

Zusammenfassung des Messprojektes der Firma Narda Safety Test Solutions und dem Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

Die EU-Richtlinie 2013/35/EU zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder wurde in Deutschland durch die Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV) in nationales Recht umgesetzt. Nach §4 Abs. 3 EMFV können im Niederfrequenzbereich „als Bewertungsverfahren bei nicht sinusförmigen oder gepulsten elektromagnetischen Feldern Verfahren zur Bewertung im Zeitbereich nach dem Stand der Technik wie die Methode der gewichteten Spitzenwerte“ (WPM) angewendet werden. Die WPM wurde erstmals im ICNIRP Statement 2003 beschrieben. Die seit 2001 in der DGUV Vorschrift 15 (vormals BGV B11) beschriebene Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) wurde 2015 an die Rahmenbedingungen der Richtlinie 2013/35/EU angepasst. Unter anderem wurde der maximal zulässige Gewichtungsfaktor der ZBM von $V_{\max}=8$ auf $V_{\max}=2,6$ reduziert (Kap. 3 Forschungsbericht 457 des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales). Die ZBM steht somit weiterhin als alternative Methode zur WPM zur Verfügung. Seit ihrer Veröffentlichung 2001 wird diese Methode in Deutschland in der Praxis des Arbeitsschutzes angewendet.

Ziel des Projekts war der objektive Vergleich der beiden Bewertungsmethoden (WPM und ZBM) auf der Basis von Messung realer und künstlich erzeugter Magnetfelder und die Quantifizierung möglicher Abweichungen. Für die Messungen wurden das Messgerät ELT-400 von Narda Safety Test Solutions und das C.A 42 der Firma Chauvin Arnoux verwendet. In dem ELT-400 ist die Methode gewichteter Spitzenwerte im Zeitbereich implementiert, welche den Expositionsindex¹ und somit den Grad der Grenzwertausschöpfung direkt anzeigt. Die Berechnung der Grenzwertausschöpfung muss sich an nationalem Recht orientieren, d. h. in Deutschland an den in der EMFV definierten Auslöseschwellen. Bei der Implementierung der WPM im Zeitbereich mit Gewichtungsfaktoren ist es akzeptiert, dass die Verstärkung um bis zu 3 dB und die Phasenverschiebung um bis zu 90° von einer stückweise linearen Übertragungsfunktion abweicht². Im Folgenden werden Messergebnisse dieses Gerätes der Einfachheit halber generell als „WPM Ergebnisse“ bezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass diese Methode auch als „WPM im Frequenzbereich“ implementiert werden könnte, dieses jedoch deutlich höhere Anforderungen an die Implementierung stellt. Das C.A 42 wurde für die Messung der Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte \hat{B}_{\max} und für die Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs des Feldes verwendet. Spitzenwert und Zeitverlauf sind die Basisdaten zur Auswertung nach der ZBM. Der Zeitverlauf des Feldes wurde teilweise auch mit einer Hallsonde und indirekt, über den zeitlichen Stromverlauf, mit einer Rogowskispule gemessen.

Folgende Signalformen wurden mit beiden Methoden bewertet.

- computergenerierte kontinuierliche monofrequente Sinussignale
- 50 Hz Sinussignal mit Phasenanschnitt einer Punktschweißanlage (gemessen)
- 2 unterschiedliche Invertersignale von Punktschweißanlagen (gemessen)
- Sowie weitere Signale, die anhand von Messdaten am Computer generiert wurden

Monofrequente Sinussignale

Obwohl beide Methoden mit dem Schwerpunkt auf der Bewertung nicht sinusförmiger oder gepulster elektromagnetischer Feldern entwickelt wurden, sollte aus Kontinuitätsgründen ein stetiger Übergang zur Bewertung kontinuierlicher monofrequenter Sinussignale gewährleistet

¹ Der Expositionsindex gibt die festgestellte Exposition dividiert durch die Auslöseschwelle wieder. Ist der Expositionsindex kleiner als eins, wird die Auslöseschwelle für die Exposition eingehalten. [EU Leitfaden, Band 1]

² Siehe ICNIRP Leitfaden 2010 und Leitfaden der EU Richtlinie 2013

sein. Bei der ZBM wird dies dadurch erreicht, dass der Gewichtungsfaktor V für diesen Fall den Wert 1 annimmt. Bei der WPM im Zeitbereich werden die stückweise linearen Auslöseschwellen durch Filter erster Ordnung nachgebildet. Prinzipbedingt führt dies im Bereich der Knickstellen der Auslöseschwellen zu Abweichungen von bis zu 3 dB. Derartige Abweichungen an den Knickstellen könnten bei Kenntnis der Signalfrequenz als Korrektur berücksichtigt werden. Für Signale, deren Frequenz nicht im Bereich der Knickstellen liegt, liefern beide Methoden, bis auf vernachlässigbare Unterschiede, gleiche Bewertungen.

Punktschweißanlage - 50 Hz Sinussignal mit Phasenanschnitt

Bei der Zeitverlaufsaufzeichnung des Magnetfelds zeigten sich deutliche Signalverzerrungen, die durch die Hochpass-Filter der Messgeräte und die Grenzfrequenzen der Sonden hervorgerufen wurden und nicht den realen Verlauf des Magnetfelds wiedergaben. Dies stellt ein grundsätzliches Problem bei der Messung eines Signals mit Gleichfeldanteilen (z.B. Phasenanschnitt) mittels einer Wechselfeldsonde dar und fällt umso stärker ins Gewicht, je höher die untere Bandgrenze des Messgerätes ist. Daher sollte das Zeitsignal aus einer Schweißstrommessung mit einer Rogowskispule gewonnen werden oder eine Kombination aus Messgerät und Sonde mit geringer Grenzfrequenz verwendet werden. Es ist vorteilhaft das Signal visuell zu inspizieren und mit dem zu erwartenden Signal zu vergleichen, bevor man es bewertet, um solche potentiellen Messartefakte festzustellen. Bei der Auswertung mit der ZBM ergab sich ein Gewichtungsfaktor von $V=1,97$. Der mittels ZBM gewonnene Expositionsindex lag um 6,2 dB (Faktor 2) niedriger als das Ergebnis der WPM Bewertung basierend auf der hohen Auslöseschwelle. Setzte man den Gewichtungsfaktor auf $V=1$, wäre die Übereinstimmung beider Methoden mit nur 0,27 dB Differenz sehr gut.

Punktschweißanlagen – Invertersignale

Bei der Auswertung mittels ZBM ergab sich bei beiden untersuchten Schweißanlagen ein Gewichtungsfaktor von $V=2,6$. Das Ergebnis der ZBM Bewertung lag um 8 dB (Faktor 2,5) bzw. 9 dB (Faktor 2,8) niedriger als das Ergebnis der WPM Bewertung basierend auf der hohen Auslöseschwelle. Setzte man den Gewichtungsfaktor auf $V=1$, wäre die Übereinstimmung beider Methoden mit nur 0,2 dB bzw. 1 dB Differenz sehr gut.

Weitere Signalformen

Zusätzlich wurden bereits auf dem Computer gespeicherte Signalverläufe einer Bandschweißanlage, eines Induktionskochfelds und einer Inverterschweißanlage nach beiden Methoden rechnerisch bewertet. Beim Signal der Inverterschweißanlage führte ein Rauschanteil in der Aufzeichnung bei der anschließenden rechnerischen Bewertung nach der WPM zu einem höheren Ergebnis, da der Spitzenwertdetektor auch diese Signalanteile auswertet, während sie bei der Bewertung nach der ZBM unberücksichtigt bleiben. Daher sollte viel Wert auf eine möglichst rauscharme Aufzeichnung gelegt werden. Falls Signalverzerrungen bekannt sind, sollten diese vor der Bewertung korrigiert werden. Die Bandschweißanlage, deren Spektrum mehrere relevante Oberwellen aufwies, wird bei der ZBM auf Basis der Äquivalenzfrequenz mit höchster Reizwirkung bewertet. Dies führte gegenüber der WPM zu einem geringeren Expositionsindex und Bewertungsunterschieden von 10 dB (Faktor 3,2).

Fazit

Die WPM kann bei monofrequenten Feldquellen im Frequenzbereich der Knickstellen der stückweise linearen Auslöseschwellen zu einer niedrigeren Bewertung als die ZBM führen. Bei allen anderen im Projekt getesteten Feldquellen lieferten beide Methoden unterschiedliche Expositionsindizes. Die ermittelten Expositionsindizes nach der ZBM lagen dabei immer unter den Werten nach der WPM. Werden bei den gepulsten Feldern die Pausenzeiten zwischen den

einzelnen Pulsen außer Acht gelassen, d.h. der Gewichtungsfaktor der ZBM wird auf $V=1$ gesetzt, zeigen die Bewertungen der hier betrachteten Signale durch die ZBM und die WPM eine gute Übereinstimmung. Werden die Pausenzeiten mitberücksichtigt, so dass $V \neq 1$ ist, ergeben sich Unterschiede in der Bewertung, die in der Größenordnung des Gewichtungsfaktors liegen. Zusätzliche Abweichungen zeigten sich bei Feldquellen, die mehrere relativ zur Auslöseschwelle relevante Spektralanteile beinhalten. Die WPM berücksichtigt alle Frequenzanteile des Feldes unter Einbeziehung ihrer Phasenlagen und legt eine additive Reizwirkung zugrunde. Bei der ZBM werden Äquivalenzfrequenzen berechnet und die Äquivalenzfrequenz mit der stärksten Reizwirkung zur Bewertung herangezogen. Damit ist die ZBM vom Prinzip her nichtadditiv und die Äquivalenzfrequenz ist nicht notwendigerweise im realen Spektrum des Feldes vorhanden.

Hinsichtlich der Handhabung und des Zeitaufwands für die Durchführung der Bewertung unterscheiden sich beide Methoden wesentlich. Bei der WPM im Zeitbereich sind alle Parameter durch die Bewertungsfilter im Messgerät festgelegt. Der Anwender kann lediglich die untere Grenzfrequenz für die Messung anheben, um die Erdmagnetfeldunterdrückung zu verstärken. Aufgrund der hohen Automatisierung der WPM und der Integration im ELT-400 bekommt der Anwender bereits während der Messung Ergebnisse angezeigt. Die ZBM benötigt höheren Zeitaufwand, mehr Kenntnisse und Erfahrungen des Anwenders und lässt sich nur bedingt automatisieren. Da die ZBM meist händisch ausgewertet wird, muss der Anwender sich zwangsläufig den Signalverlauf anschauen und kann so auf potentielle Messartefakte, z.B. Einflüsse von Filtern, Sonden oder Rauschen aufmerksam werden und diese bei der Bewertung berücksichtigen. Gerade wenn eine Bewertung nahe an den zulässigen Auslöseschwellen liegt, kann eine Prüfung der Plausibilität durch Betrachtung des tatsächlichen Signalverlaufs empfehlenswert sein.

Schlussendlich sind die gefundenen Unterschiede in den Bewertungen im Wesentlichen auf die den beiden Methoden zugrundeliegenden elektrophysiologischen Ansätze zurückzuführen.

Die Projektgruppe sieht in diesem Punkt Potenzial für weiteren Forschungsbedarf insbesondere hinsichtlich der elektrophysiologischen Plausibilität der beiden Methoden.