

02.20

In Kooperation mit:



71. Jahrgang
Februar 2020
ISSN 2199-7330
1424

sicher ist sicher

www.SISdigital.de

Arbeitssicherheit

Fachliche Grundlagen

Von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl
Fortgesetzt von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. em. Günter Lehder
Begründet von Univ.-Prof. Dr.-Ing. em. Reinald Skiba
2019, XXII, 740 Seiten, mit zahlreichen farbigen Abbildungen und Tabellen,
fester Einband, € (D) 69,90, ISBN 978-3-503-17120-0

www.ESV.info/17120



Revision der Maschinenrichtlinie 67
Schnellwechseleinrichtungen 72

Bewertungsverfahren für
gepulste magnetische Felder 77

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG



FLORIAN SOYKA

Bewertungsverfahren für gepulste magnetische Felder im Vergleich (Teil 1 von 2)

Hohe elektrische Ströme erzeugen starke Magnetfelder, zum Beispiel beim Widerstandsschweißen. Um die Sicherheit am Arbeitsplatz gewährleisten zu können, müssen diese Magnetfelder im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung bewertet werden. Immer häufiger handelt es sich um leistungsgeregelte, gepulste Felder, für deren Bewertung spezielle Methoden nötig sind. Im Beitrag werden zwei solche Methoden verglichen und es werden Probleme diskutiert, welche in der Praxis beim Messen und Bewerten auftreten können.

Teil 1 dieses Beitrags stellt die Bewertungsmethoden für gepulste magnetische Felder allgemein vor. In Teil 2 wird auf die Unterschiede zwischen Zeitbereichsmethode (ZBM) und Weighted Peak Method (WPM) sowie auf die Schwierigkeiten bei vollautomatischer Messung und Bewertung eingegangen.

Einleitung

Magnetische Felder entstehen überall dort wo ein elektrischer Strom fließt. Dank moderner Regelungstechnik lässt sich der zeitliche Verlauf des Stroms dabei an den Bedarf der Anwendung anpassen. Hierbei treten immer häufiger nicht sinusförmige, gepulste Stromverläufe auf. Ein klassisches Beispiel für eine solche Anwendung

ist das Widerstandsschweißen (siehe Titelbild). Hierbei können verschiedene Verfahren zur Leistungsregelung zum Einsatz kommen, zum Beispiel phasenangeschnittene Wechselstromimpulse (Pulsweitenmodulationsverfahren), Kondensatorentladungsströme mit exponentiellen Stromverläufen oder Gleichströme aus Inverterquellen (mit überlagerten Welligkeiten aufgrund

der Schaltfrequenz des Wechselrichters). All diese Anwendungen erzeugen niederfrequente, nicht sinusförmige Magnetfelder, welche im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung bewertet werden müssen. Die Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV, [1]) schreibt für diese Bewertungen Verfahren im Zeitbereich nach dem Stand der Technik vor. Aktuell befinden sich zwei Methoden im Einsatz, die Zeitbereichsmethode (ZBM) nach DGUV Vorschrift 15 [2, 3, 4, 5] und die Weighted Peak Method (WPM) [6, 7, 8]. Beide Methoden werden in diesem Artikel generell beschrieben und ihre Vorzüge bzw. Nachteile in der Anwendung erläutert.

Bewertungsmethoden für nicht sinusförmige zeitliche Feldverläufe

Die zulässigen Expositionswerte (Auslöseschwellen) für elektromagnetische Felder (EMF) sind für kontinuierliche Sinusschwingungen festgelegt [1]. Dabei sind die Auslöseschwellen als maximal zulässige Amplituden definiert und

Die Plausibilisierung der Messung, der Messwerte und der Bewertung durch einen Fachkundigen ist immer zu empfehlen.

hängen von der Frequenz der Schwingung ab. Für viele Anwendungen ist dies ausreichend. Jedoch kommen immer mehr Anwendungen zum Einsatz, die Felder mit nicht sinusförmigen Signalverläufen emittieren.

Für die Bewertung von gepulsten Signalen (enthalten Pausenzeiten) mit beliebigen zeitlichen Verläufen $g(t)$ benötigt es deshalb Methoden, welche es erlauben die einzelnen Frequenzanteile des Signals zu beurteilen, um eine unzulässige Exposition am Arbeitsplatz zu vermeiden. Im Folgenden werden zuerst die Grundlagen und Unterschiede der Methoden zusammengefasst, bevor danach in der Praxis auftauchende Schwierigkeiten näher beschrieben werden.

Die Zeitbereichsmethode

Die ZBM ermöglicht es einen bereits gemessenen Signalverlauf mit vertretbarem Aufwand manuell zu bewerten, wobei ‚manuell‘ bedeutet, dass kein computergestütztes Berechnungstool für die Bewertung benötigt wird. Dies war bei der Einführung der Methode im Jahr 2001 ein wichtiges Merkmal. Das Nutzsignal $g(t)$, welches einen beliebigen zeitlichen Verlauf haben kann, wird zerlegt und mittels vier Grundtypen: Sinus-, Trapez-, Dreiecks-, oder exponentielle Pulse nachgebildet. Neben der Amplitude wird auch die maximale Steigung von $g(t)$ auf die Grundtypen übertragen. Aus den Parametern der Grundtypen

lässt sich ein kontinuierliches, sinusförmiges Signal mit einer Äquivalenzfrequenz und Amplitude ableiten, welches eine vergleichbare Reizwirkung wie das Nutzsignal hat. Durch diese Überführung von $g(t)$ in kontinuierliche, sinusförmige Signale kann der Vergleich zu den Auslöseschwellen problemlos durchgeführt werden [3]. Eine ausführliche Schritt-für-Schritt Anleitung der ZBM mit Beispielen ist in der DGUV Information 203-038 enthalten [5].

Wie der langjährige Einsatz der Methode gezeigt hat, ließen sich mit diesen Grundtypen bisher alle in der Praxis vorkommenden Felder bewerten. Besteht das Signal aus einer Überlagerung von mehreren Grundtypen, so werden auch mehrere Äquivalenzfrequenzen extrahiert und einzeln bewertet. Aufgrund der physiologischen Grundlagen der Nervenreizung, kommt es nicht zu einer additiven Überlagerung der Reize [9]. Daher müssen die zerlegten Signalanteile einzeln bewertet werden. Für die Expositionsbewertung ist im Endeffekt nur der Anteil des Signals relevant, welcher, in Bezug auf die Auslöseschwellen, am stärksten reizwirksam ist.

Eine ähnliche Methode, welche auch eine Äquivalenzfrequenz extrahiert und auf Basis dieser das Signal bewertet, wurde 2002 von Reilly und Diamant beschrieben [10]. Dort werden die körperinternen elektrischen Feldstärken betrachtet, während bei der Anwendung der ZBM die externen magnetischen Felder beurteilt werden. Der Bezug zwischen internen und externen Feldern kann über ein Koppelungsmodell hergestellt werden [9]. Im Arbeitsschutz werden externe magnetische Felder zur Bewertung herangezogen, da sie, im Gegensatz zu den körperinternen elektrischen Feldstärken, direkt am Arbeitsplatz messbar sind.

Die manuelle Auswertung des Signals führt zu impliziten Auswirkungen, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll. Der Fachkundige erkennt durch seine Erfahrungen Muster im Nutzsignal. Im direkten Vergleich zu einer computergestützten Auswertung übernimmt er die Funktion eines Filters. Er entscheidet welcher Signaltyp vorliegt und kann, zum Beispiel, leichtes Rauschen oder Messartefakte vergleichsweise einfach identifizieren und auf Relevanz bewerten. Zusammen mit dem Hintergrundwissen über die Funktionsweise der zu bewertenden Anlage, hat er die Möglichkeit das Signal zu plausibilisieren. D.h. im besten Fall weiß er welche Signalform (z.B. Anzahl der Impulse, Phasenanschnitt, Pausenzeiten) zu erwarten ist und kann dieses Wissen bei der Auswertung mit einfließen lassen. Einerseits entsteht durch die manuelle Auswertung Potenzial für Fehler und es kommt ein subjektiver Anteil in die Bewertung. Andererseits ist die Plausibilisierung der Bewertung direkter

Bestandteil des Prozesses und daher wird die Gefahr reduziert, dass unbemerkte Messartefakte jeglicher Art zu unrealistischen Bewertungen führen.

Unserer Erfahrung nach hat sich gezeigt, dass Messartefakte nicht zu vernachlässigende Faktoren darstellen, welche gerade bei vollautomatisierten Bewertungsprozessen zu falschen Bewertungen führen können (siehe Abschnitt „Messsonden“). Daher ist die Plausibilisierung der Messung, der Messwerte und der Bewertung durch einen Fachkundigen immer zu empfehlen.

Aufgrund der manuellen Vorgehensweise kann es bei der Auswertung einer Messung durch verschiedene Personen zu einer geringen Variabilität im Ergebnis kommen, die zum Beispiel auf die individuelle Ablesegenauigkeit von Werten zurückgeführt werden kann. In der Praxis sind diese Variationen vernachlässigbar, da in den Auslöseschwellen Sicherheitsfaktoren mit einberechnet sind, welche die hier zu erwartenden Messunsicherheiten tolerieren können. Zudem werden im Arbeitsschutz immer umsetzbare Maßnahmen ergriffen, die für den Anwender einfach handhabbar sind und weitere Sicherheitsfaktoren beinhalten können. Gilt es zum Beispiel Sicherheitsabstände zur Feldquelle einzuhalten, werden diese im Regelfall aufgerundet um ein einfaches Maß zu erhalten. Dadurch ergibt sich oft ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor.

Weighted Peak Method

Bereits in dem 1998er Leitfaden der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) findet sich die Aussage, dass für gepulste, niederfrequente Felder eine Fourier Analyse durchgeführt werden kann, um dann das Frequenzspektrum anhand der Referenz Level (zulässige Werte) und einer Summationsformel zu bewerten [11]. Hierbei handelt es sich um eine konservative Bewertungsmethode, da die Addition der Einzelbewertungen für die verschiedenen Frequenzanteile nicht immer nötig ist. In dem Leitfaden wird hierzu explizit erwähnt, dass die Additivität der Reizwirkung bei mehreren Frequenzen zu prüfen ist. Allerdings wird nicht erklärt wie dies getan werden kann. Unter anderem ist dafür der physiologische Vorgang der Nervenstimulation zu betrachten, welcher im Allgemeinen nicht einfach zu analysieren ist. Daher wurden Bewertungen meist unter der konservativen Annahme der Additivität durchgeführt.

Im Jahr 2003 publizierte ICNIRP eine Stellungnahme, in welcher dann die Idee der Weighted Peak Method eingeführt wird [6]. Zuerst wird anerkannt, dass der Einsatz der vorher beschriebenen Summationsformel sehr konservative Ergebnisse liefert. Daher ist diese Methode wahrscheinlich bei kritischen Expositionssituationen

nicht praxistauglich, da es zum Beispiel zur Forderung von zu großen Sicherheitsabständen kommen kann. Die WPM wird dann als Alternative beschrieben, wobei die komplexwertigen Frequenzkomponenten des Signals mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert werden, welcher frequenzabhängig ist und sowohl die Verstärkung als auch die Phasenlage anpasst. Dabei wird also im Gegensatz zur ursprünglichen Summationsformel die Phasenlage der Komponenten mitberücksichtigt, aber gleichzeitig auch angepasst. Die Methode ist also weiterhin additiv, aber berücksichtigt die Phasenbeziehungen. Der Realteil des Gewichtungsfaktors ist als die reziproke Auslöseschwelle definiert. Somit werden die Frequenzkomponenten quasi frequenzabhängig auf die Auslöseschwellen normiert. Werden die so gewichteten Einzelkomponenten wieder zu einem Gesamtsignal im Zeitbereich zusammengesetzt, kann aus dem Maximum der Beträge des Signals der sogenannte Exposure Index (EI) gewonnen werden [8]. Liegt der EI zwischen 0% und 100% ist die Exposition zulässig; oberhalb von 100% liegt eine Überschreitung der Auslöseschwellen vor.

Im Folgenden wird sich zeigen, dass es für die Plausibilisierung der WPM Bewertung von Vorteil ist, den zeitlichen Verlauf des gewichteten Signals $h(t)$ zu kennen. Die Berechnungsschritte sind also wie folgt:

$$EI = \max(|h(t)|) = \max(|WPM(g(t))|)$$

wobei der Schritt $h(t) = WPM(g(t))$ die Gewichtung beschreibt. Im weiteren Verlauf wird $h(t)$ als gewichtetes WPM Signal bezeichnet, aus welchem dann mittels Betrags- und anschließender Maximalwertbildung der Exposure Index berechnet werden kann.

Es ist anzumerken, dass die WPM auch für polarisierte, räumlich dreidimensionale Signale anwendbar ist. Wohingegen die ZBM nur für 1-dimensionale Signale definiert ist. In den meisten praktischen Anwendungsfällen lässt sich das gemessene, räumlich dreidimensionale Signal mittels einer Koordinatentransformation jedoch 1-dimensional darstellen.

In der ICNIRP Stellungnahme von 2003 wird weiterhin beschrieben, dass die Umsetzung und Anwendung der WPM entweder in Form eines Filters, welcher die definierte Übertragungsfunktion nachbildet, direkt in einem Messgerät erfolgen kann, oder dass sie nach der Messung rechnerisch über eine Fourier Analyse angewendet werden kann. Weiterhin wird anerkannt, dass es Unterschiede in der Bewertung geben kann, abhängig davon, ob die WPM als Filter implementiert ist (kontinuierliche Variation der reziproken Referenzlevel und Phasenfaktoren), oder ob die

DER AUTOR



Dr. Florian Soyka

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sachgebiet Elektromagnetische Felder, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) Fachbereich Unfallprävention: Digitalisierung – Technologien, Referat Maschinensicherheit, Industrial Security und Implantate
florian.soyka@dguv.de

abschnittsweise definierten Werte verrechnet werden (Abbildung 1). Die kontinuierliche Variation entspricht eher den physiologischen Grundlagen, welche zur Bewertung der Felder herangezogen werden. Diese Unterschiede werden auch im Anhang des unverbindlichen ICNIRP Leitfadens von 2010 nochmal explizit beschrieben [7] und Abweichungen von bis zu 3 dB (Faktor 2) im Gewichtungsfaktor und bis zu 90 Grad im Phasenfaktor werden dort explizit toleriert. Damit wird der Einsatz von Filterelementen ermöglicht und somit eine automatische Auswertung prinzipiell vereinfacht. Dies zeigt, dass es mehr als eine Möglichkeit gibt den WPM Ansatz umzusetzen. Daher ist es wichtig genau zu definieren, wie die WPM im Einzelfall angewendet wird, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Die Unterschiede zwischen der WPM Implementierung im Zeit- und im Frequenzbereich werden im Leitfaden der EU im Anhang D3 dargestellt [8]. Laut der EMF Verordnung muss die WPM zur Bewertung im Zeitbereich implementiert werden [1]. Allerdings finden sich in der EMF Verordnung keine Aussagen zu den Abweichungen im Gewichtungsfaktor von den tabellarischen Werten oder zu weiteren Details wie die WPM genau angewendet werden soll.

Die Problematik des Fehlens einer genauen Spezifikation und einer Referenzimplementierung der WPM im Zeitbereich auf Basis der EMF Verordnung wurde in Experten Arbeitsgruppen thematisiert. Es wurde vorgeschlagen die 3 dB Abweichungen von den Auslöseschwellen durch das Hinzufügen von Peak-Filtern zu verringern.

Da die WPM Bewertung vergleichsweise leicht zu automatisieren ist, bietet es sich an, die Methode direkt in ein Messgerät zu integrieren. In diesem Fall sind die Prozesse Messung und Bewertung nicht mehr getrennt zu betrachten, wie z. B. bei der ZBM, sondern es müssen auch Anforderungen an die Qualität der Messergebnisse gestellt werden, um sicherstellen zu können, dass die anschließende, automatisierte Bewertung sinnvoll durchgeführt werden kann. Daher wurde in der Arbeitsgruppe auch über die Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Analog-Digital Wandler und die Magnetfeldsensoren in Messgeräten diskutiert, da es, aufgrund des hohen zu erfassenden Dynamikbereichs¹, zu erheblichen Problemen bei der Verarbeitung von Rauschen in den Signalen kommen kann (siehe Abschnitt „Rauschen“). Ähnliche Überlegungen wurden auch von Herstellern von Messgeräten schon publiziert [12]. Dies zeigt, dass die Implementierung der WPM keinesfalls trivial ist. Für den Benutzer eines Messgerätes mit integrierter WPM Bewertung ist die Anwendung sehr einfach, da letztendlich nur der Exposure Index in Prozent angezeigt wird, was dann über die Bewertung entscheidet. Die gesamte dahinterliegende Komplexität ist dem Nutzer jedoch verborgen und Implementierungsdetails werden meist nicht in der erforderlichen Tiefe veröffentlicht bzw. können nur schwer nachvollzogen werden. Daher ist das Potenzial für Fehlbewertungen hoch, da der Nutzer den gesamten Mess- und Bewertungsvorgang nicht plausibilisieren kann. Auf diese Problematik wird weiter unten im Detail eingegangen.

Die hier im Artikel zum Einsatz kommende WPM Implementierung wurde in MATLAB/SIMULINK umgesetzt. Als Filter werden die Continuous Transfer Functions mit den in der EMF Verordnung spezifizierten Werten genutzt. Die Berechnungen werden mit einer festen Schrittweite von einer 1 µs (1 MHz) ausgeführt, was auch der Abtastzeit der Signale entspricht. Eine weitere WPM Implementierung wurde mittels digitaler Filter in einem Oszilloskop umgesetzt und zur Erarbeitung der hier vorgestellten Ergebnisse genutzt.

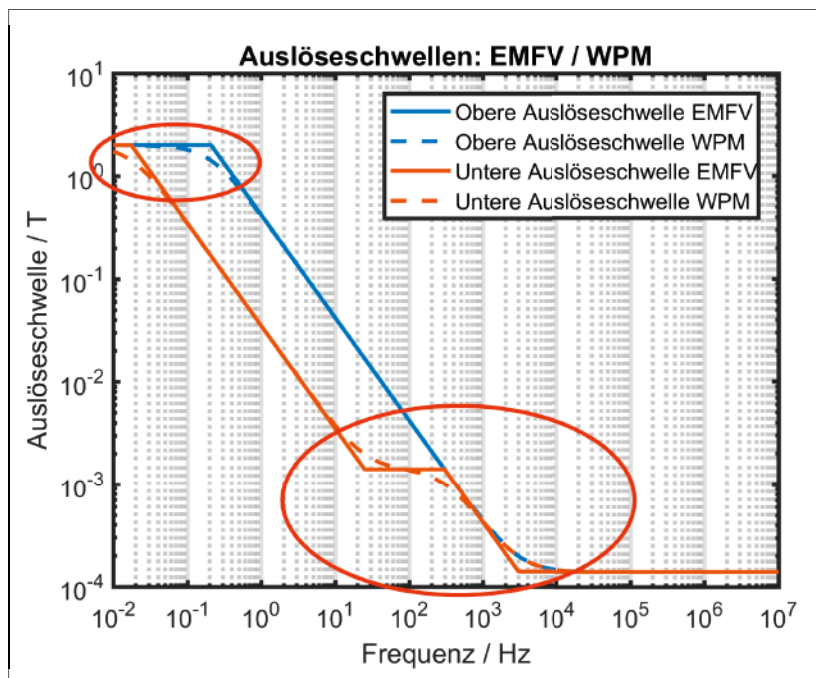


Abb. 1: Unterschiede in den Auslöseschwellen zwischen der EMF Verordnung und der WPM Berechnung. Im Bereich der Knickstellen der abschnittsweise linear definierten Auslöseschwellen der EMF Verordnung, kann es bei der WPM zu Abweichungen bis zu 3 dB (Faktor 2) kommen.

¹ Ein Messgerät sollte Amplituden im Bereich von µT bis T bei Frequenzen zwischen 0 und 400 kHz erfassen können, um den Großteil des Niederfrequenzbereichs bewerten zu können. Die WPM kann auch in höheren Frequenzbereichen eingesetzt werden, in der Praxis endet aber der Messbereich meist im kHz Bereich.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Arbeit und Soziales, „Arbeitschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV)“, 2016.
- [2] DGUV, Vorschrift 15, 2001.
- [3] H. Heinrich, „Assessment of Non-Sinusoidal Pulsed or Intermittent Exposure to Low Frequency Electric and Magnetic Fields“, Health Physics, Bd. 92, pp. 541–546, 2007.
- [4] Hannah Heinrich, E. M. F.-Expertengruppe des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales, „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,“ 2015.
- [5] DGUV, DGUV Information 203-038 (BGI 5011): Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweiß-einrichtungen, 2006.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, „Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed and Complex Non-Sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines,“ Health Physics, Bd. 84, pp. 383-387, 3 2003.
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz TO 100 kHz),“ Health Physics, Bd. 99, 2010.
- [8] Europäische Kommission, „Nicht verbindlicher Leitfaden mit bewährten Verfahren im Hinblick auf die Durchführung der Richtlinie 2013/35/EU Elektromagnetische Felder Band 1: Praktischer Leitfaden,“ 2014.
- [9] Hannah Heinrich, E. M. F.-Expertengruppe des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales, „Forschungsbericht 400-D Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz,“ 2011.
- [10] J. P. Reilly und A. M. Diamant, „Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines--part II: non sinusoidal waveforms,“ Health physics, Bd. 83, Nr. 3, pp. 356-365, 9 2002.
- [11] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz),“ Health Physics, Bd. 74, p. 494–522, 1998.
- [12] H. Keller, „The Weighted Peak Method in the Time Domain Compared With Alternative Methods for Assessing LF Electric and Magnetic Fields,“ Health Physics, Bd. 113, pp. 54–65, 7 2017.