# Mathematische Beschreibung eines Verfahrens zur normgerechten Bewertung beliebiger Signale im Personenschutz in niederfrequenten elektrischen oder magnetischen Feldern

NARDA Safety Test Solutions GmbH
Dipl. Ing. Helmut Keller
28.03.2002

## Einleitung

Aktuelle Normen und Richtlinien zum Personenschutz in niederfrequenten (f < 100 kHz) elektrischen und magnetischen Feldern geben frequenzabhängige Referenzwerte für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte an. Diese Referenzwerte sind aus biologisch begründeten Basisgrenzwerten für die zulässigen Stromdichte im menschlichem Körper abgeleitet. Werden an einem bestimmten Ort Felder unterhalb der Referenzwerte gemessen ist ein Aufenthalt von Personen an diesem Ort zulässig.

Die Referenzwerte sind für stationäre sinusförmige Signale eindeutig. Liegen aber gepulste oder multifrequente Signale vor, muss an Hand von Zusatzinformationen in den Normen und Richtlinien auf die richtige Bewertung geschlossen werden. Die Praxis zeigt, dass diese Zusatzinformationen oft nicht eindeutig sind und von verschiedenen Personen verschieden interpretiert werden.

Hier wird ein Verfahren, das den aktuellen Normen und Richtlinien nicht widerspricht, sie sinngemäß erweitert und die Bewertung beliebiger Signale eindeutig definiert, mathematisch beschrieben.

## Referenzwerte und Bewertungsfilter

Die frequenzabhängigen Referenzwerte sind in den Normen und Richtlinien in Tabellen angegeben. In den Tabellen sind Geradenstücke in einer doppelt logarithmischen Darstellung beschrieben. Die Steigung der Geradenstücke beträgt im niederfrequenten Bereich 0, - 20dB oder -40 dB pro Dekade.

Die Referenzwerte lassen sich in  sehr guter Annäherung auch mathematisch durch Gln.1 beschreiben.

$$G_{ref}(f) = G_0 \cdot \sqrt{\frac{1+\frac{f^2}{f_{z1}^2}}{1+\frac{f^2}{f_{n1}^2}} \cdot \frac{1+\frac{f^2}{f_{z2}^2}}{1+\frac{f^2}{f_{n2}^2}} \cdot \frac{1+\frac{f^2}{f_{z3}^2}}{1+\frac{f^2}{f_{n3}^2}}} \qquad \text{Gln. 1}$$

Die Grenzfrequenzen $f_z$ und $f_n$ ergeben sich aus den Schnittpunkten der Geradenstücke.

Oft liegen diese Schnittpunkte wegen Rundungsfehler in den Tabellen nicht genau auf einer in den Tabellen ausgedruckten Frequenz. Für manche Referenzwertkurven reicht schon das erste Glied aus, bei andern sind zwei Glieder notwendig. Mehr als drei Glieder werden im Frequenzbereich bis 100 kHz nie benötigt. Der Wert $G_0$ ist der Referenzwert bei der tiefsten Grenzfrequenz.

Die Referenzwertkurven aus den Tabellen und die Referenzwertkurven aus Gln. 1 weichen nur an den Schnittpunkten der Geraden voneinander merkbar ab. Die Referenzwertkurven aus Gln. 1 beschreiben die physikalischen und biologischen Effekte zweifelsfrei besser als die kantigen Referenzwertkurven die man direkt aus den Tabellen gewinnt. Eine exakte normgerechte Bewertung muss daher die Referenzwerte aus Gln 1. benutzen.

Liegen die zeitlichen Verläufe $g_x(t)$, $g_y(t)$ und $g_z(t)$ der zu bewertenden Feldgröße vor, können auf die Referenzwertkurve normierte zeitliche Verläufe $n_x(t)$, $n_y(t)$ und $n_z(t)$ durch Faltung der Feldverläufe mit der Impulsantwort $h(t)$ dreier identischer Bewertungsfilter erhalten werden. Der Betrag der Übertragungsfunktion $H(f)$ dieser Bewertungsfilter muss dabei exakt dem Kehrwert von $G_{ref}(f)$ entsprechen. Diese Bedingung wird durch Gln. 3 erfüllt.

$$\left|H(f)\right| = \frac{1}{G_{ref}(f)} \qquad \text{Gln. 2}$$

$$H(f) = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{1 + j \cdot \frac{f}{f_{n1}}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_{z1}}} \cdot \frac{1 + j \cdot \frac{f}{f_{n2}}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_{z2}}} \cdot \frac{1 + j \cdot \frac{f}{f_{n3}}}{1 + j \cdot \frac{f}{f_{z3}}} \qquad \text{Gln. 3}$$

Die Gln.3 beschreibt die Übertragungsfunktion eines Filters mit in Reihe geschalteten Filtergliedern erster Ordnung.

Die Spektren der normierten Signale entsprechen exakt den Spektren der auf die Referenzwerte normierten Spektren der Feldverläufe.

$$n(t) = g(t) * h(t) \leftrightarrow N(f) = G(f) \cdot H(f) \qquad \text{Gln. 4}$$

## Bewertung durch unterschiedliche Gleichrichter

Nach Auswertung der aktuellen Normen und Richtlinien wird klar, dass für Signale, die komplexer als stationäre sinusförmige Signale sind, die beiden Gleichrichtertypen RMS und Peak (Effektivwert und Spitzenwert) notwendig sind. Bei manchen Normen ist nur ein Typ notwendig, manchmal werden aber auch beide gleichzeitig benötigt. Folgendes Verfahren lässt sich auf alle aktuellen Normen und Richtlinien anwenden:

Zunächst wir das aktuelle Betragsquadrat aus den drei normierten Zeitverläufen nach Gln. 5 berechnet.

$$m(t) = [n_x(t)]^2 + [n_y(t)]^2 + [n_z(t)]^2 \qquad \text{Gln. 5}$$

Nachfolgend wird das Quadrat des  Effektiv- und des Spitzenwertes nach Gln. 6 und Gln. 7 berechnet.

$$m_{RMS}(t) = \frac{1}{T_{RMS}} \cdot \int_{t-T_{RMS}}^{t} m(x) \cdot dx \qquad \text{Gln. 6}$$

$$m_{Peak}(t) = \text{Maximum}(\text{m(x)}) \quad \text{mit} \quad x = t - T_{Peak} \ \ldots \ \ x = t \qquad \text{Gln. 7}$$

In den aktuellen Normen in denen  der Effektivwert eine Rolle spielt wird $T_{RMS} = 1\,\text{s}$ vorgeschrieben.

(Bemerkung: Es reicht völlig aus beide Werte in eine zeitlichen Abstand von $\frac{T_{RMS}}{4}$ zu berechnen. Die Haltezeit für die Spitzenwerte $T_{Peak}$ muss mindesten so groß wie dieser zeitliche Abstand sein.)

Nach multiplizieren mit einem Bewertungsfaktor $k_{RMS}$ bzw. $k_{Peak}$ wird der jeweils größere Wert ausgewählt, die Wurzel gezogen und  mit 100 % multipliziert. Als Ergebnis erhält man die momentane Exposition $q(t)$ in Prozent vom Referenzwert.

$$q(t) = \sqrt{\text{Maximum}(k_{RMS} \cdot m_{RMS}(t), k_{Peak} \cdot m_{Peak}(t))} \cdot 100\% \qquad \text{Gln. 8}$$

Nach den aktuellen Normen und Richtlinien ist $k_{RMS}$ entweder 0 oder 1 und $k_{Peak}$ liegt zwischen 0  und 0,5.

## Realisierung mit digitalen Filtern

Die Bewertungsfilter können ohne weiteres durch analoge Filter mit den oben aufgeführten Grenzfrequenzen realisiert werden. In vielen Fällen ist aber eine Realisierung durch digitale Filter sinnvoll. In diesem Fall müssen die Filterkoeffizienten der digitalen Filter mit Hilfe der bilinearen Transformation berechnet werden. Die beste Genauigkeit erhält man, wenn die Filterglieder einzeln transformiert werden und dafür gesorgt wird, dass die Frequenz, die dem geometrische Mittelwert von jeweiligen $f_z$ und $f_n$ entspricht, durch die Transformation auf die gleiche Stelle abgebildet wird. Auf diese Weise wird erreicht, dass die Asymptoten der analogen und der digitalen Filter identisch sind.