

# Methoden zur Bewertung der Exposition durch gepulste Magnetfelder im Niederfrequenzbereich

Dr. Christian Rückerl, Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V., Leipzig

## 1. Einführung

Zum Schutz der Bevölkerung und insbesondere von Arbeitnehmern existieren national und international Grenzwerte und Richtlinien hinsichtlich der Exposition durch niederfrequente Felder. Während über die Bewertung der Exposition durch Felder mit sinusförmigem Zeitverlauf weitgehend Einigkeit besteht, gibt es bei der Bewertung von breitbandigen und gepulsten Feldern verschiedene Ansätze. Einerseits werden Summenformeln angewendet, mit denen ein Bezug der Exposition auf den zulässigen Wert für jede einzelne Frequenzkomponente hergestellt wird. Dieses Vorgehen bietet sich an, wenn die Darstellung der zulässigen Werte (Auslöseschwellen) über der Frequenz als Amplitudenfrequenzgang interpretiert wird. Dementsprechend wird in den Richtlinien der ICNIRP [1] und in der Richtlinie 2013/35/EU [2] die Methode der gewichteten Spitzenwerte vorgeschlagen. Im Gegensatz dazu wird bei der Bewertung im Zeitbereich die Änderung der magnetischen Flussdichte aus dem Zeitverlauf bestimmt und mit einer zulässigen zeitlichen Änderung verglichen. In der BGV B11 [3] und im Forschungsbericht [4] wurden Bewertungsverfahren beschrieben, welche auf diesem Ansatz beruhen.

In der Richtlinie [2] wurden keine genaueren Angaben zur Umsetzung der Methode der gewichteten Spitzenwerte gemacht. Zudem wird explizit darauf hingewiesen, dass auch andere wissenschaftlich nachgewiesene und validierte Expositionsberechnungsverfahren herangezogen werden können, vorausgesetzt diese führen zu annähernd gleichwertigen und vergleichbaren Ergebnissen. Mit dem vorliegenden Beitrag sollen deshalb die o.g. Verfahren anhand eines Beispiels miteinander verglichen werden.

## 2. Bewertungsmethoden

### 2.1 Methode der gewichteten Spitzenwerte

Die zulässigen Werte (Referenzwerte) werden für die Umsetzung der Gewichtung im Zeitbereich als Amplitudenfrequenzgang interpretiert. Es wird jede Frequenzkomponente der gemessenen Feldstärke oder Flussdichte auf den zulässigen Wert bei der entsprechenden Frequenz bezogen. Auf diese Weise kann eine Summenformel eingeführt werden, welche sich über das gesamte Frequenzspektrum des Niederfrequenzbereiches erstreckt. In den Richtlinien der ICNIRP [1] wird das Kriterium (1) vorgeschlagen, mit welchem auch der Phasenfrequenzgang der magnetischen Flussdichte mit einbezogen wird. Die zulässigen Werte in (1) können durch die magnetische Feldstärke/ Flussdichte oder die elektrische Feldstärke gegeben sein.

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{EL_i} \cos(2\pi f_i t + \vartheta_i + \varphi_i) \right| \leq 1 \quad (1)$$

- $A_i$  Amplitude der  $i$ -ten Frequenzkomponente des Messsignals  
 $EL_i$  Amplitude der zulässigen Werte (Sinusvorgänge) für die  $i$ -te Frequenzkomponente  
 $\varphi_i$  Phasenwinkel der  $i$ -ten Frequenzkomponente des Messsignals  
 $\vartheta_i$  Phasenwinkel der  $i$ -ten Frequenzkomponente der zulässigen Werte für die Umsetzung eines Filters (-90°, 0°, 90°, 180°) wie in [1] beschrieben  
 $i$  Frequenzkomponente, entspricht den Frequenzen zwischen 1 Hz und 100 kHz

Bei der Bewertung eines transienten Vorgangs (z.B. eines Schweißimpulses) werden die Messdaten aufgezeichnet und in den Frequenzbereich transformiert. Das Kriterium (1) kann dann mit einer geeigneten Software auf die Abtastwerte der Messdaten angewendet werden. Dieses Vorgehen wird im Simulationsbeispiel (Abschn. 3) umgesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse von den Parametern der Messung abhängig sind. Bei einer hohen Abtastfrequenz und einer langen Messdauer führt die Verarbeitung der umfangreichen Messdaten u.U zu sehr aufwendigen Berechnungen.

## 2.2 Bewertung im Zeitbereich

In der BGV B11 [3] wurde die Bewertung gepulster Felder auf die Basisgröße, die induzierte elektrische Stromdichte, zurückgeführt. Diese Basis ist proportional zur zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte (Induktionsgesetz).

$$J_{\text{ind}} \propto \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

Für die Bewertung werden zunächst die Dauern der Feldänderungen bestimmt. Aus der kürzesten Dauer  $\tau_{P\text{min}}$  wird in der BGV B11 eine Frequenz der Feldänderung (3) berechnet.

$$f_P^{\text{BGV}} = \frac{1}{4\tau_{P\text{min}}} \quad (3)$$

Mit der Ersatzfrequenz (3) und einer möglichen Gewichtung ( $V$ ) wird die zulässige zeitliche Änderung aus den Tabellen der BGV B11 bestimmt. Die Einhaltung der zulässigen Werte wird angenommen, wenn die tatsächliche mittlere oder maximale zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte kleiner oder gleich dem zulässigen Wert ist.

Für die Auswertung sind die Datensätze der Messdaten mit einer geeigneten Software zu untersuchen. Die mittlere zeitliche Änderung kann beispielsweise durch lineare Näherungen der Verläufe mit Tangenten bestimmt werden. Die maximale zeitliche Änderung kann dagegen einfach durch die Berechnung des Differenzenquotienten ermittelt werden. Die Umsetzung in einer automatisierten Messtechnik ist wegen der Bestimmung der Bewertungsparameter (zeitliche Änderungen, Ersatzfrequenzen,

Gewichtungen) nur bedingt möglich. Für die Bewertung selbst sind einige Schritte von Hand auszuführen.

### 2.3 Alternative Vorgehensweise im Zeitbereich

Die Reizwirkung stellt die Basis für die Ableitung zulässiger Werte im Niederfrequenzbereich dar. Diese kann für periphere Nerven und für Intensitäten mit einem impulsförmigen Zeitverlauf in Abhängigkeit von der Pulsdauer mit Lapicques Interpretation der Gleichung von Weiss beschrieben werden [5]. Mit (4) wird diese Gesetzmäßigkeit auf die elektrische Feldstärke (oder Stromdichte) im Gewebe angewendet.

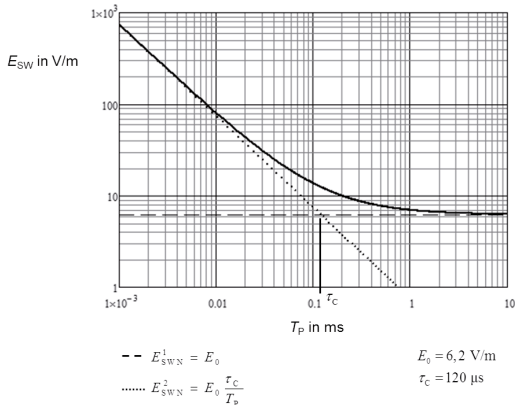
$$E_{SW} = E_0 \left( 1 + \frac{\tau_C}{T_P} \right) \quad (4)$$

- $E_{SW}$  Reizschwelle nach Weiss
- $E_0$  Rheobase (elektrische Feldstärke)
- $\tau_C$  Chronaxie
- $T_P$  Pulsdauer, entspricht  $\tau_{Pmin}$  für einfache Verläufe

Für die Gleichung (4) lassen sich zwei Näherungen (5) angeben, welche für kurze und lange Pulsdauern gelten.

$$E_{SWN} = \begin{cases} E_0 \frac{\tau_C}{T_P} & \text{für } T_P \ll \tau_C \\ E_0 & \text{für } T_P \gg \tau_C \end{cases} \quad (5)$$

In der Abbildung 1 ist der Verlauf der Reizschwelle (4) mit den beiden Näherungen (5) angegeben. Die Zahlenwerte für dieses Beispiel wurden aus [6] entnommen.



**Abbildung 1. Beispiel für die Reizschwelle der elektrischen Gewebefeldstärke und lineare Näherungen für kurze und lange Pulsdauern.**

Für eine Übertragung auf Sinusvorgänge kann die Ersatzfrequenz (6) verwendet werden, welche die Pulsdauer einer halben Periodendauer zuordnet.

$$f_{\text{ers}} = \frac{1}{2\tau_{\text{Pmin}}} \quad (6)$$

Mit dieser Ersatzfrequenz kann eine Darstellung der Reizschwelle über der Frequenz angegeben werden. Diese entspricht dem typischen Verlauf der Basiswerte für Sinusverläufe. Für die Übertragung dieser Zusammenhänge auf die magnetische Flussdichte muss noch das Induktionsgesetz berücksichtigt werden.

Nach (5) ist für *kurze Vorgänge* die Intensitäts-Zeit-Fläche die relevante Größe. Wegen (2) folg daraus, dass für kurze Vorgänge der Feldhub (7) zu betrachten ist.

$$\int_{T_p} E_{\text{ind}} dt = K_E (B_{\text{max}} - B_{\text{min}}) \quad (7)$$

$$\Delta B = B_{\text{max}} - B_{\text{min}}$$

$K_E$ : Koppelfaktor des Menschmodells (V/m / T/s)

Bei sinusförmigen Größen wird der Flächeninhalt einer reizwirksamen halben Periodendauer über den positiven und den negativen Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bestimmt. Somit ist in diesem Fall der Feldhub durch (8) gegeben.

$$\Delta B = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot B_{\text{eff}} \quad (8)$$

Für *lange Impulse* ist die Intensität selbst relevant. In diesem Fall liegt mit  $E_{\text{ind}}$  die zu bewertende Größe vor. In der Tabelle 1 sind die Bewertungsgrößen, unterschieden nach kurzen und langen Vorgängen, angegeben. Bei einer Überlagerung eines langen Vorgangs mit einem kurzen Vorgang wird durch die Betrachtung der maximalen zeitlichen Änderung ein restriktives Ergebnis ermittelt. Im Vergleich zu einer aufwendigen Simulation kann diese Vorgehensweise jedoch akzeptiert werden. Eine zusätzliche Gewichtung sowie die Berechnung von Ersatzfrequenzen entfallen dafür.

**Tabelle 1: Basisgrößen für die Bewertung gepulster Vorgänge.**

Pulsdauer	Einteilung, Vorgang	elektrische Gewebefeldstärke	magnetische Flussdichte
$T_p < \tau_C$	kurz	$\int_{T_p} E_{\text{ind}} dt$	$\Delta B$
$T_p > \tau_C$	lang	$E_{\text{ind}}$	$\frac{dB}{dt}$

Für den beschriebenen Ansatz ist nur der Vergleich mit einer charakteristischen Zeit  $\tau_c$  notwendig. Diese müsste für die verschiedenen Gewebearten (ZNS und PNS) angegeben werden. Damit würde auch die Zusammenfassung der Reizmechanismen für ZNS, PNS und Retina in einem Kurvenzug entfallen, sodass tatsächlich eine getrennte Bewertung nach Gewebearten erfolgen kann. Insbesondere die

Berücksichtigung von Phosphenen sollte separat und in dem betreffenden Frequenzbereich (10 Hz bis 50 Hz, vgl. [7,8]) erfolgen.

### 3. Simulationsbeispiel

Mit einem Simulationsbeispiel sollen die Bewertungsverfahren untereinander für zwei Beispielimpulse (Abb. 2) verglichen werden. Für jeden der beiden Beispielimpulse ergeben sich nach Berechnung der numerischen Differentiation zwei Vorgänge mit unterschiedlicher Polarität welche getrennt zu bewerten sind (Abb. 3).

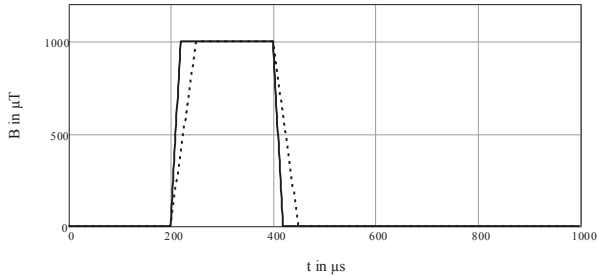


Abbildung 2: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte für Beispielimpuls 1 (durchgezogen) und Beispielimpuls 2 (gepunktet).

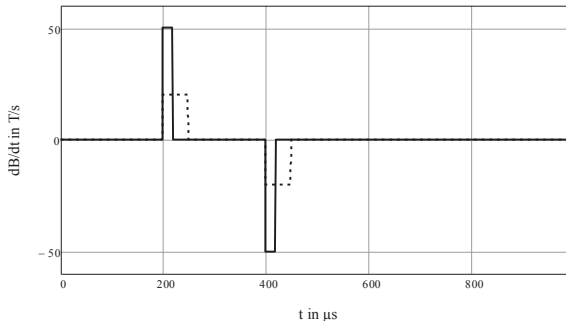


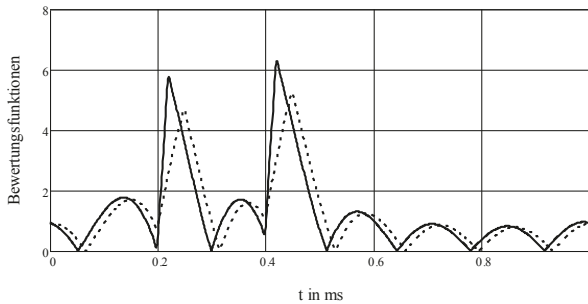
Abbildung 3: Zeitverlauf der zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte für Beispielimpuls 1 (durchgezogen) und Beispielimpuls 2 (gepunktet).

In der Tabelle 2 sind die allgemeinen Bewertungsparameter zusammengestellt. Aufgrund der Pulsdauer ( $< 100 \mu\text{s}$ ) kann für beide Beispielimpulse von kurzen Vorgängen ausgegangen werden. Somit kann die Bewertung einfach mit dem Feldhub erfolgen.

**Tabelle 2: Allgemeine Bewertungsgrößen für das Simulationsbeispiel.**

Nr.	Größe	Zahlenwert
1	Feldhub $\Delta B$ beide Impulse in $\mu\text{T}$	1000
2	Pulsdauer zeitl. Änderung, $T_P$ in $\mu\text{s}$ Impuls 1 Impuls 2	20
		50
3	zeitliche Änderung der magn. Flussdichte $\dot{B}$ in $\text{T/s}$ Impuls 1 Impuls 2	50
		20
4	Ersatzfrequenz Gl. (6) in $\text{Hz}$ Impuls 1 Impuls 2	25000
		10000

Das Kriterium (1) nach ICNIRP kann für alle Abtastschritte als Zeitverlauf wie in Abbildung 4 dargestellt werden.



**Abbildung 4: Verlauf der Bewertungsfunktionen nach ICNIRP für Beispielimpuls 1 (durchgezogen) und Beispielimpuls 2 (gepunktet)**

Nach ICNIRP sind die Maxima der Zeitverläufe in Abbildung 4 zu bestimmen. Die Auswertung ist in der Tabelle 3 angegeben.

**Tabelle 3: Ergebnisse für die Bewertung nach ICNIRP und Vergleich mit dem Feldhub.**

Nr.	Größe	Zahlenwert
1	Maximum Bewertungsfunktion Impuls 1	<b>6,3</b>
2	Maximum Bewertungsfunktion Impuls 2	<b>5,2</b>
3	Auslöseschwelle (EU-Richtlinie) und reference level occup. (ICNIRP) in $\mu\text{T}$	100
4	max. zul. Feldhub $\Delta B_{\text{zul}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot B_{\text{zul}}$ in $\mu\text{T}$	283
5	Bezug auf zul. Feldhub: $\Delta B / \Delta B_{\text{zul}}$	<b>3,5</b>

Für das Beispiel wird eine Überschreitung der zulässigen Werte um das 6,3-Fache bzw. um das 5,2-Fache ermittelt. Hinsichtlich des Feldhubs ergibt sich dagegen nur eine Überschreitung um das 3,5-Fache. Die Bewertungsgrößen nach BGV B11 sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

**Tabelle 4: Ergebnisse nach BGV B11 für Beispielimpuls 1 und Vergleich mit dem Feldhub.**

Nr.	Größe	Zahlenwert
1	Frequenz der Feldänderung Gl. (3) in Hz	12500
2	$\tau_{\text{ps}}$ in $\mu\text{s}$	40
3	Gewichtung $V$	5
4	zul. Wert $\dot{B}_{\text{zul}}$ in T/s maximale zeitl. Änderung mittlere zeitl. Änderung	37,5 23,8
5	zeitliche Änderung $\dot{B}$ in T/s Impuls 1	50,0
6	$\dot{B}/\dot{B}_{\text{zul}} _{\text{max}}$ $\dot{B}/\dot{B}_{\text{zul}} _{\text{mittl}}$	<b>1,3</b> <b>2,1</b>
7	zul. Feldhub in $\mu\text{T}$ Expositionsbereich 1	192,1
8	$\Delta B/\Delta B_{\text{zul}}$	5,2

Die mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte wird um das 1,3-Fache überschritten. Auf der Basis des Feldhubs ergibt sich dagegen eine Überschreitung um das 5,2-Fache. Dieser Faktor entspricht etwa der bislang akzeptierten Gewichtung  $V$ .

#### 4. Zusammenfassung

Der Vergleich der Verfahren zeigt, dass eine Bewertung im Zeitbereich zunächst aufwendiger ist, da der Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte betrachtet werden muss und die nötigen Bewertungsparameter zu bestimmen sind. Mit dem Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte und deren zeitlicher Ableitung kann jedoch eine vollständige Bewertung vorgenommen werden. Mit einer schlüssigen Übertragung der zulässigen Werte für gepulste Felder aus den zulässigen Werten für Sinusverläufe kann eine sinnvolle Bewertung vorgenommen werden. Eine Reduzierung auf den Feldhub oder die induzierte elektrische Gewebefeldstärke kann die Bewertung zudem vereinfachen.

Die Methode der gewichteten Spitzenwerte liefert dagegen in der gezeigten Umsetzung kein Maß für die Ausschöpfung oder Überschreitung der zulässigen Werte. Im Simulationsbeispiel ergibt sich im Vergleich zum Feldhub eine Überbewertung der Exposition. Zudem unterscheiden sich die Bewertungsergebnisse für die beiden Beispielimpulse, welche den gleichen Feldhub besitzen.

Ein praktisches Problem liegt in der Tatsache, dass die Messdaten in drei kartesischen Koordinatenachsen des Messsystems vorliegen. Für die Bestimmung der zeitlichen Änderungen wird jedoch ein eindimensionaler Zeitverlauf benötigt. Diese Problematik wird in den Richtlinien bislang nicht erörtert. Eine Erläuterung der Problematik sowie eine mögliche Transformation der Messdaten werden in [9] angegeben.

## Literatur

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). In: Health Physics, Vol. 99, Nr. 6, 2010, S. 818–836.
- [2] Richtlinie 2013/35/EU: Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder), 26.07.2013
- [3] Berufsgenossenschaftliche Vereinigung (Hrsg.): Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 „Elektromagnetische Felder“. Gustav Heymanns Verlag KG, 2001.
- [4] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.): Forschungsbericht (FB 400) Sozialforschung: Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz – Ein neuer wissenschaftlicher Ansatz für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten. ISSN: 0174-4992, 2010.
- [5] Lopicque, L. (Translated by Brunel, N., van Rossum, M. C. W.): Quantitative investigations of electrical nerve excitation treated as polarization. In: Biol. Cybern., 97, 2007, S. 341–349.
- [6] Jokela, K.: Electrophysiological Considerations Relevant to the Limiting of Pulsed Electric and Magnetic Fields. In: Health Physics, Vol. 72 (3), 1997, S. 408–417.
- [7] Lövsund, P., Öberg, P. A., Nilsson, S. E. G., and Reuter, T.: Magnetophosphenes: a quantitative analysis of thresholds, Med. Biol. Eng. Comp. No. 18, pp. 326-334, 1980
- [8] Ruckerl, C., Eichhorn, K. F.: Neue Ansätze für die Richtlinien zum Expositionsschutz im Niederfrequenzbereich, Kongress EMV 2012, Tagungsband, S. 677 ff., 2012
- [9] Ruckerl, C.: Methoden zur Bewertung der Exposition durch gepulste Magnetfelder in Niederfrequenzbereich, Shaker Verlag, 2011.