



Bundesamt  
für Strahlenschutz

**Spotlight on EMF Research**

**Spotlight on “Action potential threshold variability for different electrostimulation models and its potential impact on occupational exposure limit values” by Soyka et al. in Bioelectromagnetics (2025)**

**Kategorie [Statische und niederfrequente Felder, Dosimetrie/Exposition]**

Spotlight - Sep/2025 no.4 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

# 1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Die Referenzwerte für die Exposition gegenüber niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern werden aus Basiswerten für interne elektrische Feldstärken im Körper abgeleitet. Letztere werden bestimmt, indem Schwellenwerte für die Erregung von Neuronen ermittelt werden. Überschreitet ein Neuron diesen Schwellenwert, „feuert“ es, das heißt, es wird stimuliert und sendet Signale an andere Teile des Nerven- oder neuromuskulären Systems, was zu Effekten wie Schmerzempfindung oder Muskelkontraktionen führen kann. Die Feuermuster von Neuronen können durch numerische Rechnungen abgeschätzt werden. Der bekannteste Ansatz dafür wird durch die von Hodgkin und Huxley entdeckten Gleichungen dargestellt, für die sie den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhielten. Ein genauerer Satz an Gleichungen wurde von Frankenhauser und Huxley (FH) entwickelt, basierend auf Messungen von Frosch-Nervenfasern, der später in einem segmentierten Modell eines Neurons verwendet wurde. Dies ist als das „spatially extended nonlinear node (SENN)“-Modell bekannt, welches die Berechnung von neuronalen Feuerschwellen ermöglicht [2]. Diese Berechnungen sind die Grundlage für die aktuellen Grenzwerte für beruflich exponierte Personen der EU-Richtlinie 2013/35/EU [3]. Obwohl der Fokus hier auf dem beruflichen Umfeld liegt, ist das Verständnis der Idee hinter den Expositionsgrenzwerten auch für die Exposition der allgemeinen Bevölkerung relevant.

## 2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive von Soyka et al.

Soyka et al. [1] vergleichen die mit Hilfe mehrerer Modelle zur Nervenregung ermittelten Schwellenwerte für das Auslösen eines Aktionspotentials, jeweils bei zwei verschiedenen Gewebetemperaturen, untereinander. Sie vergleichen weiterhin die Ergebnisse für elektrische Feldstärken, die der simulierten transmembranen Spannung entsprechen, mit den aktuellen Expositionsgrenzwerten der EU-Richtlinie [3]. Zu diesem Zweck verwenden die Autoren eine Implementierung des SENN-Modells [4] und analysieren verschiedene darin enthaltene Modelle der Membran-Kanaldynamik. Sie leiten Schwellenwerte für die elektrische Feldamplitude ab, oberhalb derer in den entsprechenden Simulationen Aktionspotentiale im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 MHz erzeugt werden. Aus praktischen Gründen haben die Expositionsgrenzwerte in diesem Frequenzbereich einen konstanten Wert oder sind eine lineare Funktion der Frequenz. Für den Vergleich dieser Expositionsgrenzwerte mit den frequenzabhängigen Schwellenwerten, die mit dem SENN-Modell im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 100 kHz ermittelt wurden, wird eine Hüllkurve um die Schwellenwerte konstruiert. Die Hüllkurve besteht entsprechend aus einem konstanten und einem linearen Abschnitt. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse konservativ interpretiert werden können und um Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen auszugleichen, wird ein Reduktionsfaktor auf die Hüllkurve angewendet.

Um die Berechnungen zu testen, reproduzieren die Autoren zunächst erfolgreich die Ergebnisse des SENN-Modells von Reilly und Diamant [5], die auf der FH-Dynamik basieren. Dann wiederholen sie die Analyse mit vier weiteren Modellen der Kanaldynamik, die im SENN-Modell verwendet werden können: Erstens das Hodgkin-Huxley (HH)-Modell, das auf Messungen am Riesenkalmars-Axon beruht und immer noch ein Standardmodell in den Neurowissenschaften ist. Zweitens das Chiu-Ritchie-Rogart-Stagg-Sweeney (CRRSS)-Modell, das auf der Grundlage von Spannungsklemmen-Messungen an einzelnen myelinisierten Kaninchen-nervenfasern gewonnen wurde. Drittens das Schwarz-Eikhof (SE)-Modell, das auf einzelnen myelinisierten Rattennervenfasern basiert, und viertens das Schwarz-Reid-Bostock (SRB)-Modell, das auf Spannungsklemmen-Messungen an menschlichen Nervenfasern (aus Nerventransplantationen) beruht. Bei niedrigen Frequenzen (unter 1 kHz) erreichen alle abgeleiteten Hüllkurven, mit Ausnahme derjenigen des HH-Modells, höhere Werte für das elektrische Feld als beim FH-Modell, das heißt das FH-Modell ist bei niedrigen Frequenzen konservativer als die Modelle von CRRSS, SE und SRB. Bei hohen Frequenzen liegen die Hüllkurven der Modelle von HH und CRRSS leicht unter den Kurven des FH-Modells und sind daher in diesem Frequenzbereich konservativer als das FH-Modell.

Im nächsten Schritt vergleichen die Autoren die Ergebnisse des SENN-Modells für die FH-Dynamik in der ursprünglichen Implementierung [5] mit der Implementierung im Softwarepaket Sim4Life [6] für zwei ver-

schiedene Temperaturen des Nervengewebes (22 °C und 37 °C). Beide Simulationsumgebungen stimmen gut überein, mit höheren Schwellenwerten bei 37 °C (als 22 °C) für Frequenzen unter 300 Hz. Schließlich wurde die gleiche Analyse (bei 22 °C und 37 °C) für zwei andere in Sim4Life implementierte Neuronenmodelle durchgeführt: MRG (McIntyre, Richardson, Grill)-Motor, ein Modell für motorische Nervenfasern von Säugetieren mit detaillierten morphologischen Strukturen wie Ranvier-Knoten, paranodalen und internodalen Abschnitten, und MRG-Sensory, ein ähnliches Modell für sensorische Nervenfasern von Säugetieren. Die niedrigsten Schwellenwerte werden bei 22 °C für MRG-Sensory erreicht, während der Einfluss der Temperatur auf die Schwellenwerte mit zunehmender Frequenz abnimmt.

Die Autoren stellen fest, dass die Hüllkurven stark von dem verwendeten Membrankanalmodell abhängen. Die Anwendung des FH-Modells könnte möglicherweise zu konservativ sein, aber im Vergleich zum HH-Modell ist es möglicherweise nicht konservativ genug. Darüber hinaus merken die Autoren an, dass nicht-sinusförmige Wellenformen der Anregung durch elektrische Felder in der Literatur im Zusammenhang mit Expositionsgrenzwerten noch nie berücksichtigt wurden. Der wichtigste Aspekt aus dem Blickwinkel der Sicherheit sind die bis zu zehnmal niedrigeren Schwellenwerte bei niedrigen Temperaturen unter einer Frequenz von 300 Hz, die mit den MRG-Modellen erzielt wurden. Abschließend werfen die Autoren die Frage auf, ob die derzeitigen Expositionsgrenzwerte konservativ genug sind. Insbesondere bei 50 Hz liegen die mit dem MRG-Sensory-Modell ermittelten Schwellenwerte unter den derzeitigen Grenzwerten. Die Autoren betonen, dass weitere experimentelle Daten erforderlich sind, um die bestehenden theoretischen Modelle zu verifizieren und zwischen ihnen zu entscheiden.

### **3 Kommentare des BfS**

Soyka et al. verwenden aktuelle Implementierungen von Neuronenmodellen. Sie verfolgen einen vergleichenden Ansatz und bewerten verschiedene Modelle und verschiedene zugrunde liegende Membrankanaldynamiken. Dadurch stellen sie sicher, dass viele zentrale Annahmen der Nervenphysiologie berücksichtigt werden, was eine robustere Interpretation auf der Grundlage eines Übereinstimmens oder einer Unstimmigkeit zwischen den Ergebnissen ermöglicht. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen Unterschiede in Abhängigkeit von der Wahl des Neuronenmodells und der Membrankanaldynamik. Insbesondere die alternativen Expositionsgrenzwerte, die aus dem MRG-Sensory-Modell von Sim4Life abgeleitet wurden, liegen bis zu zehnmal unter den in der aktuellen EU-Richtlinie festgelegten Werten. Die Autoren weisen zu Recht darauf hin, dass diese Simulationsergebnisse durch weitere experimentelle Untersuchungen gestützt werden müssen.

Die vorliegenden Ergebnisse sind für den Strahlenschutz interessant. Unter der Annahme der Gültigkeit des MRG-Sensory-Modells erzielen Computersimulationen Schwellenwerte, die konservativer wären als die aktuellen Expositionsgrenzwerte der EU-Richtlinie und sogar etwas konservativer als die entsprechenden Werte der Allgemeinbevölkerung. Die Bewertung, welches Neuronenmodell und welche Membrankanaldynamik für eine bestimmte Art von Nervengewebe am geeignetsten ist und damit realistische Schwellenwerte liefert, stellt eine offene Forschungsfrage dar und kann erst durch weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen entschieden werden.

## Referenzen

- [1] Soyka, F, Tarnaud, T, Altekoster, C, Schoeters, R, Plovie, T, Joseph, W, Tanghe, E. Action potential threshold variability for different electrostimulation models and its potential impact on occupational exposure limit values. *Bioelectromagnetics*. 2025; 46(1):e22529.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22529>.
- [2] Reilly, JP, Freeman, VT, Larkin, WD. Sensory effects of transient electrical stimulation: Evaluation with a neuroelectric model. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1985; 32(12):1001–1011.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.1985.325509>.
- [3] *Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC*. Document 32013L0035.  
URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>.
- [4] Tarnaud, T, Soyka, F, Schoeters, R, Plovie, T, Joseph, W, Martens, L, Tanghe, E. EONS : evaluation of non-sinusoidal magnetic fields for electromagnetic safety to intermediate frequencies. *BioEM 2022, the 1st Annual Meeting of BioEM Society*. 2022:320–325.  
URL: <http://hdl.handle.net/1854/LU-01GRTQWRC8GSR55SPHM53AH8R1>.
- [5] Reilly, JP, Diamant, A. *Electrostimulation: Theory, applications, and computational model*. Norwood, MA: Artech House, 2011.  
URL: <https://us.artechhouse.com/Electrostimulation-Theory-Applications-and-Computational-Model-P1468.aspx>.
- [6] ZMT Zurich Medtech AG. *Sim4Life : Website*.  
URL: <https://sim4life.swiss/>.

**Impressum**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: [spotlight@bfs.de](mailto:spotlight@bfs.de)

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2025090854664

Spotlight - Sep/2025 no.4 (Deu)