, sind die Feldstärken am Arbeitsplatz und ihre Wirkungen oft nicht bekannt oder mit Unsicherheiten verbunden. In diesem Artikel wird anhand eines technischen Beispiels erläutert, wie magnetische Felder im Arbeitsschutz bewertet werden. Dazu werden neurobiologische Grundlagen der Wirkungsweisen dieser Felder auf den Menschen dargestellt, um zu vermitteln, wie sich die Grenzwerte herleiten und wie Beschäftigte effektiv vor gesundheitlichen Auswirkungen geschützt werden können.

**Schlagerworte:** Arbeitsschutz, Aktionspotenzial, elektromagnetische Felder, Grenzwerte

## Abstract

The safety evaluation of electromagnetic fields (EMFs) in an occupational context is becoming increasingly important owing to the rising application of electrically powered equipment, machines and plants. Since humans do not have specific receptors for EMFs, they can perceive them only indirectly, if at all. The presence of electromagnetic fields and their effects are therefore often unknown or uncertain. This article uses a technical example to illustrate how magnetic fields are evaluated in terms of occupational safety. To this end, neurobiological principles concerning the effects of EMFs on humans are introduced in order to explain how exposure limits are derived and how employees can be protected effectively against adverse health effects.

**Keywords:** Occupational safety, action potential, electromagnetic fields, exposure limits

## 1 Elektromagnetische Felder und ihre Wirkungen

Was sind elektromagnetische Felder und wie entstehen sie? Überall dort, wo eine elektrische Spannung anliegt, ist ein elektrisches Feld vorhanden und jeder elektrische Stromfluss bedingt ein magnetisches Feld. Die elektrische Feldstärke  $\vec{E}(\vec{x}, t)$  und die magnetische Flussdichte<sup>1</sup>  $\vec{B}(\vec{x}, t)$  beschreiben die vektorielle Größe der Felder am räumlichen Punkt  $\vec{x}$  zur Zeit  $t$  und sind über die Maxwell-Gleichungen verknüpft. Es wird zwischen zeitlich-unveränderlichen, statischen Feldern und zeitabhängigen Feldern unterschieden. Im Arbeitsschutz wird gemäß der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV) der Bereich zwischen 0 und 300 GHz bewertet (EMFV 2016). Je nach Frequenz haben die Felder unterschiedliche Wirkungen auf den Menschen (► Abb. 1). In diesem Artikel wird die

Reizwirkung durch magnetische Felder mit Frequenzen bis 10 MHz im Detail erläutert. Neben der Reizwirkung gibt es noch die Kraftwirkung statischer Felder und die Wärmewirkung von Feldern zwischen 100 kHz und 300 GHz, welche z. B. im EMF-Portal<sup>2</sup> oder im nicht verbindlichen Leitfaden der EU zum Thema EMF (Europäische Kommission 2014) näher beschrieben sind.

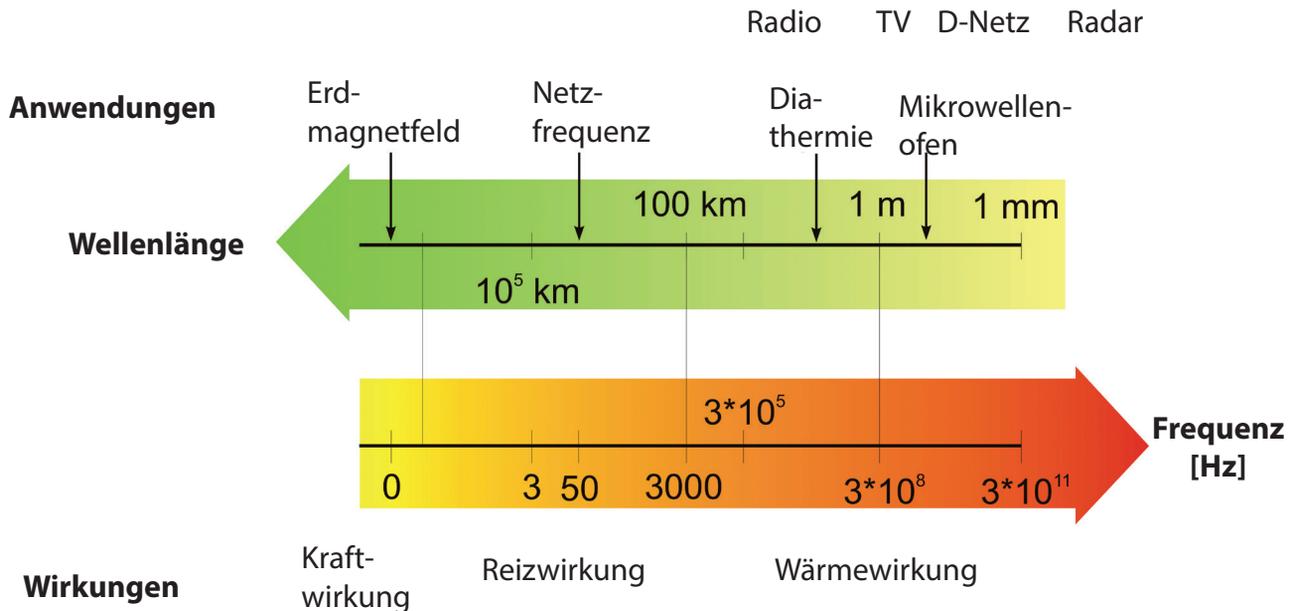
Über diese bekannten, frequenzabhängigen Wirkungen hinaus werden weitere gesundheitlich relevante Wirkungen,

<sup>2</sup> <https://www.emf-portal.org/>

### Korrespondenzadresse:

Dr. Florian Soyka  
Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA),  
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)  
Alte Heerstraße 111  
53757 Sankt Augustin  
E-Mail: [florian.soyka\(at\)dguv.de](mailto:florian.soyka(at)dguv.de)

<sup>1</sup> Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  ist über die magnetische Permeabilität  $\mu$  mit der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  verknüpft:  $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ . Die Permeabilität ist eine Materialeigenschaft, welche die Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder beschreibt. Umgangssprachlich wird oft vereinfacht nur von der magnetischen Feldstärke gesprochen, auch wenn eigentlich die Flussdichte gemeint ist.

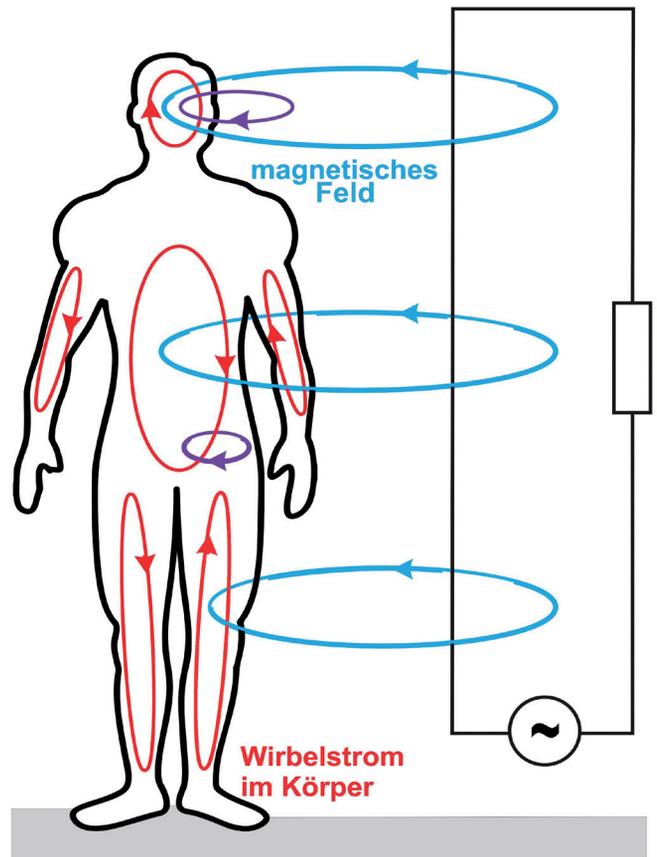


**Abbildung 1:** Frequenzspektrum elektromagnetischer Felder mit Anwendungsbeispielen und Wirkungen. In diesem Artikel wird speziell auf die Reizwirkung magnetischer Felder mit Frequenzen bis 10 MHz eingegangen. Quelle: DGUV-IFA-Report 5/2011

wie z. B. die Entstehung von Tumoren, hormonelle Störungen, neurodegenerative Krankheiten oder schädliche Auswirkungen auf die Fortpflanzung, untersucht. Bislang konnten jedoch keine kausalen Zusammenhänge zwischen EMF (mit Feldstärken unterhalb der Grenzwerte) und den vermuteten Wirkungen nachgewiesen werden (ICNIRP 2010, ICNIRP 2020). Die Wirkungen von EMF sind weiterhin aktiver Bestandteil der Forschung.

Felder mit sinusförmigen zeitlichen Verläufen können anhand ihrer Amplituden und Frequenzen bewertet werden. Diese Bewertung ist in der Regel ausreichend, da viele Geräte, Anlagen und Maschinen durch ihren direkten Anschluss an das Niederspannungsnetz mit seiner 50-Hz-Sinusform betrieben werden. Für nicht-sinusförmige Felder gibt es spezielle Bewertungsmethoden (Soyka 2020a, Soyka 2020b).

Im Folgenden wird ausschließlich die Reizwirkung von magnetischen Feldern auf den menschlichen Körper betrachtet, da diese in der beruflichen Praxis besonders häufig auftreten, zum Beispiel bei elektrisch betriebenen Motoren oder beim Widerstandsschweißen. Im Gegensatz zu elektrischen Feldern durchdringen Magnetfelder den menschlichen Körper nahezu ungehindert. Das bedeutet, dass, wenn ein Mensch sich in einem solchen Magnetfeld aufhält, er körperintern ungefähr dieselbe Magnetfeldstärke erfährt, wie sie auch ohne den Menschen an dieser Stelle auftreten würde. Daher kann die Feldstärke mit einem Messgerät an einem Ort bestimmt werden und davon ausgegangen werden, dass, falls ein Mensch an diesem Ort steht, die gleiche magnetische Feldstärke im Körperinneren auftreten wird. Aufgrund des Faraday'schen Induktionsgesetzes können dann innerhalb



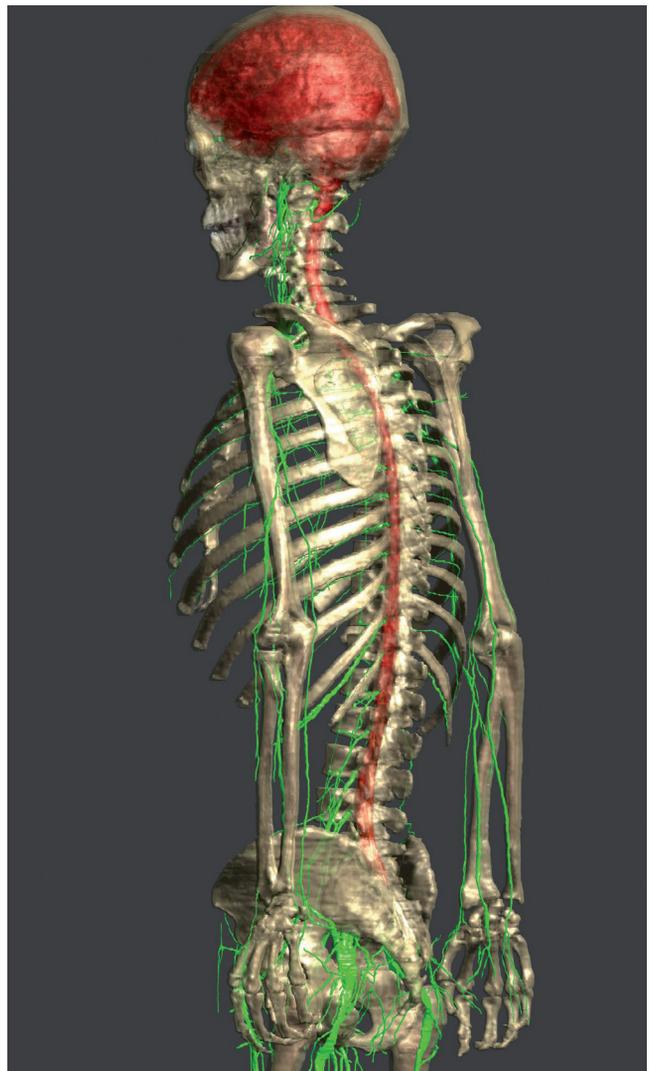
**Abbildung 2:** Ein mit Wechselstrom durchflossener Leiter erzeugt ein niederfrequentes Magnetfeld (blau), welches den Körper durchdringt. Dieses Magnetfeld induziert ein elektrisches Feld im Menschen, das zu Wirbelströmen (rot) im Körper führt. Die Abbildung stellt die Wirbelströme vereinfacht für den Fall dar, dass ein magnetisches Wechselfeld senkrecht auf die Körperachse einwirkt. Quelle: emf-portal.org

des Körpers elektrische Felder durch das Magnetfeld induziert werden (► **Abb. 2**). Diese körperinternen elektrischen Felder können wiederum zu einer Reizung von z. B. Nerven-, Muskel- oder Sinneszellen führen. Vor dieser Reizwirkung, initial ausgelöst durch magnetische Felder, muss am Arbeitsplatz geschützt werden. Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung wird immer die kleinstmögliche körperinterne elektrische Feldstärke, welche bei den ungünstigsten Expositionsbedingungen zu einer Reizung führen könnte, herangezogen und mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Meist tritt die Reizung von Nervenzellen, im Vergleich zu Muskel- oder Sinneszellen, bei geringeren Feldstärken ein und daher wird diese Reizwirkung im Folgenden genauer beschrieben. Es wird erklärt, wie sich daraus die Grenzwerte für körperinterne elektrische Felder und die Auslöseschwellen für magnetische Flussdichten ableiten lassen. Auslöseschwellen sind von den Grenzwerten abgeleitete, magnetische Flussdichten, welche im Gegensatz zu den körperinternen elektrischen Feldstärken direkt, körperextern messtechnisch zugänglich sind. Weiterführende Informationen zu Grenzwerten und Auslöseschwellen können auch in den demnächst erscheinenden Technischen Regeln zur Konkretisierung der EMFV gefunden werden.

## 2 Neurobiologische Grundlagen

Der menschliche Körper ist durchzogen von Nervenbahnen (► **Abb. 3**), welche elektrische Impulse, sogenannte Aktionspotenziale, durch den Körper leiten. Diese Aktionspotenziale sind ein essenzieller Bestandteil der Informationsübertragung und -verarbeitung im Menschen. Sie steuern autonome Funktionen im vegetativen Nervensystem, motorischen Aktionen, kodieren Wahrnehmungen und bilden die Basis für unsere Kognition. Durch die natürliche Veränderung von im Körper erzeugten elektrischen Feldern werden Aktionspotenziale ausgelöst und gesteuert. Kommen nun zusätzliche körperinterne elektrische Felder, bedingt durch Induktion basierend auf – auf den Körper einwirkende – magnetische Felder, hinzu, so kann es bei ausreichend großen Feldstärken zu Beeinflussungen von Aktionspotenzialen kommen. Dies kann, je nach Amplitude und Frequenz der Felder, zur Wahrnehmung von Lichtblitzen (Magnetophosphene) bis hin zu schmerzhaftem Empfinden oder zum Verlust der Muskelkontrolle führen (ICNIRP 2010, Börner et al. 2011). Da im Endeffekt alle bekannten Reizwirkungen direkt auf das Auslösen von Aktionspotenzialen zurückzuführen sind, stellen diese den kleinsten gemeinsamen Nenner der Reizwirkungen dar. Daher ist das Schutzziel, das Auslösen von zusätzlichen Aktionspotenzialen – hervorgerufen durch induzierte, körperinterne elektrische Felder – zu verhindern.

Um die Festlegung der Expositionsgrenzwerte für induzierte, körperinterne elektrische Felder nachvollziehen zu können, benötigt es ein Verständnis der Funktionsweise des Nervensystems. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte grob anhand eines Beispiels skizziert. Die Informa-

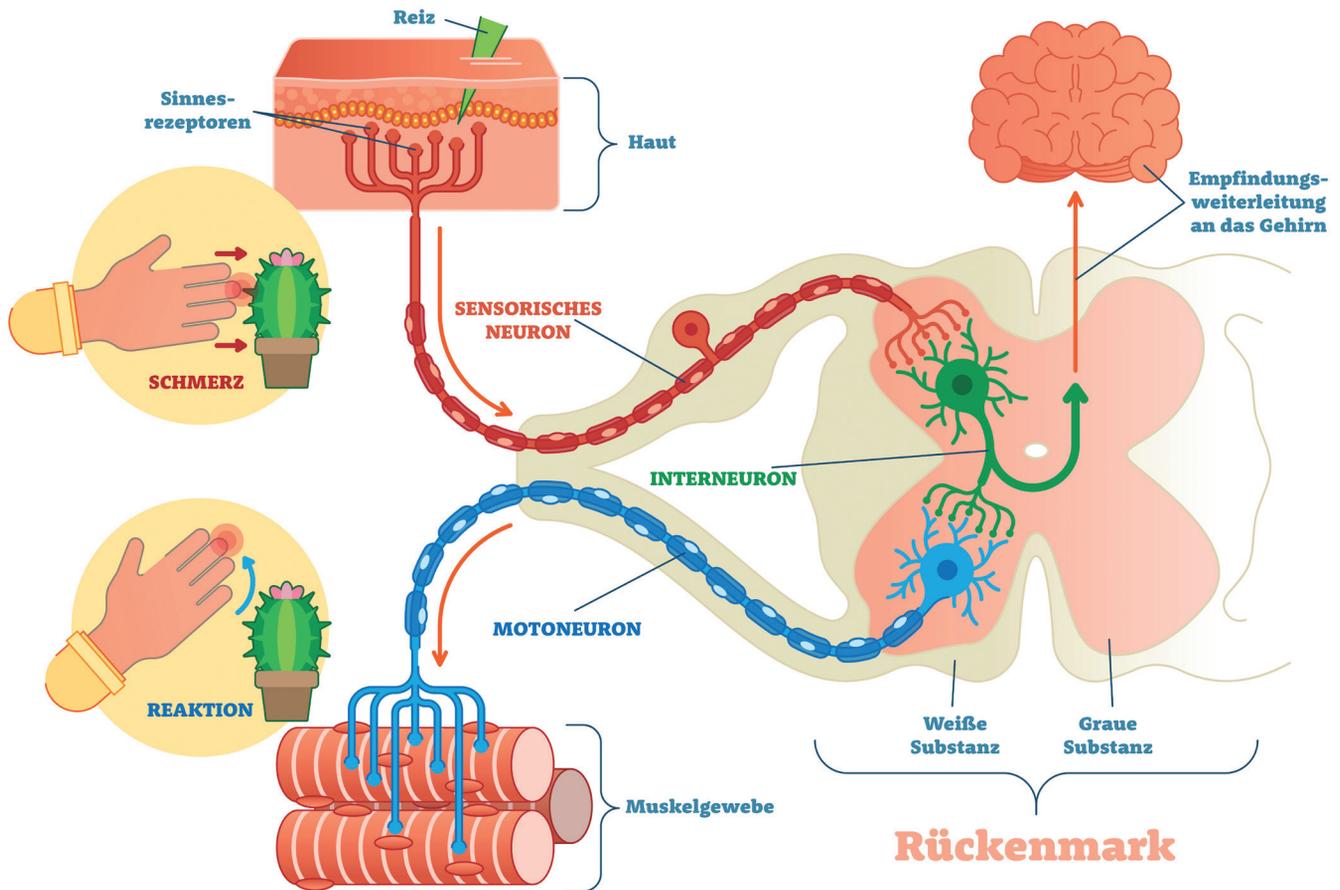


**Abbildung 3:** Schematische Darstellung des zentralen Nervensystems (rot) und des peripheren Nervensystems (grün) anhand eines Menschmodells<sup>3</sup>, welches für computergestützte Simulationen zum Einsatz kommt. Quelle: Alteköster, IFA

tionen zu den neurophysiologischen Grundlagen wurden Standardlehrbüchern der Neurobiologie entnommen (Kandel et al. 2000, Thompson 2001, Bear et al. 2018).

Die Informationsweiterleitung eines Schmerzes, der zum Beispiel durch das Stechen des Fingers an einem Kaktusstachel ausgelöst werden kann (► **Abb. 4**), könnte folgendermaßen über die Nervenbahnen im Körper erfolgen: Die durch Druck und Verletzung ausgelösten Schmerzreize werden in der Fingerkuppe in Nervensignale übersetzt, die über zentralwärts meldende sensorische Nervenbahnen zur „Schaltstelle“ Rückenmark weitergeleitet werden. Dort werden sie zu Signalen weiterverarbeitet, die zum einen

<sup>3</sup> Lloyd B, Cassara A, Farcito S, Neufeld E, Chung BS, Park JS et al. (2018). NEUROMAN: Reference Computational Human Phantoms for Evaluation of Safety Thresholds for Peripheral Nerve Stimulation. In Proc. of the Int. Society for Magnetic Resonance in Medicine (ISMRM) 26



**Abbildung 4:** Vereinfachte Darstellung der Reizweiterleitung im Nervensystem des Menschen am Beispiel des Beugereflexes: Der Stich in den Finger führt zur Aktivierung der Sinnesrezeptoren in der Haut des Fingers und der sensorischer Neuronen. Diese sind über Interneuronen mit dem Rückenmark verschaltet und wirken stark auf Motoneuronen ein, welche die Beugemuskeln aktivieren. Diese Muskeln führen zu einer Beugung im entsprechenden Gelenk und damit zum Zurückziehen des Arms. Diese Reaktion, die zunächst ohne Beteiligung des Gehirns erfolgt, wird als Reflex bezeichnet. Außerdem wird die Reizinformation über weitere Nervenbahnen in das Gehirn gesendet. Hier erfolgt die Umsetzung des Reizes in die Wahrnehmung eines Schmerzes.

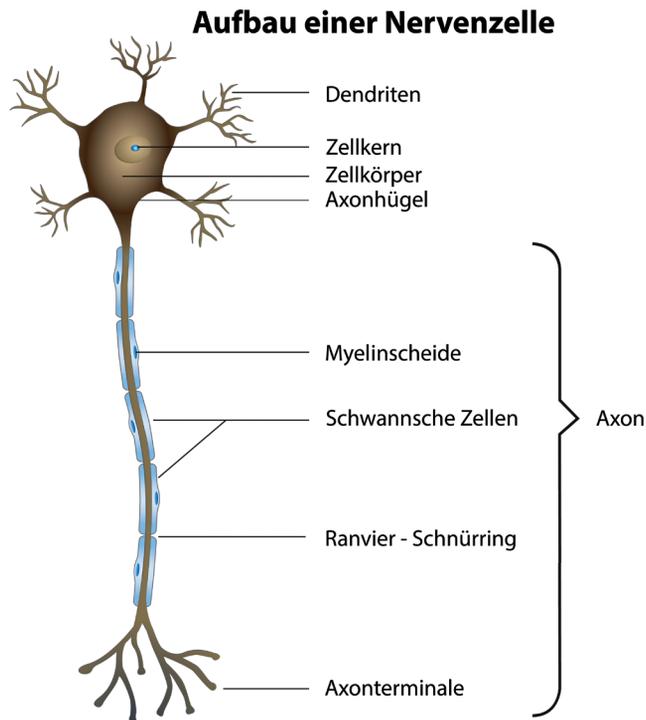
Im Rückenmark bilden die Zellkörper von Neuronen Zellkörperansammlungen, die im inneren Bereich des Rückenmarks liegen (graue Substanz) und von Faserbahnen umgeben sind, die aus den Axonen der Neuronen bestehen (weiße Substanz). Quelle: *VectorMine-stock.adobe.com*

direkt über peripherwärts meldende motorische Nervenbahnen zurück in die Hand geleitet werden und damit das unwillkürliche Zurückziehen der Hand bewirken. Diese direkte Reaktion, die ohne Beteiligung des Gehirns erfolgt, wird als Reflex bezeichnet. Zum anderen wird die Reizinformation über weitere zentralwärts meldende Nervenbahnen in das Gehirn gesendet. Hier erfolgt die Umsetzung dieser Information in die bewusste Wahrnehmung eines Schmerzes.

Dabei sind unterschiedliche Zelltypen involviert. Bestimmte spezialisierte sensorische Rezeptoren in der Haut, z. B. die Vater-Pacini-Körperchen, übertragen den Druckreiz. Schmerzreize werden direkt von freien Nervenzellfortsätzen in der Haut, den sog. Nozirezeptoren, aufgenommen. Die Weiterleitung der Information erfolgt über sogenannte sensorische Neuronen ins Rückenmark und von dort über Interneuronen auf Motoneurone, die die Beugemuskeln aktivieren. Außerdem werden die Signale über weite-

re Nervenbahnen ins Gehirn und dort über den Thalamus in verschiedene Bereiche der Großhirnrinde projiziert und erreichen dort zum Beispiel hirnrindentypische Pyramidenzellen.

Die Nervenzellen kommunizieren miteinander oder mit Muskelzellen über Spannungsänderungen in Form von Aktionspotenzialen (AP). Eine Nervenzelle ist von einer Membran umgeben und besteht aus einem Zellkörper und Zellfortsätzen: dem Axon und den Dendriten (► **Abb. 5**). Die APs werden innerhalb einer Nervenzelle erzeugt, meistens am Axonhügel am Zellkörper und über das Axon bis zu den Axonterminalen weitergeleitet. Die Information wird hierbei durch die Anzahl der Aktionspotenziale pro Sekunde (Frequenz) codiert und nicht durch deren Amplitude, die sich nicht verändert. So erzeugt ein Druck, der beispielsweise durch einen Kaktusstachel ausgelöst wird, einen Reiz, der eine Spannungsänderung an der Membran des Vater-Pacini-Körperchens hervorruft, die oberhalb



**Abbildung 5:** Aufbau einer typischen Nervenzelle (Neuron). Vom Zellkörper gehen viele Zellfortsätze aus, die Axon und Dendriten genannt werden. An jedem Nervenzellkörper entspringt am Axonhügel immer nur ein einziges Axon, das sich auch weiter verzweigen kann. In der Nähe der Zielzellen, wie zum Beispiel anderen Nerven- oder Muskelzellen, spaltet sich das Axon in eine Reihe kleinerer Äste auf, die wiederum in besonderen Verdickungen enden. Diese Axonterminale bilden Synapsen mit anderen Zellen aus. Die Synapse ist der Ort, an dem ein Neuron Information auf eine andere Zelle überträgt. Alle übrigen Fortsätze, die vom Nervenzellkörper ausgehen, werden Dendriten genannt. Die gesamte Nervenzelle ist von einer Zellmembran umgeben. Im Nervensystem des Menschen sind alle dickeren Axone von einer dünnen Hülle oder Scheide aus einer fetthaltigen Substanz namens Myelin eingehüllt. Die Myelinscheiden bildenden Zellen des peripheren Nervensystems heißen Schwannsche Zellen, die des Zentralnervensystems Oligodendrocyten. Die Myelinscheide dient der Axonmembran als Isolator. Ein myelinisiertes Axon kann ein Aktionspotenzial wesentlich schneller weiterleiten als ein nicht-myelinisiertes mit demselben Durchmesser. Die Myelinscheide ist in Abständen von ca. 1–2 Millimeter durch kurze myelinfreie Membranabschnitte unterbrochen, die Ranvier-Schnürringe genannt werden. Quelle: *bilderzweig-stock.adobe.com*

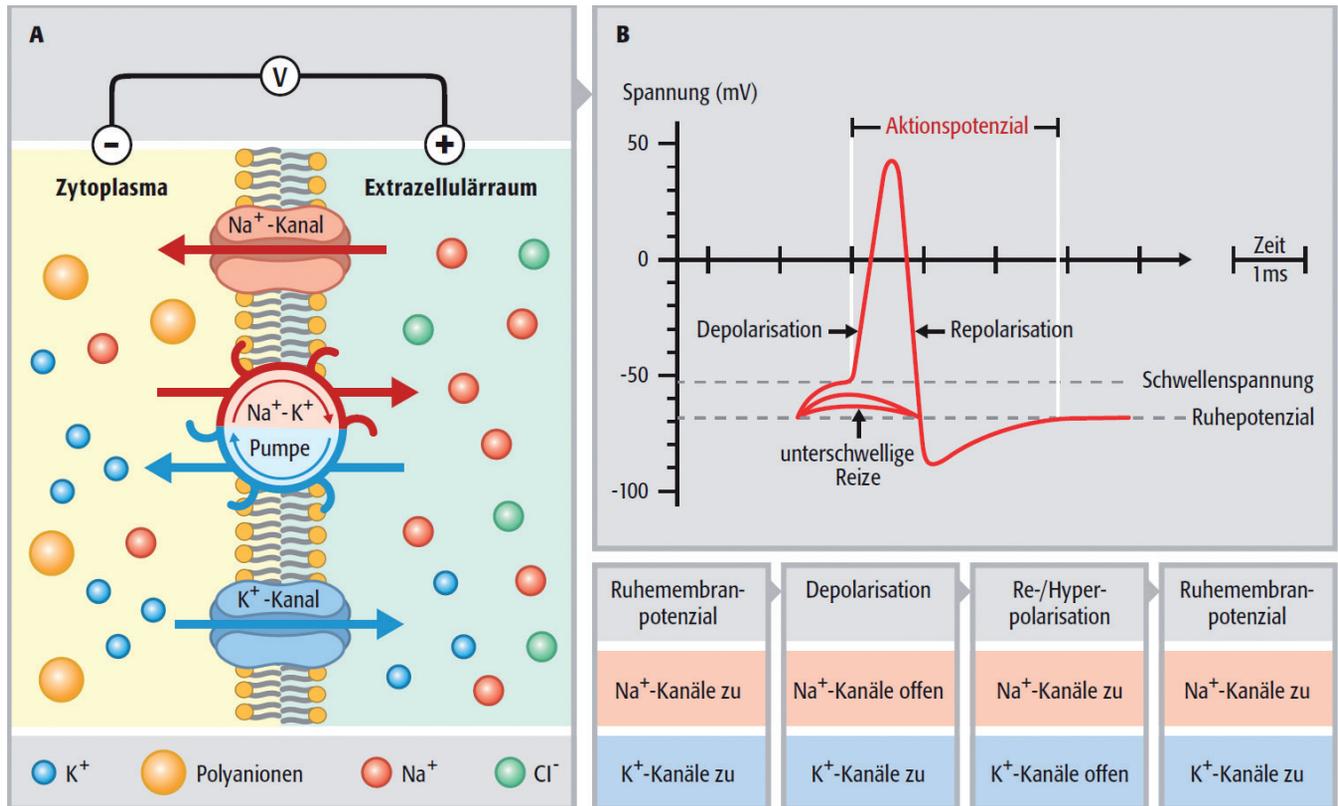
des Schwellenwerts zur Auslösung eines APs liegt. Dementsprechend werden dann Aktionspotenziale ausgelöst und weitergeleitet. Entscheidend für die Weiterleitung solcher Aktionspotenziale sind in der Nervenzellmembran lokalisierte spannungsabhängige Ionenkanäle. Genau an dieser Stelle sind die elektrischen Felder von großer Bedeutung, da sie die über dem Ionenkanal anliegende Spannung und damit dessen Steuerung beeinflussen. Die physiologischen Grundlagen zur Entstehung eines Aktionspotenzials sind in ► **Abb. 6** genauer beschrieben.

Die Übertragung der Information am Ende des Axons an den Axonterminalen auf z. B. eine weitere Nerven- oder

Muskelzelle erfolgt über eine sogenannte Synapse. Diese setzt sich zusammen aus dem Membranabschnitt am Axonterminal, einem Membranabschnitt eines Dendriten oder des Zellkörpers der angrenzenden Zelle und dem extrazellulären Spalt dazwischen, dem synaptischen Spalt. Das ankommende Aktionspotenzial am Axonende bewirkt an der Synapse die Auslösung eines chemischen Signals (Neurotransmitter), das über den Spalt weitergeleitet wird und in der postsynaptischen Zelle wiederum zu einer Spannungsänderung, dem postsynaptischen Potenzial, führt. Die Zielzelle ist dadurch leichter erregbar als vorher. Aber erst wenn ein bestimmter Schwellenwert am Axonhügel überschritten wird, kann dort ein Aktionspotenzial ausgelöst werden. Während eine Muskelzelle nur eine Synapse mit einem Neuron in Form einer synaptischen Endplatte ausbildet, können auf anderen Neuronen Tausende von Synapsen vorkommen, die auf dem Zellkörper oder den Dendriten lokalisiert sind. Dementsprechend führt bereits eine Aktivierung einer neuromuskulären Endplattensynapse zur Kontraktion der Muskelzelle. Im Zentralnervensystem hingegen bedarf es der Zusammenarbeit mehrerer Synapsen, um in einem Gehirnneuron ein Aktionspotenzial auszulösen. Hierbei summieren sich die Wirkungen von Synapsen, die sich an unterschiedlichen Stellen der Nervenzelle befinden (räumliche Summation). Sind nur ein paar Synapsen gemeinsam aktiv, kann dies immer noch nicht ausreichend für die Auslösung eines Aktionspotenzials sein. Werden sie jedoch in genügend schneller Wiederholung aktiviert, dann addieren sich ihre Wirkungen auch über die Zeit auf (zeitliche Summation) und erzeugen so ein postsynaptisches Potenzial, das groß genug ist, um ein Aktionspotenzial auslösen zu können.

Eine Nervenzelle kann die Aktivität eines anderen Neurons oder einer anderen Zielzelle nicht nur steigern, sondern diese auch reduzieren. Sie kann also nicht nur erregend (exzitatorisch), sondern auch hemmend (inhibitorisch) wirken. Eine solche synaptische Hemmung läuft ähnlich wie die zuvor beschriebene synaptische Erregung ab.

Die elektrischen Eigenschaften von Nervenzellen und dementsprechend auch deren Erregbarkeit werden physiologisch durch die Anzahl und Art der Ionenkanäle in der Membran bestimmt, aber auch durch morphologische Merkmale wie Form, Größe, Durchmesser der neuronalen Fortsätze und Ummantelung bzw. Isolierung der Axone mit einer Myelinschicht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Aktionspotenzials hängt vom Durchmesser und den Widerstandseigenschaften des Axons ab. Je dicker ein Axon ist, desto schneller wandert das Aktionspotenzial an ihm entlang. Die dickeren, schneller leitenden Axone sind im Nervensystem des Menschen außerdem meistens von einer fetthaltigen, isolierenden Myelinscheide umgeben. Diese Myelinschicht ist in regelmäßigen Abständen alle 1–2 mm von sogenannten Ranvier-Schnürringen unterbrochen, an denen besonders viele Ionenkanäle konzentriert auftreten und ein schneller Ionenaustausch erfolgen kann (► **Abb. 5**). Ein solcher 2 µm langer myelinfreier Membranabschnitt



**Abbildung 6:** Teil A zeigt die Ionenverteilung an der Innen- und Außenseite der Zellmembran einer Nervenzelle im Ruhezustand. Ionenkanäle, die die Membran durchspannen, bilden Poren, die den Durchtritt von Ionen durch die Membran ermöglichen. Unterschiedliche intra- und extrazelluläre Ionenkonzentrationen führen im Ruhezustand zu einem Spannungsunterschied über der Zellmembran von ungefähr  $-70$  mV. Die negative Ladung der Membranoberfläche beruht im Wesentlichen auf der Anwesenheit negativ geladener Proteinmoleküle. Zur Aufrechterhaltung dieser Ionenverteilung ist eine in der Membran lokalisierte Ionenpumpe aktiv. Diese pumpt stets entgegen dem Konzentrationsgradienten so viel  $Na^+$ -Ionen heraus und  $K^+$ -Ionen hinein, dass deren Konzentrationen innerhalb und außerhalb der Zelle konstant bleiben. Teil B beschreibt die Entstehung eines Aktionspotenzials. Die Angaben beziehen sich auf spannungsabhängige Kanäle. Kommt es zu einer Spannungsänderung oberhalb des Schwellenwertes der spannungsabhängigen Natriumkanäle, führt dies zur Öffnung dieser Kanäle und die Reaktion kann nicht mehr gestoppt werden. Aufgrund dieser von einem Schwellenwert abhängigen Dynamik, bezeichnet man den Vorgang als eine Alles-oder-Nichts-Reaktion. Das AP bewegt sich entlang des Axons, verursacht an den nächsten Ionenkanälen eine überschwellige Spannungsänderung und pflanzt sich so fort. Die Dauer eines APs beträgt zwischen  $1-10$  ms (Kandel et al. 2000). Quelle: © medizillu.de

ist leichter elektrisch reizbar, da die Ladungen sich ausschließlich an diesen Einschnürungen sammeln oder durch die Membran bewegen können. Auf diese Art kann das Aktionspotenzial von Schnürring zu Schnürring springen und verbreitet sich dadurch schneller als bei myelinfreien Axonen. So weisen zum Beispiel die bereits erwähnten Vater-Pacini-Körperchen die dicksten und schnellsten Axone (sogenannte  $A\alpha$ -Axone,  $6-12$   $\mu$ m Durchmesser) mit einem Ursprung in der Haut auf, sodass die eingehende Information schnell mit einer Leitungsgeschwindigkeit eines AP von  $75$  m/s an das Zentralnervensystem kommuniziert werden kann. Für die Vermittlung des Schmerzes, zum Beispiel nach einem Stich am Kaktusstachel, sind sogenannte Nozizeptoren zuständig. Dabei handelt es sich um freie, zweigeteilte Nervenendigungen von dünn myelinisierten ( $A\delta$ -) und nicht-myelinisierten (C-) Nervenfasern. Während die  $A\delta$ -Fasern  $1-5$   $\mu$ m dick sind und eine Leitungsgeschwindigkeit von  $5-30$  m/s aufweisen, beträgt der Durchmesser der myelinfreien C-Fasern weniger als  $1$   $\mu$ m.

Mit einer Leitungsgeschwindigkeit von ca.  $0,5-1$  m/s sind sie die langsamsten Axone, die bekannt sind. Aufgrund der unterschiedlichen Leitungsgeschwindigkeiten der Aktionspotenziale von  $A\delta$ - und C-Fasern zum ZNS werden bei der Aktivierung der Nozizeptoren in der Haut zwei verschiedene Schmerzempfindungen ausgelöst: ein heller, stechender erster Schmerz und ein langsam einsetzender dumpfer zweiter Schmerz.

Mit diesem Basiswissen zur Funktionsweise der Entstehung eines Aktionspotenzials und der damit verbundenen Reizweiterleitung, kann nun die Reizwirkung auf eine Nervenzelle<sup>4</sup> durch ein elektromagnetisches Feld eingehend betrachtet werden. Es wird erläutert, wie die Grenzwerte festgelegt werden und das Vorgehen im Arbeitsschutz wird anhand eines Praxisbeispiels vertieft.

<sup>4</sup> Im Vergleich zu anderen Zellen benötigt es für die Nervenzelle die geringste Feldstärke zur Auslösung eines Aktionspotenzials

### 3 Wechselwirkungen zwischen zeitveränderlichen magnetischen Feldern und dem menschlichen Körper

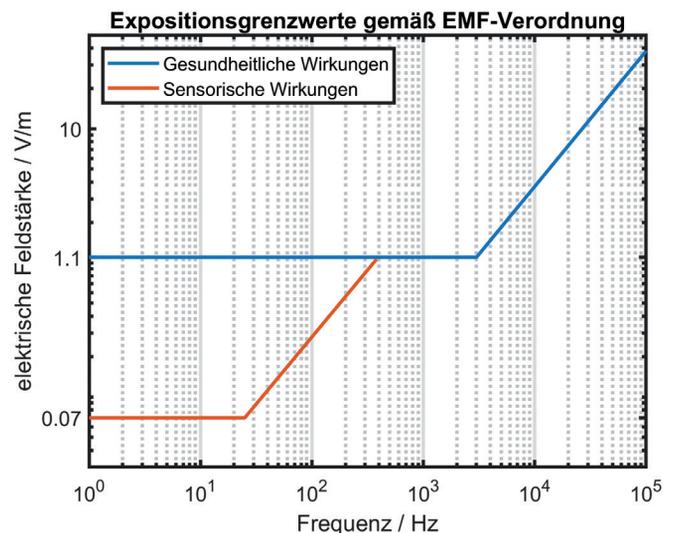
Wie kann ein im Körper induziertes elektrisches Feld Einfluss auf die Aktivität von Nervenzellen nehmen? Hierbei wird zwischen 2 Mechanismen unterschieden: die direkte Auslösung von Aktionspotenzialen und synaptische Effekte. Induzierte elektrische Felder können die Initiation und Weiterleitung von Aktionspotenzialen beeinflussen, indem sie auf die spannungsabhängigen Ionenkanäle in der Nervenzellmembran wirken (Reilly und Diamant 2011). Kommt es bei der Überlagerung der induzierten elektrischen Feldstärke mit der natürlichen Feldstärke an der Membran zu einer Überschreitung des Schwellenwertes, kann ein Aktionspotenzial ausgelöst werden. Dies kann an verschiedenen Stellen des Axons passieren. Am wahrscheinlichsten ist es an Stellen, an denen die Dichte der Ionenkanäle hoch ist, z. B. am Axonhügel, an den Ranvier-Schnürringen oder an Axonterminalen.

Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung werden für den Arbeitsschutz immer die am leichtesten erregbaren Strukturen zugrunde gelegt. Aufgrund des geringen Schwellenwertes zur Auslösung eines Aktionspotenzials sind daher insbesondere dicke, myelinisierte Fasern für die Grenzwertfestlegung von Bedeutung (Börner et al. 2011). Für diese Fasern ergibt sich eine minimale Schwelle für die Nervenreizung, welche je nach Quelle zwischen 5,66 V/m und 6,15 V/m liegt (ICNIRP 2010, Reilly und Diamant 2011). Für die in der EMFV festgelegten Grenzwerte kommt noch ein Sicherheitsfaktor (5 bzw. 5,6) hinzu, sodass im Endeffekt 1,1 V/m zulässig sind (► Abb. 7). Ein weiterer wichtiger Parameter für die Erregbarkeit der Nervenbahnen ist die Frequenz, mit der sich das körperinterne elektrische Feld verändert. Ab einer Frequenz von 3 kHz nimmt die Erregbarkeit mit steigender Frequenz ab, d. h. es benötigt ein stärkeres Feld, um ein Aktionspotenzial auszulösen. Bis zu 3 kHz ist die Erregbarkeit konstant. Dieser Zusammenhang ist nach seinem Entdecker als das Lapicque'sche Gesetz bekannt (Irnich 2010). Hierbei ist anzumerken, dass die in ► Abb. 7 dargestellten Kurven als vereinfachte, einhüllende Kurven zu verstehen sind, welche auf einem Worst-Case-Ansatz basieren, um den bestmöglichen Schutz zu gewährleisten.

Induzierte elektrische Felder können nicht nur direkt Aktionspotenziale auslösen (erster Mechanismus), sie können auch synaptische Effekte hervorrufen. Der zweite Mechanismus basiert auf der synaptischen Integration und kann bereits bei geringeren Feldstärken von ca. 0,07 V/m auftreten (ICNIRP 2010, Reilly u. Diamant 2011). Wie oben beschrieben, können an chemischen Synapsen Signale erzeugt werden, die zu unterschiedlich großen Potenzialen im postsynaptischen Neuron führen können. Die durch mehrere Synapsen auf einem Neuron erzeugten Potenziale summieren sich zu einem Wert auf, der zur Auslösung eines Aktionspotenzials führt oder einem Wert, der unterhalb des Schwellenwertes für die Auslösung liegt, sodass diese

unterbleibt. Diese synaptische Integration ist typisch für die Neuronen des Zentralnervensystems. Die verschiedenen synaptischen Inputs können sich dabei verstärken oder auslöschen. Diese miteinander konkurrierenden Einflüsse werden im postsynaptischen Neuron verrechnet. Durch die Summation reichen potenziell bereits kleine Änderungen an vielen Synapsen aus, um zum Beispiel den Schwellenwert für die Auslösung eines Aktionspotenzials zu überschreiten. Berücksichtigt man außerdem, dass viele Neuronen im Organismus spontan aktiv sind und ständig ihr Membranpotenzial verändern, ist es vorstellbar, dass die Schwelle, bei der Aktionspotenziale durch den Einfluss induzierter körperinterner elektrischer Felder generiert werden, im ZNS niedriger ist als die Schwelle, die für die direkte Stimulation von peripheren Nerven notwendig ist (Saunders u. Jefferys 2007). Daher können im Gegensatz zum ersten Mechanismus aufgrund der Summation bereits kleinere Feldstärken ausreichend sein, um einen Effekt auszulösen.

Es wird angenommen, dass synaptische Effekte durch induzierte elektrische Felder in den Zellen der Retina, im Sehnerv oder im visuellen Kortex des Gehirns auftreten und dass Phänomene wie Magnetophosphene, das Wahrnehmen von irrealen Lichtblitzen im peripheren Sehbereich, darauf zurückzuführen sind. Die Grenzwerte für sensorische Wirkungen sind auch von Untersuchungen zur Beeinflussung der synaptischen Integration durch zusätzliche körperinterne elektrische Felder abgeleitet (► Abb. 7). Die Wahrnehmung von Magnetophosphenen durch Probanden ist bisher der einzige direkte Nachweis des synaptischen Mechanismus. Das Auftreten von Magnetophosphenen ist nicht gesundheitsschädlich und der Effekt endet, sobald sich der Beschäftigte aus dem magnetischen Wechselfeld entfernt.



**Abbildung 7:** Expositionsgrenzwerte für die Spitzenwerte körperinterner elektrischer Feldstärken. Die Grenzwerte für gesundheitliche Wirkungen schützen vor der direkten Auslösung eines Aktionspotenzials. Die Grenzwerte für die sensorischen Wirkungen schützen vor Einflüssen auf die synaptische Integration, welche z. B. zur Wahrnehmung von Magnetophosphenen führen können. Quelle: Soyka, IFA

Daher ist es vertretbar und zulässig, diese Auswirkungen zeitlich begrenzt zu tolerieren (EMF-Richtlinie 2013).

Es gibt noch weitere Mechanismen, wie zum Beispiel die direkte Anregung einer Muskelzelle ohne die vorherige Auslösung eines Aktionspotenzials in einer Nervenzelle, welche aber erst bei höheren Feldstärken auftreten. Daher müssen diese nicht mehr im Detail betrachtet werden, da das Erreichen solcher Feldstärken durch die Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen bereits unzulässig und damit ausgeschlossen ist.

Zusammenfassend kann man sagen: Zeitlich veränderliche magnetische Felder können durch Induktion zusätzliche körperinterne elektrische Felder erzeugen. Dadurch können Aktionspotenziale ausgelöst werden und diese Reizwirkungen können bei hohen Feldstärken bzw. Flussdichten gesundheitliche Auswirkungen haben. Hiervor müssen Beschäftigte geschützt werden.

#### 4 Induktion der elektrischen Feldstärke im Körper

Um im Folgenden die Festlegung der Auslöseschwellen besser verstehen zu können, muss die Abhängigkeit der induzierten körperinternen elektrischen Feldstärke von der vorhandenen magnetischen Flussdichte hergeleitet werden.

Das Faraday'sche Induktionsgesetz besagt, dass eine sich mit der Zeit verändernde magnetische Flussdichte  $\vec{B}(t)$  ein elektrisches Feld  $\vec{E}(t)$  erzeugt:

$$\oint_{\partial F} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_F \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{F}$$

wobei  $F$  eine Integrationsfläche beschreibt,  $\partial F$  den Rand der Fläche mit Wegelement  $d\vec{s}$  und  $d\vec{F}$  das orientierte Flächenelement.

Für eine eindimensionale magnetische Flussdichte, welche sinusförmig mit der Frequenz  $f$  variiert und eine Amplitude  $B$  aufweist:  $B_{sin}(t) = \hat{B} \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ , ergibt sich daher ein induziertes elektrisches Feld, das sich wie folgt verhält:

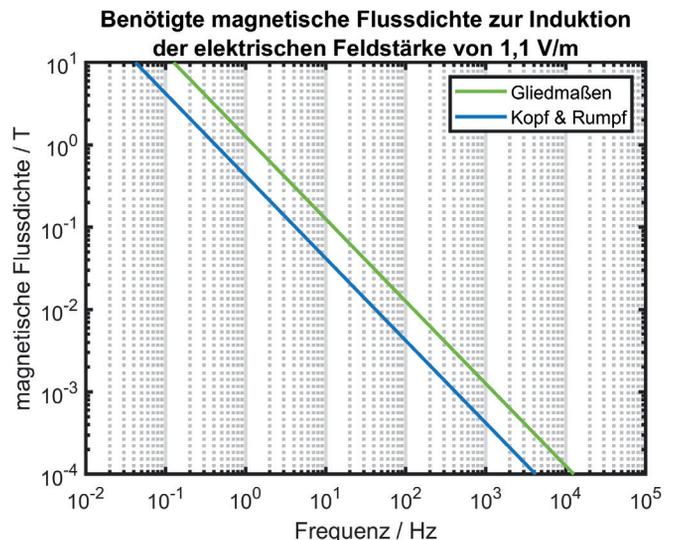
**Gleichung 1:** 
$$E_{ind}(t) = k \cdot \frac{\partial B_{sin}(t)}{\partial t} = k \cdot \hat{B} \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$$

wobei  $k$  einen Induktionsfaktor bezeichnet, welcher von der Integrationsfläche  $F$  abhängt. Daher können später Unterscheidungen in den Auslöseschwellen gemacht werden, abhängig davon, welche Körperteile exponiert sind (► Abb. 8). Bei einer reinen Exposition der Gliedmaßen benötigt es für die Induktion derselben elektrischen Feldstärke eine dreimal so große magnetische Flussdichte im Vergleich zu einer Exposition des Rumpfs, da die Integrationsfläche circa dreimal kleiner ist.

Durch die zeitliche Ableitung von  $B_{sin}(t)$  ist die Größe des induzierten elektrischen Feldes  $E_{ind}(t)$  also direkt proporti-

onal zur Frequenz  $f$  und damit umso größer, je höher die Frequenz ist, mit der sich die magnetische Flussdichte  $B_{sin}(t)$  ändert. Oder anders ausgedrückt, bei einem Magnetfeld mit höherer Frequenz reicht bereits eine kleinere Amplitude  $\hat{B}$  aus, um eine bestimmte körperinterne elektrische Feldstärke  $E_{ind}$  zu induzieren (► Abb. 8). Dieser wichtige Zusammenhang findet sich bei der Festlegung der Auslöseschwellen im nächsten Abschnitt wieder.

An dieser Stelle kommt ein weiterer Sicherheitsfaktor hinzu. Der oben beschriebene Induktionsfaktor  $k$  kann mit Hilfe von anatomischen Körpermodellen und Computersimulationen berechnet werden. Für die ungünstigsten Expositionsbedingungen ergibt sich ein Faktor von  $0,164 \frac{V/m}{T/s}$  (Reilly und Diamant 2011). Die in ► Abb. 8 dargestellte benötigte magnetische Flussdichte zur Induktion von  $1,1 \text{ V/m}$  ist um ca. einen Faktor 2,6 kleiner als die benötigte Flussdichte, welche man mit  $k = 0,164 \frac{V/m}{T/s}$  erhalten würde. Das heißt, es wird angenommen, dass es bereits bei geringeren magnetischen Flussdichten zur Induktion der elektrischen Feldstärke kommt, welche zur Auslösung eines Aktionspotenzials benötigt wird (► Abb. 7), wobei zu beachten ist, dass auf diese elektrische Feldstärke auch bereits ein Sicherheitsfaktor von 5 für den Expositionsgrenzwert aufgeschlagen wurde. Zusammen ergibt sich also ein Sicherheitsfaktor von  $5 \cdot 2,6 = 13$  bei den Auslöseschwellen.



**Abbildung 8:** Darstellung der Körperteil- und Frequenzabhängigkeit der magnetischen Flussdichte, die benötigt wird, um eine elektrische Feldstärke von  $1,1 \text{ V/m}$  (der Expositionsgrenzwert für gesundheitliche Wirkungen bis  $3 \text{ kHz}$ ) zu induzieren. Für die Gliedmaßen benötigt es dreimal höhere magnetische Flussdichten und generell reicht bei höheren Frequenzen bereits eine geringere magnetische Flussdichte aus. Die genauen Zahlenwerte werden mittels detaillierter, anatomischer Körpermodelle für ungünstigste Expositionsbedingungen bestimmt und mit einem weiteren Sicherheitsfaktor von ca. 2,6 aufgeschlagen. Quelle: Soyka, IFA

## 5 Auslöseschwellen

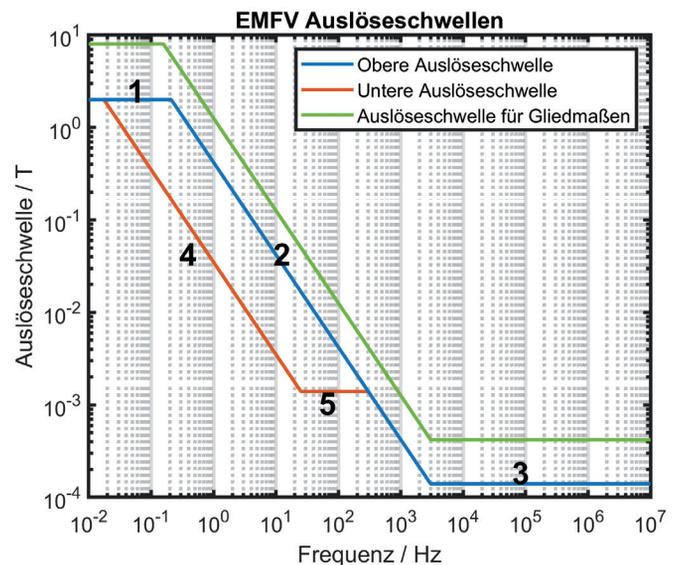
Mit den erarbeiteten Wirkungsweisen der niederfrequenten magnetischen Felder können nun die Auslöseschwellen, wie sie in der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV) festgelegt sind, erklärt werden. Magnetfelder durchdringen den menschlichen Körper ungehindert und können elektrische Felder im Körperinneren induzieren. Diese elektrischen Feldstärken müssen so begrenzt werden, dass sie keine Aktionspotenziale auslösen können (siehe Abschnitt 3).

In der EMFV gibt es drei Arten von Auslöseschwellen, welche als Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte in Tesla für zeitlich sinusförmige Verläufe gegeben sind: Erstens, eine obere Auslöseschwelle, welche die Beschäftigten bei einer Ganzkörperexposition vor gesundheitlichen Auswirkungen schützt. Zweitens, eine untere Auslöseschwelle, welche zusätzlich noch vor unter bestimmten Bedingungen zulässigen sensorischen Auswirkungen schützt und daher niedriger liegt als die obere Auslöseschwelle. Und drittens, eine Auslöseschwelle für die Teilkörperexposition von Gliedmaßen, welche die höchsten zulässigen Werte aufweist, da, wie oben erläutert, die Induktionswirkung bei Gliedmaßen geringer ist. Alle drei Auslöseschwellen sind abhängig von der Frequenz, mit der sich das magnetische Feld ändert. In ► Abb. 9 sind die Auslöseschwellen mit ihrer Frequenzabhängigkeit dargestellt. Im Folgenden wird erläutert, wie sich diese Auslöseschwellen aus den in ► Abb. 7 und ► Abb. 8 beschriebenen Effekten herleiten lassen.

Als Erstes wird die obere Auslöseschwelle betrachtet. Für  $0,21 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$  nimmt die Auslöseschwelle mit ansteigender Frequenz ab (Bereich 2 in ► Abb. 9). Dies ist durch die ansteigende maximal induzierte körperinterne elektrische Feldstärke mit steigender Frequenz des anregenden Magnetfeldes zu erklären (Gleichung 1). Da die Erregbarkeit für gesundheitliche Wirkungen in diesem Frequenzbereich konstant ist (► Abb. 7), reichen also mit steigender Frequenz des anregenden Magnetfeldes immer geringere Amplituden aus, um ein Aktionspotenzial auszulösen (► Abb. 8). Daher nimmt die Auslöseschwelle mit der Frequenz ab. Für  $f \geq 3 \text{ kHz}$  kommt der Effekt des Lapicque'schen Gesetzes hinzu: die Erregbarkeit nimmt mit steigender Frequenz ab und es braucht eine größere induzierte Feldstärke, um ein Aktionspotenzial auszulösen (► Abb. 7). Die beiden Effekte heben sich gegenseitig auf und daher ist die obere Auslöseschwelle für hohe Frequenzen konstant (Bereich 3 in ► Abb. 9). Im Bereich zwischen statischen ( $f = 0 \text{ Hz}$ ) und niederfrequenten Feldern ( $0 \text{ Hz} < f < 0,21 \text{ Hz}$ ) ist die obere Auslöseschwelle konstant bei 2 T (Bereich 1 in ► Abb. 9). Die 2 Tesla ergeben sich aufgrund von Festlegungen für die Kraftwirkung von statischen magnetischen Feldern und für die Reizwirkung, ausgelöst durch langsame Bewegungen der Beschäftigten in statischen Feldern (Börner et al. 2011). Die Übergangsfrequenz von  $f = 0,21 \text{ Hz}$  ergibt sich aus dem Schnitt der Geraden für die Kraftwirkung und für die induzierten Feldstärken.

Die Auslöseschwelle für die Gliedmaßen folgt dem gleichen Schema wie die obere Auslöseschwelle. Sie liegt grundsätzlich bei höheren Werten, da die Induktionswirkung bei Gliedmaßen geringer ist (► Abb. 8) und auch für statische Felder höhere Werte (8 T) zulässig sind. Der Bereich zwischen den statischen und niederfrequenten Feldern beginnt bereits bei einer Frequenz von  $f = 0,1575 \text{ Hz}$  anstelle von  $f = 0,21 \text{ Hz}$  (obere Auslöseschwelle), da sich der Schnittpunkt der jeweiligen Geraden für statische Felder und für niederfrequente Felder aufgrund der höheren Schwelle leicht verschiebt.

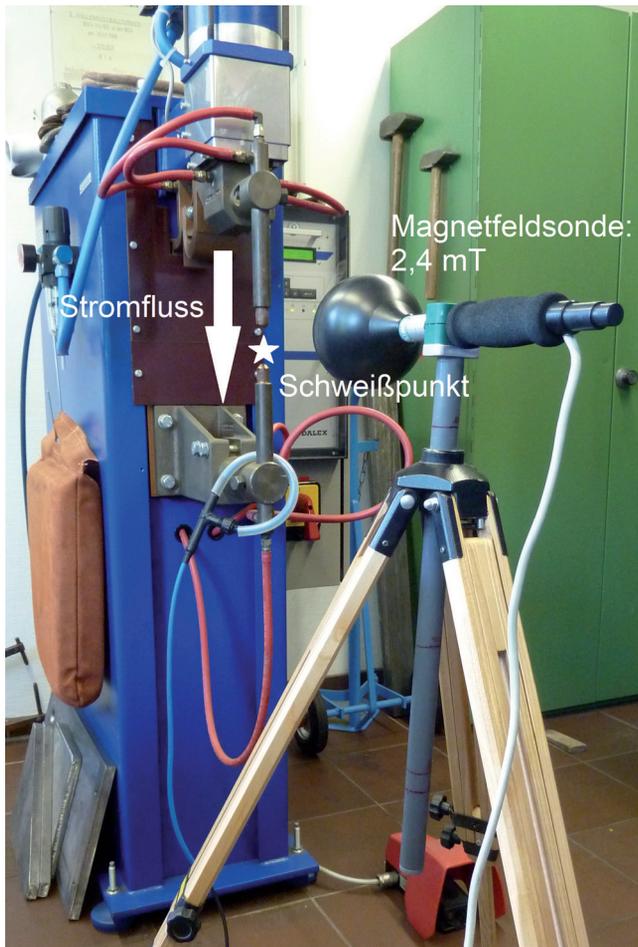
Die untere Auslöseschwelle basiert auf der Erregbarkeit für sensorische Auswirkungen. Diese Wirkungen sind nur bis  $f \leq 400 \text{ Hz}$  relevant (► Abb. 7). Danach geht die untere Auslöseschwelle in die obere über. Auch hier lässt sich der Verlauf der Auslöseschwelle durch die beiden sich überlagernden Effekte der Induktion und der Erregbarkeit erklären (Bereiche 4 und 5 in ► Abb. 9). Der Schnittpunkt mit der Geraden für statische Felder legt wieder die Übergangsfrequenz fest, in diesem Fall  $f = 0,0175 \text{ Hz}$ .



**Abbildung 9:** In der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern sind drei frequenzabhängige Auslöseschwellen für magnetische Felder festgelegt. Die doppelt logarithmische Darstellung wird gewählt, damit viele Größenordnungen von den Auslöseschwellen abgedeckt werden. Die Frequenzabhängigkeit der Schwellen in den Bereichen 1–5 wird im Text hergeleitet. Quelle: Soyka, IFA

## 6 Praxisbeispiel

Um ein besseres Verständnis für die Anwendung der hergeleiteten Auslöseschwellen und die darin enthaltenen Sicherheitsfaktoren zu bekommen, wird eine Widerstandsschweißanlage als Beispiel betrachtet (► Abb. 10). Hierbei werden elektrisch leitfähige Werkstoffe zusammengepresst, mittels eines hohen Stromflusses durch die entstehende



**Abbildung 10:** An einer Widerstandsschweißanlage treten aufgrund des hohen Stromflusses durch die Elektroden nicht vernachlässigbare Magnetfelder auf. Die Magnetfeldsonde steht auf dem Bild an der Position, wo sich typischerweise der Beschäftigte aufhält. Im Abstand von 30 cm zum Schweißpunkt wurde eine magnetische Flussdichte von 2,4 mT gemessen. Quelle: Soyka, IFA

Hitze aufgeschmolzen und über den mechanischen Druck der Schweißzange verschweißt. Durch die hohen Ströme entstehen Magnetfelder, welchen Beschäftigte ausgesetzt sein können. Diese Felder müssen im Rahmen des Arbeitsschutzes bewertet werden. Es gibt verschiedene Varianten des Widerstandsschweißens, bei denen unterschiedliche Stromquellen zum Einsatz kommen. Für dieses Beispiel wird eine 50-Hz-Wechselstrom-Anlage mit sinusförmigem Stromverlauf untersucht<sup>5</sup>. Daraus resultiert ein 50-Hz-Magnetfeld, welches direkt an den stromführenden Teilen und Leitungen am höchsten ist. Die Beschäftigten müssen je nach Arbeitsablauf das Werkstück festhalten, sodass die Hände den stromführenden Teilen am nächsten kommen und die höchste Exposition erfahren.

<sup>5</sup> Bei solchen Anlagen kommt häufig eine Phasenanschnittsteuerung zur Leistungsregelung zum Einsatz. Dabei ist das Magnetfeld nicht mehr sinusförmig und beinhaltet Ein- und Abschaltflanken mit einer deutlich höheren Frequenz. Daher müssen spezielle Bewertungsmethoden für nicht sinusförmige Felder zum Einsatz kommen. Der Einfachheit halber wird hier nur der Fall mit sinusförmigem Feld betrachtet.

Die Auslöseschwellen berechnen sich in diesem Fall nach Tabelle A2.8 der EMF-Verordnung zu:

Untere Auslöseschwelle	Obere Auslöseschwelle	Auslöseschwelle für Gliedermaßen
1,4 mT	8,4 mT	25,2 mT

Es wurden Messwerte in verschiedenen Abständen zum Schweißpunkt erfasst:

Abstand / cm (Schweißpunkt – Sondenmitte)	magnetische Flussdichte / mT
5	17,3
20	8,2
30	2,4
40	1,6
50	0,92
60	0,39
80	0,12

Bei Abständen kleiner als 50 cm wird die untere Auslöseschwelle überschritten. Daher muss in der Betriebsanweisung der Maschine auf das Magnetfeld und die möglichen Auswirkungen hingewiesen werden. Mit den Händen kann in diesem Bereich problemlos gearbeitet werden. Kommt der Kopf zu nahe an die Magnetfeldquelle, kann es passieren, dass die Beschäftigten Lichtblitze (Magnetophosphene) sehen. Hierbei handelt es sich um eine reversible Wirkung, d. h. entfernen die Beschäftigten sich von der Quelle, verschwinden auch die visuellen Erscheinungen wieder. Auf die Magnetophosphene muss sowohl in der Betriebsanweisung als auch in der jährlichen Unterweisung hingewiesen werden.

Bei Abständen kleiner als 20 cm wird auch die obere Auslöseschwelle überschritten. Diesem Feld dürfen Kopf und Rumpf der Beschäftigten zu keiner Zeit ausgesetzt werden, da sonst die Gefahr besteht, ungewollte Aktionspotenziale im Nervensystem auszulösen (bei Überschreitung der Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen, siehe ► Abb. 7). Hierbei ist anzumerken, dass es bei diesen Reizwirkungen keine klassische Dosis-Wirkungs-Beziehung gibt, d. h. die Dauer der Exposition spielt keine Rolle: Aktionspotenziale können sofort ausgelöst werden. Es müssen Maßnahmen getroffen werden, welche sicherstellen, dass es zu keiner Gefährdung der Beschäftigten kommt (EMFV 2016). Die effektivste Schutzmaßnahme sind Sicherheitsabstände, welche zum Beispiel durch eine Absperrung gewährleistet werden können. In Einzelfällen kann durch Simulationsrechnungen der Nachweis erbracht werden, dass die Expositionsgrenzwerte der induzierten, körperinternen elektrischen Felder eingehalten werden, obwohl die obere Auslöseschwelle der magnetischen Felder überschritten ist. Dies kann zum Beispiel zu einer Reduktion der nötigen Sicherheitsabstände führen. Unabhängig davon müssen in diesem Fall jedoch die Beschäftigten jährlich unterwiesen werden.

Um ein besseres Gefühl für die Größenordnung der Sicherheitsfaktoren zu bekommen, sei an den Faktor 2,6 erinnert, welcher bei der Herleitung der Auslöseschwellen von den Expositionsgrenzwerten eingeführt wurde. Würde man 2,6-fach höhere Auslöseschwellen zulassen, so läge die obere Auslöseschwelle bei der betrachteten Widerstandsschweißanlage bei 21,84 mT und somit wäre der einzuhalten Sicherheitsabstand < 5 cm. Dieses Rechenbeispiel sollte jedoch nicht dazu verleiten, die Sicherheitsabstände nicht ernst zu nehmen. Den Sicherheitsfaktor gibt es aus gutem Grund: neben den üblichen Messunsicherheiten bei einer Feldstärkemessung spielen Variationen in der Emission der Feldquelle und auch Unsicherheiten in den Modellannahmen, welche bei der Festlegung der Schwellen genutzt werden, eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Es gilt zu beachten, dass für Beschäftigte mit passiven oder aktiven Körperimplantaten, wie z. B. Herzschrittmachern, eine gesonderte Bewertung der vorliegenden elektromagnetischen Felder durchgeführt werden muss. Für die oben dargestellte 50-Hz-Widerstandsschweißanlage gilt z. B. für den Träger eines Herzschrittmachers eine Schwelle von 0,14 mT, ab der eine Beeinflussung möglich sein kann, d. h. es müssen 80 cm Abstand gehalten werden. Im Einzelfall können individuelle Bewertungen unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Feldquelle und des Implantats vorgenommen werden<sup>6</sup>, sodass eventuell auch kleinere Abstände möglich sind. Expositionsbewertungen für Implantate sind ein komplexes Thema und können hier nicht detaillierter behandelt werden. Jedoch sollen sie hier erwähnt werden, da sie essenzieller Bestandteil einer Gefährdungsbeurteilung eines Arbeitsplatzes sein können. Nähere Informationen hierzu können unter anderem im Forschungsbericht 451 des BMAS (Heinrich und Börner 2015) oder in der Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie und der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin gefunden werden (Napp et al. 2019).

## 7 Zusammenfassung

Beschäftigte, welche in der Nähe von niederfrequenten magnetischen Feldern arbeiten, müssen vor Reizwirkungen durch die im Körper induzierten elektrischen Felder geschützt werden. Die neurobiologischen Grundlagen der Reizwirkung werden in *Abschnitt 2* erläutert. Die in der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern festgelegten Expositionsgrenzwerte für die körperinternen elektrischen Felder beinhalten Sicherheitsfaktoren im Vergleich zu den wissenschaftlich ermittelten Werten, bei denen eine Reizwirkung auftritt (*Abschnitt 3*). Da diese körperinternen elektrischen Felder messtechnisch nicht zugänglich sind, werden von den Expositionsgrenzwerten abgeleitete Auslöseschwellen für magnetische Felder festgelegt (*Abschnitt 4 u. 5*). Diese magnetischen Felder sind körperextern messbar und induzieren die körperinternen elektrischen Felder. Bei den abgelei-

teten Auslöseschwellen kommen weitere Sicherheitsfaktoren hinzu und es gibt höhere Auslöseschwellen für Gliedmaßen, da die Reizwirkung in Gliedmaßen aufgrund geringerer Induktionswirkung erst bei höheren Feldstärken auftritt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Wirkmechanismus von niederfrequenten magnetischen Feldern auf den Menschen ein komplexer Prozess ist, welcher von vielen Faktoren abhängt (von den Eigenschaften der Feldquelle bis hin zu Neuronen im Nervensystem). In der Ableitung der Expositionsgrenzwerte und der Auslöseschwellen werden daher einige Vereinfachungen vorgenommen, welche alle auf einem Worst-Case-Ansatz basieren und Sicherheitsfaktoren mit einrechnen. Damit sind die Beschäftigten bei Einhaltung der Vorschriften in allen Expositionssituationen bestmöglich geschützt.

Die Autoren danken Dominik Stunder für seine hilfreichen Kommentare zum Manuskript.

## 8 Literaturverzeichnis

- Bear MF, Connors BW, Paradiso MA (2018). Neurowissenschaften: Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. Springer Spektrum Verlag, Wiesbaden
- Börner F, Brüggemeyer H, Eggert S, Fischer M, Heinrich H, Hentschel K et al. (2011). Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz – Ein neuer wissenschaftlicher Ansatz für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten (Forschungsbericht 400-D). Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Bonn
- EMF-Richtlinie (2013). Richtlinie 2013/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Juni 2013 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (20. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) und zur Aufhebung der Richtlinie 2004/40/EG. Amtsblatt der Europäischen Union L197 (56), 1–21
- EMFV (2016). Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern vom 15. November 2016 (BGBl. I S. 2531), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 30. April 2019 (BGBl. I S. 554) geändert worden ist
- Europäische Kommission (2014). Nicht verbindlicher Leitfaden mit bewährten Verfahren im Hinblick auf die Durchführung der Richtlinie 2013/35/EU Elektromagnetische Felder. Band 1: Praktischer Leitfaden
- Heinrich H, Börner F (2015). Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz – Sicherheit von Beschäftigten mit aktiven und passiven Körperhilfsmitteln bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (Forschungsbericht 451). Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Berlin
- ICNIRP (2010). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys 99 (6): 818–836
- ICNIRP (2020). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Gaps in Knowledge Relevant to the „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz–100 kHz)“ Health Phys 118 (5): 533–542
- Irnich W (2010). The terms „chronaxie“ and „rheobase“ are 100 years old. Pacing and Clinical Electrophysiology 33 (4): 491–496
- Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM (2000). Principles of neuroscience. McGraw-Hill, New York
- Napp A, Kolb C, Lennerz C, Bauer W, Schulz-Menger J, Kraus T et al. (2019). Elektromagnetische Interferenz von aktiven Herzrhythmusimplantaten im Alltag und im beruflichen Umfeld. Der Kardiologe 13 (4): 216–235
- Reilly JP, Diamant AM (2011). Electrostimulation: Theory, Applications, and Computational Models. Artech House Publishers, Boston London
- Saunders RD, Jefferys JG (2007). A neurobiological basis for ELF guidelines. Health Phys 92 (6): 596–603
- Soyka F (2020a). Bewertungsverfahren für gepulste magnetische Felder im Vergleich (Teil 1 von 2). sicher ist sicher 02: 77–81
- Soyka F (2020b). Bewertungsverfahren für gepulste magnetische Felder im Vergleich (Teil 2 von 2). sicher ist sicher 03: 134–139
- Thompson RF (2001). Das Gehirn. Von der Nervenzelle zur Verhaltenssteuerung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

<sup>6</sup> <https://www.dguv.de/webcode.jsp?query=d1148580>