

Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz: Bewertung nicht-sinusförmiger und gepulster Felder. T. 1, Anpassung der Zeitbereichs- Bewertungsmethode (ZBM) für "Gepulste Felder" an die Rahmenbedingungen der Richtlinie 2013/35/ EU

Heinrich, H.

Veröffentlichungsversion / Published Version

Forschungsbericht / research report

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:

Bundesministerium für Arbeit und Soziales

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Heinrich, H. (2015). *Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz: Bewertung nicht-sinusförmiger und gepulster Felder. T. 1, Anpassung der Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) für "Gepulste Felder" an die Rahmenbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU.* (Forschungsbericht / Bundesministerium für Arbeit und Soziales, FB457). Bonn: Bundesministerium für Arbeit und Soziales. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-47121-8>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.



FORSCHUNGSBERICHT

457

Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz

– Bewertung nicht-sinusförmiger und gepulster Felder –

Teil 1: Anpassung der Zeitbereichs-Bewertungsmethode
(ZBM) für "Gepulste Felder" an die Rahmenbedingungen der
Richtlinie 2013/35/EU

**Bericht der EMF-Expertengruppe des
Bundesministeriums für Arbeit und Soziales**

**Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz
Bewertung nicht-sinusförmiger und gepulster Felder
Anpassung der Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) für
„Gepulste Felder“
an die Rahmenbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU**

H. Heinrich

**Bestätigt durch die EMF-Expertengruppe des
Bundesministeriums für Arbeit und Soziales**

**Mitarbeiter: C. Alteköster
F. Börner
H. Brüggemeyer
S. Eggert
M. Fischer
H. Heinrich
S. Joosten
M. Mischke
D. Mohr
H. Neuschulz
M. Schreiber
L. Udovicic**

Mai 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bewertungsverfahren der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11	2
2.1	Physiologische Grundlagen	2
2.2	Spezielle Festlegungen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11	10
2.2.1	Parameter T_I	10
2.2.2	Parameter V_{\max}	11
3	Anpassung der Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) für „Gepulste Felder“ an die Rahmenbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU	12
	Literaturverzeichnis	16

1 Einleitung

Am 26. Juni 2013 verabschiedeten das Europäische Parlament und der Rat die Richtlinie 2013/35/EU über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder), die die ursprüngliche Richtlinie 2004/40/EG aufhebt. Die Richtlinie 2013/35/EU, allgemein als EMF-Richtlinie bezeichnet, legt Mindestanforderungen für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten gegen Risiken fest, die aus einer Exposition gegenüber statischen und zeitveränderlichen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (EMF) mit Frequenzen von bis zu 300 GHz entstehen.

Die Richtlinie 2013/35/EU verpflichtet die Arbeitgeber, eine Bewertung der durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz entstehenden Risiken vorzunehmen und bei Bedarf angemessene Maßnahmen zur Beseitigung oder Minimierung solcher Risiken zu ergreifen. Die Richtlinie 2013/35/EU fordert zwar im Anhang II die Anwendung der Methode der gewichteten Spitzenwerte bei der Expositionsbestimmung für nicht-sinusförmige Felder an Arbeitsplätzen, gestattet jedoch auch, dass andere wissenschaftlich nachgewiesene und validierte Expositionsrechnungsverfahren herangezogen werden können, vorausgesetzt sie führen zu annähernd gleichwertigen und vergleichbaren Ergebnissen.

Vor 10 Jahren wurde für die Expositionsbestimmung bei nicht-sinusförmigen und gepulsten Feldern im Rahmen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 eine Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) entwickelt, die sich in der Praxis sehr bewährt hat. Die Methode beschreibt die Expositionen gegenüber nicht-sinusförmigen und gepulsten Feldern mit einfachen Mitteln und auf physiologischer Basis hinreichend genau. Eine Überbewertung auftretender Expositionen und somit auch unnötige Maßnahmen werden dadurch vermieden. Dieses Verfahren basiert auf den Grenzwerten der ICNIRP-Empfehlungen aus dem Jahre 1999 und kann somit nicht einfach im Rahmen und mit den Auslöseschwellen der EG-Richtlinie 2013/35/EU verwendet werden.

Dieses wissenschaftliche Hintergrunddokument zum Bereich elektromagnetische Felder nimmt auf Basis des aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes eine Anpassung des bewährten Bewertungsverfahrens der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 für nicht-sinusförmige und gepulste Felder an die Rahmenbedingungen der EG-Richtlinie 2013/35/EU vor.

2 Bewertungsverfahren der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11

2.1 Physiologische Grundlagen

Die physiologischen Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf den menschlichen Körper hängen von der Frequenz ab.

Im Niederfrequenzbereich bis etwa 100 kHz ist die wichtigste physiologische Wirkung die elektrische Stimulation von erregbarem Körpergewebe wie Muskeln, Nerven und Sinnesorganen.

Im Frequenzbereich zwischen mehreren 100 kHz und einigen MHz kann es bei Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern sowohl zu einer elektrischen Stimulation oder Gewebeerwärmung kommen. Je höher die Frequenz, desto stärker werden die gewebeerwärmenden Wirkungen, und die Stimulationswirkungen nehmen ab. Die gewebeerwärmenden Wirkungen überwiegen bei Frequenzen oberhalb von einigen MHz.

Die physiologischen Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder sowie die Mechanismen und Fakten zur Auslösung von Aktionspotentialen und der elektrischen Stimulation erregbarer Gewebe sind in [5] ausführlich beschrieben und werden hier nur in verkürzter Form wiedergegeben.

Die physiologische Basis des Bewertungsverfahrens für nicht-sinusförmige und gepulste Felder der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] ist das Grundgesetz der Elektrostimulation, das auch als Lapicque'sches Gesetz [17, 18] oder die modifizierte Weiss'sche Gleichung [23] bekannt ist.

Das Lapicque'sche Gesetz stellt die grundlegende Beziehung zwischen der Stimulationsstärke – historisch als Rechteckstimulationsstrom I_s angegeben – und der Dauer des Reizes T in Bezug auf physiologische Parameter wie die Rheobase – historisch ebenfalls als Strom I_R angegeben – sowie einer empirischen Zeitkonstante τ_e , die in Verbindung zur Zeitkonstante $\tau_M = R_M \cdot C_M$ der Zellmembran steht (etwa im Bereich von 1 ms) und durch den Membranwiderstand R_M sowie die Membrankapazität C_M definiert ist, einerseits und der räumlichen Verteilung des Reizstroms oder dem räumlichen Gradienten der gewebeinternen elektrischen Feldstärke andererseits dar:

$$I_s = \frac{I_R}{1 - e^{-T/\tau_e}} \quad (2.1)$$

Wie in Abb. 2.1 dargestellt und entsprechend der Gleichung (2.1) ist die minimale Reizstärke – historisch der minimale Reizstrom – I_s mit der Dauer T erforderlich, um die Reizschwelle zu erreichen. Bei langen Reizen ($T \rightarrow \infty$) ist der Wert für I_s mit dem Rheobase-Wert I_R identisch, der die Reizschwelle kennzeichnet. Dieser Rheobase-Wert hängt von physiologischen Parametern und individuellen Expositionsbedingungen ab.

Die Zeit $T = \tau_c$ an der die minimale Reizstärke gleich dem doppelten Rheobase-Wert $I_s = 2 \cdot I_R$ ist, wurde von Lapicque als *Chronaxie* bezeichnet.

Aus Gleichung (2.1) lassen sich drei grundlegende Aussagen ableiten:

1. Reize müssen eine Schwelle, also einen minimalen Stimulationsstrom oder eine minimale gewebeinterne elektrische Feldstärke übersteigen, um ein Aktionspotential auslösen zu können
2. Reize unterhalb der Schwelle, also der Rheobase, können kein Aktionspotential erzeugen, selbst wenn sie lange andauern
3. Reize von kürzerer Dauer müssen eine höhere Intensität aufweisen, um wirksam zu sein, d.h. ein Aktionspotential auslösen zu können

Es ist anzumerken, dass bei Einhaltung der Grenz-, Basis- und Expositionsgrenzwerte oder der Referenzwerte, abgeleiteten Werte und Auslöseschwellen der jeweiligen ICNIRP-Empfehlungen [13,

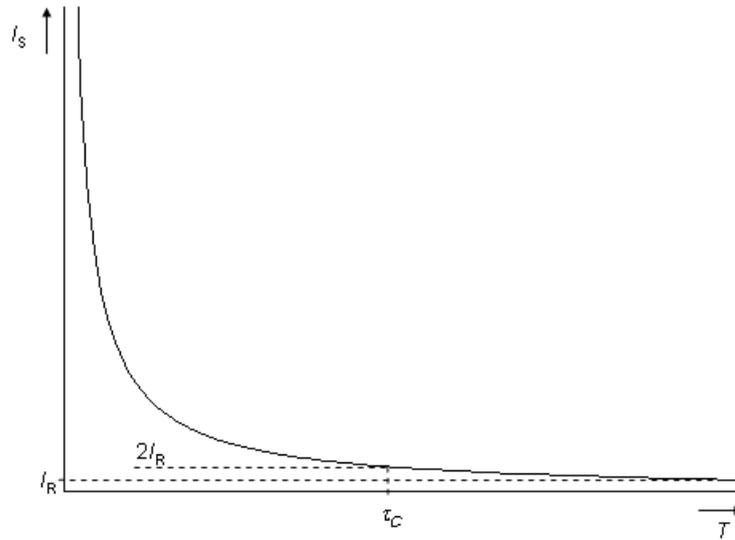


Abbildung 2.1: Grafische Darstellung des in Gleichung (2.1) beschriebenen Lapicque'schen Gesetzes

16], Unfallverhütungsvorschrift [22] und EMF-Richtlinie [3] die Auslösung eines Aktionspotentials ausgeschlossen ist, da die Reizschwelle durch Expositionen die die genannten Werte einhalten nicht erreicht und sogar deutlich unterschritten wird.

Der in Gleichung (2.1) beschriebene Zusammenhang zwischen Puls- bzw. Reizdauer und Intensität muss jedoch beachtet werden, um stets einen gleichbleibenden und ausreichenden, aber nicht zu großen Abstand zur Reizwirksamkeit, der in Form eines Reduktions- [5] oder „Sicherheitsfaktors“ [13, 16] beschrieben wird, zu gewährleisten.

Wie bereits angedeutet, wurde das Lapicque'sche Gesetz für rechteckige Stromimpulse abgeleitet, jedoch können die Erkenntnisse uneingeschränkt auf jegliche Art von Reizwirkungen durch externe elektrische und magnetische Felder übertragen werden, da die gewebeinterne elektrische Feldstärke E_i proportional zur externen elektrischen Feldstärke E_0

$$E_i \sim E_0 \quad (2.2)$$

und gemäß dem Ohmschen Gesetz proportional zum Kontaktstrom I_c

$$E_i \sim I_c \quad (2.3)$$

und ebenfalls proportional zur zeitlichen Ableitung $\frac{d}{dt}$ des externen Magnetfeldes B ist.

$$E_i \sim \frac{dB}{dt} \quad (2.4)$$

Damit kann dieses Konzept bei Bedarf sowohl zur Bewertung von nicht-sinusförmigen oder gepulsten externen elektrischen und magnetischen Felder als auch zur Bewertung von Berührungsspannungen und Kontaktströmen angewandt werden.

Im vorliegenden Dokument werden jedoch nur nicht-sinusförmige oder gepulste Magnetfelder behandelt.

Gemäß dem Lapicque'schen Gesetz haben unterschiedliche Reize, unabhängig vom konkreten Verlauf ihrer Zeitfunktion, die gleiche Wirkung falls der gleiche Endpunkt, d.h. die gleiche Intensität oder Amplitude, in der gleichen Zeit erreicht wird, solange bestimmte Bedingungen eingehalten werden. Abbildung 2.2 und 2.3 zeigen sinus- und dreieckförmige sowie exponentielle Signale als normalisierte Zeitverläufe. Dabei bedeutet $B(t)$ den zeitlichen Verlauf des magnetischen Feldes und \hat{B}

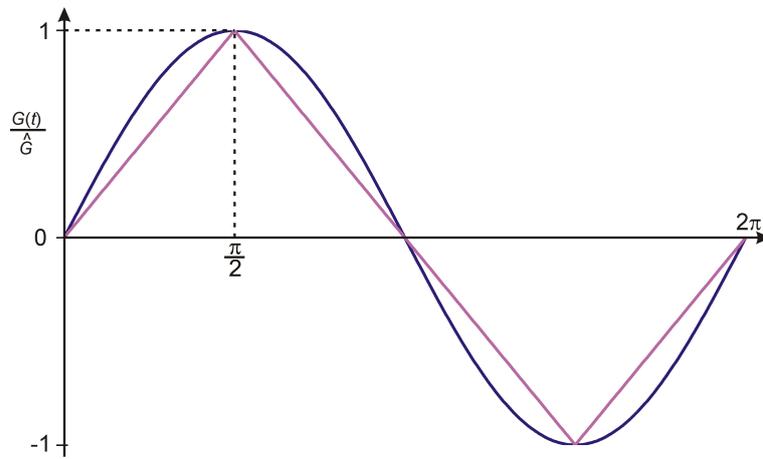


Abbildung 2.2: Sinus- und dreieckförmiger Feldverlauf als normierte Zeitfunktion

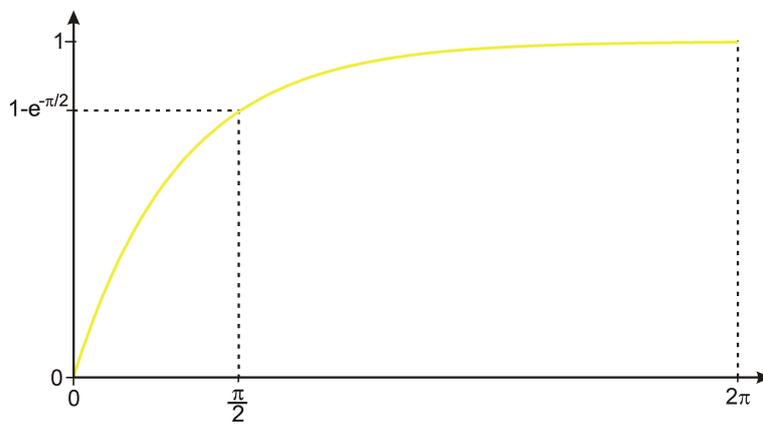


Abbildung 2.3: Exponentieller Feldverlauf als normierte Zeitfunktion

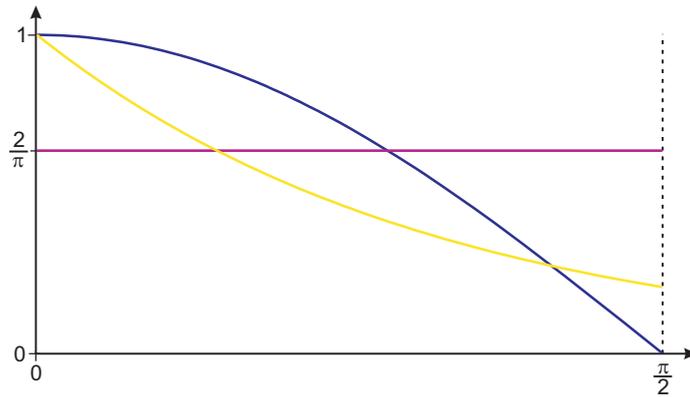


Abbildung 2.4: Ableitungen der in den Abbildungen 2.2 und 2.3 dargestellten Zeitverläufe im Zeitintervall $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$

den Spitzenwert. Die Ableitungen dieser Funktionen im Zeitintervall $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2}$ sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

Wie sich aus obigen Ausführungen und Abbildung 2.4 unmittelbar ergibt, haben sinus- und dreieckförmige Zeitverläufe die gleiche Stimulationswirkung, da sich der gleiche Flächeninhalt unter der Kurve ergibt. Für exponentielle Zeitverläufe liegt die Stimulationswirkung niedriger [8].

Wie bereits ausgeführt kann gezeigt werden, dass beliebige Feldverläufe mit sinusförmigen Zeitverläufen vergleichbar sind, solange derselbe Endpunkt \hat{B} , z.B. die gleiche Amplitude, magnetische Feldstärke oder magnetische Flussdichte, in derselben Zeit τ erreicht wird und der Zeitverlauf der steigenden oder fallenden Flanke keinen Wendepunkt, d.h. eine Vorzeichenumkehr der Ableitung der magnetischen Flussdichte nach der Zeit enthält – also entweder stets $\frac{dB}{dt} > 0$ oder $\frac{dB}{dt} < 0$ gilt – und auch keinen Abschnitt aufweist, in dem die zeitliche Ableitung der magnetischen Flussdichte Null wird, d.h. stets gilt $\frac{dB}{dt} \neq 0$.

Vergleicht man die Reizwirkung eines kontinuierlichen Dauerstrich-Signals, im Englischen auch als CW (continuous-wave) bezeichnet, mit einem modulierten oder gepulsten Signal, das Pausen, d.h. Zeitabschnitte in denen kein Reiz wirksam ist, enthält, so stellt man fest, dass die Reizwirkung umso mehr abnimmt, je mehr Pausen in dem Signal enthalten sind. Um wieder die gleiche Reizwirkung wie im Falle eines kontinuierlichen Signals zu erreichen, sind bei gepulsten Signalen höhere Amplituden notwendig.

Da die in jeweiligen Vorschriften zur Gewährleistung des Schutzes von Beschäftigten bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern [3, 13, 16, 22] festgelegten Referenzwerte, abgeleiteten Werte oder Auslöseschwellen grundsätzlich nur für sinusförmige, kontinuierliche Dauerstrich-Signale einer Frequenz gelten, dürfen diese daher mit einem Gewichtungsfaktor V multipliziert werden, wenn sie zur Bewertung von nicht-sinusförmigen oder gepulsten Expositionen herangezogen werden. Um die Sicherheit auch bei Expositionen gegenüber sehr kurzen Impulsen gewährleisten zu können, darf der Gewichtungsfaktor V einen maximalen Wert V_{\max} nicht überschreiten, d.h. es gilt stets: $V \leq V_{\max}$.

Im Falle einer Exposition gegenüber einem sinusförmigen, kontinuierlichen Dauerstrich-Feld mit nur einer Frequenz gilt: $V = 1$, was eine nahtlose Integration der Bewertung nicht-sinusförmiger oder gepulster Expositionen in bestehende Richtlinien, Empfehlungen und Vorschriften erlaubt.

Hierbei ist anzumerken, dass 1-frequente, kontinuierliche, sinusförmige Felder und auch Expositionen gegenüber mehrfrequenten Feldern nur Spezialfälle des allgemeinen Ansatzes der Bewertung

nicht-sinusförmiger und gepulster Expositionen darstellen und mit diesem universellen Verfahren ebenfalls bewertet werden können.

Zur Festlegung der beiden Faktoren V und V_{\max} sind noch weitere Überlegungen notwendig, die im Folgenden näher ausgeführt werden.

Wie bereits erwähnt, gelten die in den meisten Vorschriften angegebenen zulässigen Werte [3, 13, 16, 22] nur für sinusförmige Vorgänge einer Frequenz.

Damit ist:

$$B(t) = \hat{B} \cdot \sin \omega t \quad (2.5)$$

mit $\omega = 2\pi f$.

Den Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke im Gewebe des menschlichen Körpers und der magnetischen Flussdichte beschreibt das Faraday'sche Induktionsgesetz [7].

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.6)$$

Nimmt man vereinfachend an, dass sich die Orientierung der Schleife gegenüber der Feldquelle mit der Zeit nicht ändert und der magnetische Fluss B eine kreisförmige Fläche mit Radius r gleichförmig durchsetzt, so ergibt sich die vereinfachte Gleichung für die elektrische Feldstärke E_T im Körpergewebe:

$$E_T = \frac{r}{2} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Über das Ohm'sche Gesetz

$$J_T = \kappa \cdot E_T \quad (2.8)$$

wird, speziell für ältere Vorschriften, die Beziehung zwischen der Stromdichte J_T im Körpergewebe und der elektrischen Gewebefeldstärke E_T mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit des Körpergewebes κ hergestellt.

Kernaussage von Gleichung (2.7) ist, dass nur dann ein elektrisches Feld im Körpergewebe induziert wird, wenn sich die magnetische Flussdichte verändert. Ist keine magnetische Flussdichte vorhanden oder besitzt diese einen konstanten Wert, so wird auch im Körpergewebe kein elektrisches Feld induziert.

Die bedeutet, dass zur Bewertung der Induktionswirkung die zeitliche Ableitung der Funktion $B(t)$ näher betrachtet werden muss:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \omega \hat{B} \cdot \cos \omega t \quad (2.9)$$

Die Ableitung und somit auch die Induktionswirkung erreichen ihren maximalen Betrag wenn gilt: $|\cos \omega t| = 1$.

Daraus folgt:

$$\left| \frac{dB(t)}{dt} \right|_{\max} = \omega \hat{B} \quad (2.10)$$

Zusammen mit dem Gewichtungsfaktor V ergibt sich die maximal erlaubte zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte als neuer abgeleiteter Wert:

$$\left| \frac{dB(t)}{dt} \right|_{p,\max} = \omega \hat{B} \cdot V = 2\pi \cdot f_P \cdot \sqrt{2} \cdot B \cdot V \quad (2.11)$$

Dabei stellt \hat{B} den Spitzenwert und B den Effektivwert der magnetischen Flussdichte des gepulsten Signals mit der Frequenz f_P dar.

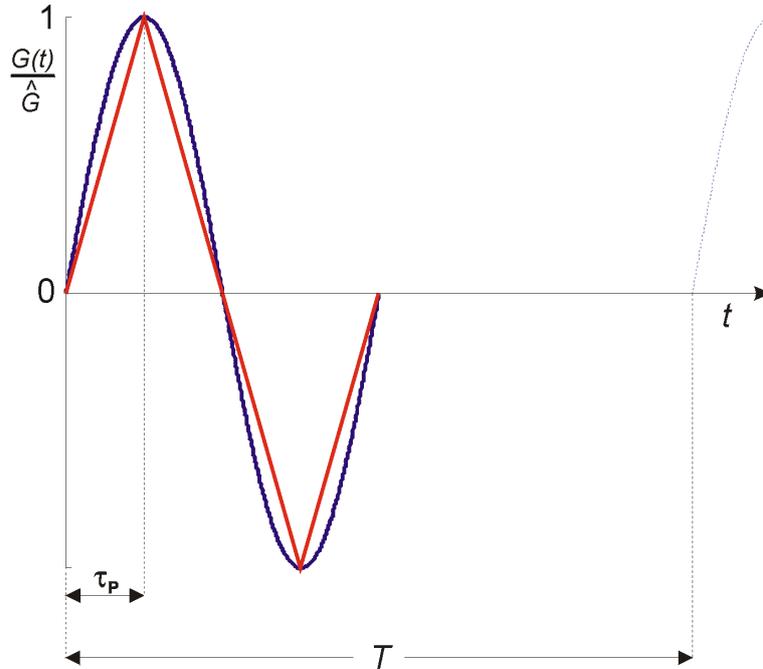


Abbildung 2.5: Definitionen von Kenngrößen zur Beschreibung gepulster Felder bei sinus- oder dreieckförmigen Feldverläufen

Betrachtet man Abbildung 2.5 genauer, so erkennt man, dass die in die Sinuskurve eingeschriebene Dreiecksfunktion die mittlere zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte der ansteigenden und abfallenden Flanken wiedergibt.

Diese mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte, gemittelt über die Zeitdauer τ_P , ergibt sich aus Gleichung (2.11) wenn man diese durch den Faktor $\pi/2$ dividiert:

$$\left| \frac{dB(t)}{dt} \right|_{p, \text{mean}} = \frac{\omega \hat{B} \cdot V}{\pi/2} = 4 \cdot f_P \cdot \sqrt{2} \cdot B \cdot V \quad (2.12)$$

Um die Sicherheit von Beschäftigten in gepulsten Feldern zu gewährleisten ist grundsätzlich die Einhaltung sowohl der durch Gleichung (2.11) maximal erlaubten zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte als auch der durch Gleichung (2.12) erlaubten mittleren zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte erforderlich. Bei sinus-, dreieck-, trapezförmigen und exponentiellen Zeitverläufen der Felder ist es ausreichend nur die Einhaltung der mittleren zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte nach Gleichung (2.12) zu überprüfen, da dann auch die Einhaltung der zulässigen Werte der maximal erlaubten zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte nach Gleichung (2.11) automatisch gewährleistet ist.

Mit Hilfe der Gleichungen (2.11) und (2.12) lassen sich die in den Vorschriften zur Gewährleistung des Schutzes von Beschäftigten bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern [3, 13, 16, 22] festgelegten zulässigen Werte für die magnetische Flussdichte in entsprechende Werte für die maximal und mittlere zulässigen zeitlichen Änderungen der magnetischen Flussdichte überführen.

Viele Richtlinien, Empfehlungen und Vorschriften, auch neueren Datums, geben immer noch, zumindest teilweise, ihre Grenz- oder Basiswerte sowie Referenz- oder zulässige Werte und Auslöseschwellen als Effektivwerte an [3, 13, 16, 22].

Der Effektivwert G einer Größe mit der Zeitfunktion $G(t)$ ist dabei wie folgt definiert:

$$G = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} G^2(t) dt} \quad (2.13)$$

Dabei kann die Integrationszeit T_1 zunächst frei gewählt werden.

Bei periodischen Funktionen wird als Integrationszeit üblicherweise die Periodendauer oder ein Vielfaches davon verwendet. Um den Fehler bei beliebigen Zeitverläufen klein zu halten, sollte die Integrationszeit T_1 nicht zu kurz gewählt werden.

Der Effektivwert nach Gleichung (2.13) bleibt unverändert, wenn man für Puls- oder Signalzeiten τ mit $\tau < T_1$ um einen Faktor $\sqrt{\frac{T_1}{\tau}}$ höhere Werte zulässt. Um den Personenschutz auch bei extrem kurzen Impulsen $\tau \ll T_1$ sicherzustellen, muss der zulässige Wert des Faktors $\sqrt{\frac{T_1}{\tau}}$ nach oben beschränkt werden. Dazu eignet sich der bereits eingeführte maximale Gewichtungsfaktor V_{\max} , wobei stets gilt:

$$V = \begin{cases} \sqrt{\frac{T_1}{\tau}} & \text{für } \sqrt{\frac{T_1}{\tau}} \leq V_{\max} \\ V_{\max} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.14)$$

Die weiteren notwendigen Kenngrößen zur Bewertung gepulster Felder können den Abbildungen 2.5, 2.6 und 2.7 entnommen werden.

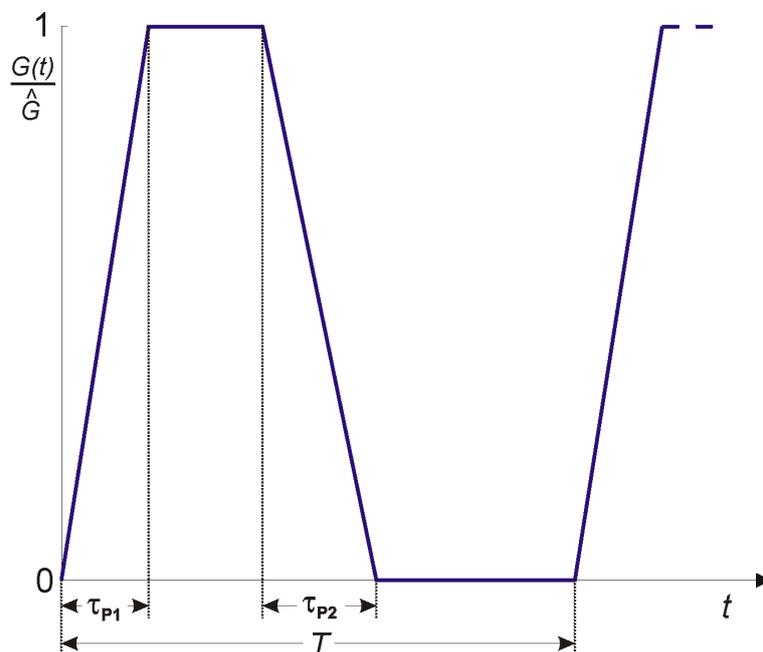


Abbildung 2.6: Definitionen von Kenngrößen zur Beschreibung gepulster Felder bei trapezförmigen Feldverläufen

Anstelle der Größe G sind bei magnetischen Feldern entweder die magnetische Feldstärke H oder die magnetische Flussdichte B einzusetzen. Dabei kennzeichnet $G(t)$ wiederum die Zeitfunktion, während \hat{G} den Spitzenwert beschreibt.

T gibt die zeitliche Dauer eines Impulses oder eines Impulszuges mit anschließender Pause an.

Die Zeitdauer einer Feldänderung wird durch den Parameter τ_P beschrieben. Wie den Abbildungen 2.5 und 2.6 entnommen werden kann, ist dies bei sinus-, dreieck- und trapezförmigen Feldverläufen die Zeit für den Signalanstieg oder -abfall von Null auf den positiven oder negativen Spitzenwert bzw. vom positiven oder negativen Spitzenwert auf Null.

Für exponentielle Feldverläufe ist die Ermittlung von τ_P nach Abbildung 2.7 vorzunehmen. Die Parameter des exponentiellen Feldverlaufs werden dabei so festgelegt, dass er zum Zeitpunkt $t = 0$ die gleiche Steilheit wie ein sinusförmiger Feldverlauf aufweist.

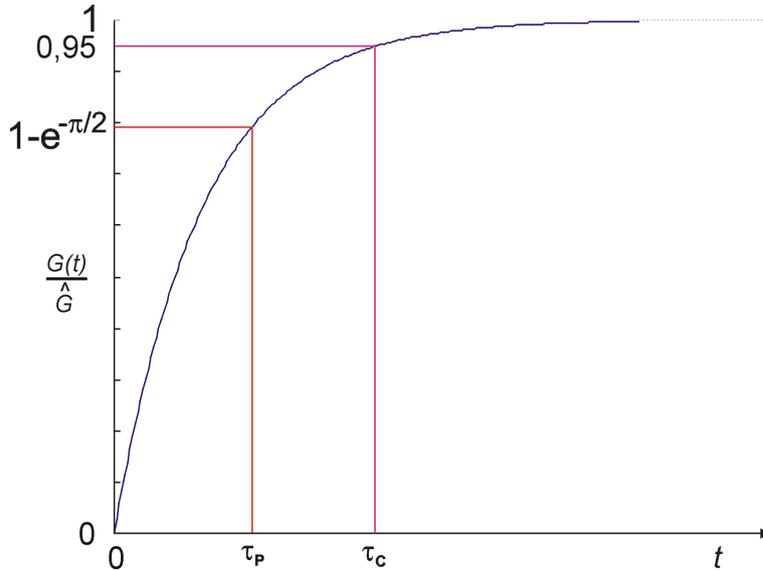


Abbildung 2.7: Definitionen von Kenngrößen zur Beschreibung gepulster Felder bei exponentiellen Feldverläufen

Sind die Zeitdauern τ_{P_i} der positiven und negativen Flanken unterschiedlich, so müssten eigentlich alle unterschiedlichen Zeitdauern in die Bewertung einfließen. Um den Bewertungsaufwand zu minimieren, wird für die weiteren Berechnungen nur der kleinste Wert aller τ_{P_i} herangezogen, da die zulässigen Werte grundsätzlich mit abnehmenden τ_{P_i} , d.h. steigender Frequenz, abnehmen.

$$\tau_{P,\min} = \min_i (\tau_{P_i}) \quad (2.15)$$

Da die zulässigen Werte in einschlägigen Vorschriften und Regeln meist über der Frequenz tabelliert sind, muss dem gepulsten Zeitverlauf noch eine Frequenz zugeordnet werden. Aus Gleichung (2.15) und Abbildung 2.5 ergibt sich die zur Bewertung des gepulsten Vorgangs maßgebende Frequenz zu:

$$f_P = \frac{1}{4 \cdot \tau_{P,\min}} \quad (2.16)$$

Wie der Gleichung (2.7) entnommen werden kann, ergibt sich eine Induktionswirkung nur dann, wenn sich das magnetische Feld ändert. Mit Hilfe der Größe τ_D wird die zeitliche Summe aller Feldänderungen im Zeitintervall T_1 berechnet, wobei Pausen und Gleichfeldanteile außer Betracht bleiben.

$$\tau_D = \begin{cases} \sum_i \tau_{P_i} & \text{für sinus-, dreieck- und trapezförmige Signalverläufe} \\ \sum_i \tau_{C_i} & \text{für exponentielle Signalverläufe} \end{cases} \quad (2.17)$$

Während bei sinus-, dreieck- und trapezförmigen Signalverläufen die notwendigen Größen direkt aus dem Signalverlauf abgelesen werden können, muss bei exponentiellen Signalverläufen die Hilfsgröße τ_C eingeführt werden, da die Exponentialfunktion erst für Zeiten $t \rightarrow \infty$ eine horizontale Tangente und damit keine Änderung über der Zeit mehr aufweist. Der Parameter τ_C wird so festgelegt, dass die Steilheit der Exponentialfunktion auf 5 % ihres Maximalwertes abgeklungen ist, womit auch der Beitrag zu einer etwaigen Stimulationswirkung vernachlässigbar wird.

Die zeitliche Summe aller Feldänderungen τ_D fließt in die Berechnung des Gewichtungsfaktors V ein, so dass sich folgende modifizierte Gleichung (2.14) ergibt:

$$V = \begin{cases} \sqrt{\frac{T_I}{\tau_D}} & \text{für } \sqrt{\frac{T_I}{\tau_D}} \leq V_{\max} \\ V_{\max} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.18)$$

2.2 Spezielle Festlegungen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11

Während die grundlegenden Festlegungen zur Bewertung von gepulsten Feldern dem Abschnitt 2.1 entnommen werden können, fehlen noch konkrete Werte für die Parameter Integrationszeit T_I und maximaler Gewichtungsfaktor V_{\max} . Diese noch fehlenden Größen werden im Folgenden auf Basis der besonderen Randbedingungen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] ermittelt.

2.2.1 Parameter T_I

Frequenzbereich	Effektivwert der elektrischen Stromdichte J in A/m ² ⁽¹⁾	Spezifische Absorptionsrate SAR in W/kg ⁽⁴⁾			Spezifische Absorption für Impulsfelder SA in J/kg ^{(5), (6)}	Leistungsdichte S in W/m ² ^{(7), (8)}
		Ganzkörpermittelwert	Lokale SAR ⁽⁵⁾			
			Kopf und Rumpf	Gliedmaßen		
> 0 – 1 Hz	0,040	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
1 – 4 Hz	0,040 / $f^{(2)}$	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
4 – 1000 Hz	0,010	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
1 – 100 kHz	$f / 100$ ⁽³⁾	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
0,1 – 10 MHz	$f / 100$ ⁽³⁾	0,4	10	20	(-)	(-)
0,01 – 10 GHz	(-)	0,4	10	20	0,01	(-)
10 – 300 GHz	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	50

(1) Über jedes Flächenelement von 1 cm² senkrecht zur Stromrichtung sowie über jedes Zeitintervall von 1 s zu mitteln; (2) f in Hz; (3) f in kHz; (4) Über jedes 6 Minuten-Intervall arithmetisch zu mitteln; (5) Mittelungsmasse 10 g; (6) Trägerfrequenz $f > 300$ MHz und Pulslänge $T < 30$ μ s; (7) Über jedes Flächenelement von 20 cm² und jedes Zeitintervall von jeweils $68/f^{1,05}$ Minuten (f in GHz) zu mitteln; (8) Die maximale örtliche Leistungsdichte gemittelt über jedes Flächenelement von 1 cm² darf 1 kW/m² nicht überschreiten; (-) bei diesen Frequenzen nicht relevant

Abbildung 2.8: Basiswerte für unmittelbare Wirkungen nach Tabelle 1 der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22]

Die Basiswerte der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] zur Vermeidung von Gefährdungen aufgrund von Reizungen von Sinnesorganen, Nerven- und Muskelzellen sowie der Beeinflussung der Herzaktion sind im Frequenzbereich $0 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ MHz}$ als Effektivwerte der elektrischen Stromdichte im Körpergewebe angegeben und in Abbildung 2.8 auszugsweise dargestellt.

Wie der Fußnote (1) in Abbildung 2.8 entnommen werden kann, sind die Effektivwerte der elektrischen Stromdichte im Körpergewebe „über jedes Flächenelement von 1 cm² senkrecht zur Stromrichtung sowie über jedes Zeitintervall von 1 s zu mitteln“.

Die Festlegung der Integrationszeit T_I der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] auf 1 s orientiert sich dabei an dem physiologischen Zeitintervall im Bereich von einigen 10 ms bis einigen Sekunden in denen, vor allem aus Gründen der Störsicherheit und Effizienz des zentralen und peripheren Nervensystems, einzelne Aktionspotentiale vorhanden sein müssen, um weitergeleitet,

wahrgenommen oder entsprechende Aktionen auslösen zu können. Die hierzu notwendigen „integrativen“ Verarbeitungseinheiten finden sich hauptsächlich in den synaptischen Kopplungen oder im Soma der einzelnen beteiligten Nervenzellen [11, 17, 18, 21, 23].

Mit Hilfe dieser Informationen kann die Integrationszeit T_I wie folgt festgelegt werden:

$$T_I = \begin{cases} T & \text{für } T \leq 1 \text{ s} \\ 1 \text{ s} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.19)$$

Wie bereits ausgeführt, gibt T die zeitliche Dauer eines Impulses oder Impulszuges mit anschließender Pause an – siehe auch Abbildungen 2.5 und 2.6. Bei periodischen Vorgängen mit Zeitdauern T bis zu 1 Sekunde ist $T_I = T$, während für nichtperiodische Vorgänge oder periodische Vorgänge mit Zeitdauern T von mehr als 1 Sekunde gilt: $T_I = 1 \text{ s}$. Durch diese Festlegung wird eine nahtlose Integration der Bewertung von kontinuierlichen Dauerstrich-Signalen einer Frequenz in die Bewertung gepulster Felder erreicht, wobei erstere nur einen Spezialfall der umfassenden allgemeinen Betrachtung beliebiger Zeitverläufe darstellen, die mit dem Verfahren der gepulsten Felder bewertet werden können.

2.2.2 Parameter V_{\max}

Um den Schutz von Beschäftigten auch bei Expositionen gegenüber extrem kurzen Pulsen zu gewährleisten, muss der maximale Wert den der Gewichtungsfaktor V annehmen darf nach oben beschränkt werden. Dazu wurde, wie bereits ausgeführt, der maximale Gewichtungsfaktor V_{\max} eingeführt, wobei stets gilt: $V \leq V_{\max}$

Da es im betrachteten Frequenzbereich primär um die Vermeidung von Gefährdungen aufgrund von Reizungen von Sinnesorganen, Nerven- und Muskelzellen sowie der Beeinflussung der Herzaktion geht, ist die Kenntnis der Reizschwellen für periphere Nervenstimulation hilfreich für die Festlegung des maximalen Gewichtungsfaktors V_{\max} .

In Abbildung 3 des ICNIRP-Dokuments [14] wird als Schwellenwert für periphere Nervenstimulation ein dB/dt -Spitzenwert von 31,2 T/s für Frequenzen von bis zu 1 kHz angegeben. Dieser Wert stimmt sehr gut mit experimentellen Messungen des Schwellenwerts für die periphere Nervenstimulation in einem Ganzkörper-MR-System überein, wo Werte im Bereich zwischen 24,3 ... 57,6 T/s in Abhängigkeit von Pulsdauer, Anstiegszeit der Gradienten und Orientierung des magnetischen Feldes relativ zum Körper des Probanden gefunden wurden [20]. Im Gegensatz dazu beträgt der zulässige Spitzenwert für berufliche Exposition gemäß ICNIRP-Statement [14] nur 0,22 T/s, was zu einem „Sicherheitsfaktor“ von mehr als 100 führt.

Auf Grundlage der in den Tabellen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 genannten zulässigen Werte für Expositionen gegenüber magnetischen Feldern ergibt sich ein maximal zulässiger Höchstwert für den maximalen Gewichtungsfaktor im Bereich 15 ... 20, der die Sicherheit von Beschäftigten auch bei Expositionen gegenüber extrem kurzen Pulsen gewährleistet. Im Zuge der Beratung der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 wurde ein maximaler Sicherheitsfaktor $V_{\max} = 8$ festgelegt, wodurch ein „Sicherheitsfaktor“ von mehr als 10 zu einer möglichen Reizwirkung eingehalten wird.

Die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] gibt in Tabelle 14 und 15 die maximal und mittlere zulässige Änderung der magnetischen Flussdichte an. Beide Tabellen sind in den Abbildungen 2.9 und 2.10 hier auszugsweise wiedergegeben.

Frequenzbereich f_p / Hz	Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s	
	Expositionsbereich 1	Bereich erhöhter Exposition 2 h/d
0 – 1	$0,6 \cdot f_p \cdot V$	$1,1 \cdot f_p \cdot V$
1 – 1000	$0,6 \cdot V$	$1,1 \cdot V$
1000 – 48 500	$6 \cdot 10^{-4} \cdot f_p \cdot V$	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot f_p \cdot V$
48 500 – 91 000	$6 \cdot 10^{-4} \cdot f_p \cdot V$	$55 \cdot V^p$

Abbildung 2.9: Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte nach Tabelle 14 der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22]

Frequenzbereich f_p / Hz	Mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s	
	Expositionsbereich 1	Bereich erhöhter Exposition 2 h/d
0 – 1	$0,38 \cdot f_p \cdot V$	$0,72 \cdot f_p \cdot V$
1 – 1000	$0,38 \cdot V$	$0,72 \cdot V$
1000 – 48 500	$3,8 \cdot 10^{-4} \cdot f_p \cdot V$	$0,72 \cdot 10^{-3} \cdot f_p \cdot V$
48 500 – 91 000	$3,8 \cdot 10^{-4} \cdot f_p \cdot V$	$35 \cdot V$

Abbildung 2.10: Mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte nach Tabelle 15 der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22]

3 Anpassung der Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) für „Gepulste Felder“ an die Rahmenbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU

Die Besonderheit der Richtlinie 2013/35/EU [3] liegt darin begründet, dass als Expositionsgrenzwerte sowohl für gesundheitliche als auch sensorische Wirkungen der Spitzenwert der internen elektrischen Feldstärke, d.h. der Spitzenwert der Gewebefeldstärke, festgelegt wird, während für die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz der Effektivwert der magnetischen Flussdichte verwendet wird.

In den Fußnoten der einzelnen Tabellen [3] wird zwar ausgeführt, dass sich Spitzen- und Effektivwerte bei sinusförmigen Vorgängen durch den Faktor $\sqrt{2}$ ineinander umrechnen lassen, jedoch versagt diese Methode bei nicht-sinusförmigen oder gepulsten Vorgängen. Hinsichtlich nicht-sinusförmiger Felder verweisen die Fußnoten der einzelnen Tabellen auf die Expositionsberechnung gemäß Artikel 4 nach der Methode gewichteter Spitzenwerte (Gewichtung im Zeitbereich), wie sie in den in Artikel 14 genannten Leitfäden näher dargelegt ist. Es können aber auch andere wissenschaftlich nachgewiesene und validierte Expositionsberechnungsverfahren herangezogen werden, vorausgesetzt sie führen zu annähernd gleichwertigen und vergleichbaren Ergebnissen [3].

Da bis heute in den in Artikel 14 genannten Leitfäden keine hinreichenden Angaben zur Spezifikation und Anwendung der Methode gewichteter Spitzenwerte enthalten sind und mit dem Bewertungsverfahren „gepulste Felder“ der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] ein wissenschaftlich basiertes und seit über einem Jahrhundert in der Praxis bewährtes Expositionsberechnungsverfahren vorhanden ist, liegt es nahe, dieses an die Randbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU anzupassen.

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.1 beschriebenen physiologischen Grundlagen, insbesondere durch Anwendung der Gleichungen (2.11) und (2.12) können die in Tabelle B2 des Anhang II der Richtlinie

2013/35/EU [3] genannten Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern im Frequenzbereich von 1 Hz ... 10 MHz in maximale und mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte umgerechnet werden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 zusammengefasst.

Frequenzbereich	Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s		
	Niedrige Auslöseschwelle	Hohe Auslöseschwelle	Auslöseschwelle für die Exposition von Gliedmaßen gegenüber einem lokalen Magnetfeld
$1 \text{ Hz} \leq f_P < 8 \text{ Hz}$	$1,8 \cdot V / f_P$	$2,7 \cdot V$	$8 \cdot V$
$8 \text{ Hz} \leq f_P < 25 \text{ Hz}$	$0,2 \cdot V$	$2,7 \cdot V$	$8 \cdot V$
$25 \text{ Hz} \leq f_P < 300 \text{ Hz}$	$0,01 \cdot f_P \cdot V$	$2,7 \cdot V$	$8 \cdot V$
$300 \text{ Hz} \leq f_P < 3 \text{ kHz}$	$2,7 \cdot V$	$2,7 \cdot V$	$8 \cdot V$
$3 \text{ kHz} \leq f_P \leq 10 \text{ MHz}$	$0,001 \cdot f_P \cdot V$	$0,001 \cdot f_P \cdot V$	$0,003 \cdot f_P \cdot V$

Anmerkung: f_P ist die Frequenz in Hertz (Hz)

Tabelle 3.1: Maximal zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte nach Tabelle B2 der Richtlinie 2013/35/EU [3]

Frequenzbereich	Mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in T/s		
	Niedrige Auslöseschwelle	Hohe Auslöseschwelle	Auslöseschwelle für die Exposition von Gliedmaßen gegenüber einem lokalen Magnetfeld
$1 \text{ Hz} \leq f_P < 8 \text{ Hz}$	$1,15 \cdot V / f_P$	$1,7 \cdot V$	$5,1 \cdot V$
$8 \text{ Hz} \leq f_P < 25 \text{ Hz}$	$0,13 \cdot V$	$1,7 \cdot V$	$5,1 \cdot V$
$25 \text{ Hz} \leq f_P < 300 \text{ Hz}$	$6 \cdot 10^{-3} \cdot f_P \cdot V$	$1,7 \cdot V$	$5,1 \cdot V$
$300 \text{ Hz} \leq f_P < 3 \text{ kHz}$	$1,7 \cdot V$	$1,7 \cdot V$	$5,1 \cdot V$
$3 \text{ kHz} \leq f_P \leq 10 \text{ MHz}$	$6 \cdot 10^{-4} \cdot f_P \cdot V$	$6 \cdot 10^{-4} \cdot f_P \cdot V$	$2 \cdot 10^{-3} \cdot f_P \cdot V$

Anmerkung: f_P ist die Frequenz in Hertz (Hz)

Tabelle 3.2: Mittlere zulässige zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte nach Tabelle B2 der Richtlinie 2013/35/EU [3], gemittelt über die Zeitdauer τ_P

Weder die Richtlinie 2013/35/EU [3] noch die in Artikel 14 genannten Leitfäden machen nähere Angaben welche Integrationszeiten zur Bestimmung der Effektivwerte der Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern im Frequenzbereich von 1 Hz ... 10 MHz herangezogen werden sollen. Mit der Aussage des Lopicque'schen Gesetzes, dass Reize unterhalb der Stimulationschwelle nicht wirksam sein können auch wenn sie sehr lange Zeit vorhanden sind und unter Berücksichtigung, dass alle zulässigen Werte einschlägiger Vorschriften zur Gewährleistung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes von Beschäftigten bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern an Arbeitsplätzen diese Stimulationschwelle erheblich unterschreiten [3, 22] und damit keinesfalls ein Aktionspotential auslösen können, ist es unschädlich die in Abschnitt 2.2.1 für die Integrationszeit T_I vorgenommenen Festlegungen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 unverändert zu übernehmen.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 ausgeführt und gleichlautend mit den Festlegungen der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] wird die Integrationszeit T_I wie folgt definiert:

$$T_I = \begin{cases} T & \text{für } T \leq 1 \text{ s} \\ 1 \text{ s} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.1)$$

Dabei gibt T wiederum die zeitliche Dauer eines Impulses oder Impulszuges mit anschließender

Pause an – siehe auch Abbildungen 2.5 und 2.6. Bei periodischen Vorgängen mit Zeitdauern T bis zu 1 Sekunde ist $T_1 = T$, während für nichtperiodische Vorgänge oder periodische Vorgänge mit Zeitdauern T von mehr als 1 Sekunde gilt: $T_1 = 1$ s. Durch diese Festlegung wird, wie bereits ausgeführt, eine nahtlose Integration der Bewertung von kontinuierlichen Dauerstrich-Signalen einer Frequenz in die Bewertung gepulster Felder erreicht.

Bei der Festlegung des maximalen Gewichtungsfaktors V_{\max} ist zu berücksichtigen, dass die Richtlinie 2013/35/EU [3] die Expositionsgrenzwerte als Spitzenwert der internen elektrischen Feldstärke, d.h. der Spitzenwert der Gewebefeldstärke, festlegt und nicht als Effektivwert wie bei der Festlegung der Basiswerte der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11. Da durch die Angabe von Spitzenwerten bei den Expositionsgrenzwerten keine zeitliche Mittelung zulässig ist, muss sehr sorgfältig bei der Festlegung des maximalen Gewichtungsfaktors V_{\max} geprüft werden, dass es nicht zu einer Überschreitung der Expositionsgrenzwerte nach Tabelle A2 des Anhangs II der Richtlinie 2013/35/EU [3] kommt.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen der Richtlinie 2013/35/EU [3] und der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [22] ist, dass die Expositionsgrenzwerte nach Tabelle A2 des Anhangs II der Richtlinie 2013/35/EU im Frequenzbereich bis zu 3 kHz als konstante Werte ausgewiesen werden, während die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 nur im Frequenzbereich bis zu 1 kHz konstante Basiswerte angibt. Diese Erweiterung des Bereichs konstanter Expositionsgrenzwerte in der Richtlinie 2013/35/EU macht eine Anpassung des maximalen Gewichtungsfaktors V_{\max} erforderlich, um den „Sicherheitsfaktor“ nicht unzulässig abzusenken.

Eine grobe Abschätzung des maximal zulässigen Gewichtungsfaktor V_{\max} kann wie folgt vorgenommen werden: Multipliziert man die in Tabelle B2 des Anhangs II der Richtlinie 2013/35/EU [3] als Effektivwerte angegebenen Auslöseschwellen für die magnetische Flussdichte mit dem Faktor $\sqrt{2} \cdot V$ so erhält man den maximal zulässigen Spitzenwert der magnetischen Flussdichte – siehe auch entsprechende Ausführungen in der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 [4], Anlage 1, Abschnitt 3.1. Dieser maximal zulässige Spitzenwert muss, wie bereits ausgeführt, den Grenzwert für die elektrische Gewebefeldstärke nach Tabelle A2, Anhang II der Richtlinie 2013/35/EU einhalten und einen ausreichenden „Sicherheitsfaktor“ gewährleisten. Im Sinne einer Betrachtung des ungünstigsten Falles erhält man für eine Frequenz von 3 kHz nach Tabelle B2 der Richtlinie 2013/35/EU [3] einen Effektivwert für die hohe Auslöseschwelle von $100 \mu\text{T}$ und nach Tabelle A2 der Richtlinie 2013/35/EU [3] einen Spitzenwert für den Expositionsgrenzwert für gesundheitliche Wirkungen von $1,1 \text{ V/m}$. Zum Vergleich gibt der Forschungsbericht FB400 [5] für eine Frequenz von 3 kHz einen Spitzenwert von 2 V/m als Expositionsgrenzwert und einen Spitzenwert von $640 \mu\text{T}$ für das obere Auslöseniveau an. Rechnet man den zulässigen Spitzenwert der magnetischen Flussdichte für das obere Auslöseniveau des Forschungsberichts FB400 auf den Expositionsgrenzwert der Gewebefeldstärke der Richtlinie 2013/35/EU um, so erhält man den Spitzenwert der maximal zulässigen Flussdichte: $640 \mu\text{T} \cdot \frac{1,1 \text{ V/m}}{2 \text{ V/m}} = 352 \mu\text{T}$. Dieser Wert darf nicht überschritten werden, wenn man, wie bereits ausgeführt, den Effektivwert für die hohe Auslöseschwelle von $100 \mu\text{T}$ mit dem Faktor $\sqrt{2} \cdot V$ multipliziert. Löst man die Gleichung $100 \mu\text{T} \cdot \sqrt{2} \cdot V = 352 \mu\text{T}$ nach V auf, so erhält man einen Zahlenwert von etwa 2,5 für den neuen maximal zulässigen Gewichtungsfaktor V_{\max} zur Verwendung im Rahmen der Richtlinie 2013/35/EU [3]. Bei dieser Abschätzung ist zu jedoch beachten, dass alle Werte bereits erhebliche „Sicherheitsfaktoren“ beinhalten und daher der sich ergebende Zahlenwert für den maximal zulässigen Gewichtungsfaktor V_{\max} eine sehr vorsichtige Abschätzung am unteren Ende darstellt.

Unter Berücksichtigung der physiologischen Grundlagen der Stimulation von Nervengewebe [5] konnte durch exakte Berechnungen unter Verwendung von detaillierten anatomischen Körpermodellen [6, 19] der Wert für den maximal zulässigen Gewichtungsfaktor mit $V_{\max} = 2,6$ bestimmt werden, was in guter Übereinstimmung mit der zuvor vorgenommenen groben Abschätzung ist.¹

Damit sind alle Parameter bekannt um das wissenschaftlich basierte und seit über einem Jahrzehnt in der Praxis bewährte Expositionsbewertungsverfahren „gepulste Felder“ der Unfallverhütungs-

¹Die Autorin dankt dem Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Herrn Dr. Alteköster, für die unabhängige Überprüfung der Berechnungen von V_{\max} anhand unterschiedlicher Anwenderbeispiele mit dem Simulationssystem SEMCAD.

vorschrift BGV B11 [22] auch unter den Randbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU [3] weiterhin erfolgreich einsetzen zu können. Das vorgestellte Expositionsbewertungsverfahren wird als „Zeitbereichs-Bewertungs-Methode“ (ZBM) oder im Englischen als „Time-Domain-Assessment-Method“ (TAM) bezeichnet.

Literaturverzeichnis

- [1] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). Official Journal of the European Union L 184, 1 - 9.
- [2] Directive 2008/46/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2008 amending Directive 2004/40/EC on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). Official Journal of the European Union L 114, 88 - 89.
- [3] 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 L 179 vom 29. Juni 2013, S. 1 - 21.
- [4] Berufsgenossenschaftliche Regeln BGR B11 (DGUV Regel 103-013): Elektromagnetische Felder. Sankt Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 2001.
- [5] Börner, F.; Brüggemeyer, H.; Eggert, S.; Fischer, M.; Heinrich, H.; Hentschel, K.; Neuschulz, H.: Forschungsbericht FB400 — Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz – Ein neuer wissenschaftlicher Ansatz für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten. Bonn: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2011.
- [6] Christ, A.; Kainz, W.; Hahn, E.G.; Honegger, K.; Zefferer, M.; Neufeld, E.; Rascher, W.; Janka, R.; Bautz, W.; Chen, J.; Kiefer, B.; Schmitt, P.; Hollenbach, H.-P.; Shen, J.; Oberle, M.; Szczerba, D.; Kam, A.; Guag, J.W.; Kuster, N.: The Virtual Family – Development of Anatomical CAD Models of Two Adults and Two Children for Dosimetric Simulations. Phys. Med. Biol. 55(2010), p. 23 - 38.
- [7] Feynman, R.P.; Leighton, R.B.; Sands, M.: The Feynman lectures on physics – the definitive edition (volumes I – III incl. tips on physics). Reading: Addison-Wesley, 1977.
- [8] Havel, W.J.; Nyenhuis, J.A.; Bourland, K.S.; Foster, L.A.; Geddes, G.P.; Waninger, M.S.; Schaefer, D.J.: Comparison of rectangular and damped sinusoidal dB/dt waveforms in magnetic stimulation. IEEE Trans. on Magnetics 33 (1997), 4269 - 4271.
- [9] Heinrich, W.: Wirkung und Bewertung gepulster elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder. Publikationsreihe – Fortschritte im Strahlenschutz. Köln: TÜV; 1999: 1031–1038.
- [10] Heinrich, W.: Effects and assessment of pulsed electric, magnetic and electromagnetic fields. 22nd annual meeting of the Bioelectromagnetic Society (BEMS). Frederick, MD: BEMS; 2000: 59 - 60.

- [11] Hille, B.: Ion Channels of Excitable Membranes. Sunderland: Sinauer Associates, 2001.
- [12] International Radiation Protection Association / International Non-Ionizing Radiation Committee: Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields. Health Physics 58 (1990), 113 - 121.
- [13] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics 74 (1998), 494 - 522.
- [14] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed and Complex Non-sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines. Health Physics 84 (2003), 383 - 387.
- [15] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Physics 96 (2008), 504 - 514.
- [16] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics 99 (2010), 818 - 836.
- [17] Lapicque, L.: Recherches quantitatives sur l'excitation électrique des nerfs traitée comme une polarisation. J. Physiol. Paris 9 (1907), p. 620 - 635. (In Französisch)
- [18] Lapicque, L.: Definition experimentale de l'excitabilité. Soc. Biologic 77 (1909), p. 280 - 283. (In Französisch)
- [19] National Library of Medicine: The Visible Human Project[®]. Bethesda: National Library of Medicine, 1994.
- [20] Nyenhuis, J.A.; Bourland, J.D.; Kildishev, A.V.; Schaefer, D.J.: Health effects and safety of intense gradient fields. In: Magnetic Resonance Procedures – Health Effects and Safety. Boca Raton: CRC Press, 2001, p. 31 - 54.
- [21] Plonsey, R.; Barr, R.: Bioelectricity – A Quantitative Approach. New York: Springer, 2007.
- [22] Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 (DGUV Vorschrift 15): Elektromagnetische Felder. Sankt Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 2001.
- [23] Weiss, G.: Sur la possibilité de rendre comparables entre les appareils servant a l'excitation électrique. Arch. Ital. Biol. 35 (1901), p. 413 - 446. (In Französisch)

Zugehörigkeiten

Alteköster, C.

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin

Börner, F.

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin

Brüggemeyer, H.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Hildesheim

Eggert, S.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Berlin (i.R.)

Fischer, M.

Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln

Heinrich, H.

2h-engineering & -research, Hausen

Joosten, S.

Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln

Mischke, M.

Landesamt für Arbeitsschutz (LAS), Potsdam

Mohr, D.

Landesamt für Arbeitsschutz (LAS), Potsdam

Neuschulz, H.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Berlin

Schreiber, M.

Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr (BAIUDBw), Bonn

Udovicic, L.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund

Danksagung

Die in diesem Bericht vorgestellte wissenschaftliche Arbeit wurde vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales der Bundesrepublik Deutschland unterstützt und finanziert.

Impressum:

Herausgeber: Bundesministerium für Arbeit und Soziales
Referat Information, Publikation, Redaktion
53107 Bonn

Stand: Mai 2015

Artikel-Nr.: FB 457

E-Mail: info@bmas.bund.de

Internet: <http://www.bmas.bund.de>

Umschlaggestaltung/Druck: Grafischer Bereich des BMAS

**Die Durchführung der Untersuchungen sowie die
Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen sind von
den Auftragnehmern in eigener wissenschaftlicher
Verantwortung vorgenommen worden.
Das Bundesministerium für Arbeit und Soziales übernimmt
insbesondere keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit
und Vollständigkeit der Untersuchungen.**

Der Umwelt zuliebe gedruckt auf 100 % Recyclingpapier.