

Technische Regeln zur Arbeitsschutz- verordnung zu elektromagnetischen Feldern	TREMF Statische und zeitveränder- liche elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich bis 10 MHz	Teil 2: Messen, Berechnen und Bewerten von Expositionen gegenüber statischen und zeitveränderlichen elektri- schen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz
---	---	--

Die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu statischen und zeitveränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz (TREMF NF) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder wieder.

Sie werden vom **Ausschuss für Betriebssicherheit** unter Beteiligung des **Ausschusses für Arbeitsmedizin** ermittelt bzw. angepasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBI) bekannt gegeben.

Diese TREMF NF Teil 2 „Messen, Berechnen und Bewerten von Expositionen gegenüber statischen und zeitveränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz“ konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs die Anforderungen der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern (EMFV). Bei Einhaltung dieser Technischen Regel kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, muss er damit mindestens die gleiche Sicherheit und den gleichen Gesundheitsschutz für die Beschäftigten erreichen.

Inhalt

- 1 Anwendungsbereich
 - 2 Begriffsbestimmungen
 - 3 Grundsätzliches
 - 4 Ermittlung der Exposition
 - 5 Mess- und Berechnungsunsicherheit
 - 6 Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen
 - 7 Bewertung der Exposition
 - 8 Verfahren für die Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe
 - 9 Verfahren zum Nachweis der Einhaltung von Expositionsgrenzwerten
 - 10 Ergebnisdokumentation, Messbericht
 - 11 Literaturhinweise
- Anhang 1 Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen, Expositionszonen
- Anhang 2 Ergänzungen zur Durchführung von Expositionsmessungen
- Anhang 3 Ergänzungen zu Simulations- und Berechnungsverfahren

- Anhang 4 Ergänzungen zu Mess- und Berechnungsunsicherheiten
- Anhang 5 Ergänzungen zu Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Expositionsgrenzwerte

1 Anwendungsbereich

- (1) Der Teil 2 „Messen, Berechnen und Bewerten von Expositionen gegenüber statischen und zeitveränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz“ der TREMF NF beschreibt das Vorgehen bei den Messungen und Berechnungen von Expositionen nach dem Stand der Technik, wie es in der EMFV gefordert wird.
- (2) Die TREMF NF gilt für statische und zeitveränderliche elektrische und magnetische Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz. Sie gilt nach § 1 Absätze 2 und 3 EMFV nur für Kurzzeitwirkungen und nicht für vermutete Langzeitwirkungen.
- (3) Unabhängig von den in dieser TREMF NF beschriebenen Vorgehensweisen sind vom Arbeitgeber die Beschäftigten oder ihre Interessenvertretung, sofern diese vorhanden ist, aufgrund der einschlägigen Vorschriften zu beteiligen.

2 Begriffsbestimmungen

In diesem Teil 2 „Messen, Berechnen und Bewerten von Expositionen gegenüber statischen und zeitveränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich bis 10 MHz“ der TREMF NF werden Begriffe so verwendet, wie sie im Teil „Allgemeines“ der TREMF NF erläutert sind.

3 Grundsätzliches

- (1) Nach § 3 der EMFV hat der Arbeitgeber im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung die auftretenden Expositionen durch EMF an Arbeitsplätzen zu ermitteln und zu bewerten. Dabei sind alle auf den Arbeitsplatz einwirkenden EMF, relevanten Frequenzanteile und deren direkte und indirekte Wirkungen zu berücksichtigen.

Hinweis: Je nach Bewertung der auftretenden Expositionen ist eine vereinfachte Gefährdungsbeurteilung (siehe Teil 1 Abschnitt 6.4) ausreichend.

- (2) Lässt sich mit den vorhandenen Informationen nicht sicher feststellen, ob die ALS oder EGW nach Abschnitt 6 eingehalten werden, ist die Exposition durch Messungen, Berechnungen oder Simulationen nach § 4 EMFV festzustellen. Messungen, Berechnungen und Simulationen werden nach dem Stand der Technik fachkundig geplant und durchgeführt. Die eingesetzten Messverfahren und Messgeräte sowie eventuell erforderliche Berechnungs- oder Simulationsverfahren müssen den Expositionsbedingungen angepasst und die Ergebnisse geeignet sein, den Vergleich mit den ALS oder EGW zu erlauben.
- (3) Für Messungen ist zu beachten, dass im Nahfeld keine feste Beziehung zwischen E und H besteht, weswegen beide Feldgrößen separat betrachtet werden müssen (siehe Anhang 2 Abschnitt A2.1).
- (4) Das Messen, Berechnen oder Simulieren der EMF-Exposition ist eine komplexe Aufgabe und erfordert entsprechende Fachkenntnisse und Erfahrungen (Fachkunde nach § 2 Absatz 8 und § 4 EMFV, siehe Teil 1 Abschnitt 3.4). Der Arbeitgeber beauftragt damit fachkundige Personen, falls er nicht selbst über die entsprechenden Kenntnisse und die erforderliche technische Ausstattung (im Sinne von Messtechnik oder Hilfsmittel zur Berechnung oder Simulation von EMF) verfügt.

(5) Hilfen für die Planung und Durchführung von Messungen, Berechnungen und Simulationen von EMF bieten die in dieser TREMF zitierten technischen Normen. Die folgenden Abschnitte enthalten wichtige Hinweise zum Vorgehen bei Messungen, Berechnungen und Simulationen sowie der Bewertung der EMF-Exposition.

Hinweis: Für einen Überblick über Verfahren zur Messung, Berechnung und Bewertung von EMF an Arbeitsplätzen siehe DIN EN 50413.

(6) Das Ergebnis einer Messung spiegelt die Expositionssituation der zum Zeitpunkt der Messung verwendeten technischen Anlagenkonfiguration der EMF-Quelle wider. Das Ergebnis einer Berechnung quantifiziert näherungsweise die Expositionssituation auf Basis der Expositionsbedingungen, die bei Berechnung oder Simulation angenommen wurden.

4 Ermittlung der Exposition

(1) Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ist zunächst festzustellen, ob zur Ermittlung der Exposition Messungen, Berechnungen oder Simulationen notwendig sind oder ob nicht bereits genügend Informationen (siehe Teil 1 Abschnitt 5.2) vorhanden sind, um die Exposition ausreichend genau zu bestimmen, z. B. für EMF-Quellen nach Teil 1 Abschnitt 6.3 und Teil 1 Abschnitt 6.4 in Verbindung mit Teil 1 Anhang 1 Tabelle A1.1 bzw. Teil 1 Anhang 2 Tabelle A2.1.

(2) Die Informationsermittlung umfasst ebenfalls die Ergebnisse der Tätigkeitsanalyse (siehe Teil 1 Abschnitt 6.2). Diese ist mit den tatsächlichen Arbeitsbedingungen vor Ort abzugleichen.

(3) Lässt sich mit den verfügbaren Informationen keine eindeutige Bewertung durchführen, ob die ALS oder EGW eingehalten oder überschritten werden, dann ist eine Messung, Berechnung oder Simulation der Exposition angezeigt.

(4) Für jede einzelne Tätigkeit müssen die Angaben vollständig genug sein, um die Exposition der Beschäftigten repräsentativ zu ermitteln und zu bewerten.

4.1 Expositionsmessung

4.1.1 Planung und Vorgehen

(1) Vor der Messung ist eine sorgfältige Planung durchzuführen. Dabei ist festzustellen, um welche EMF-Quellen es sich handelt und welche Art von EMF bzw. welcher Frequenzbereich als auch welche Feldstärken bzw. Leistungen erwartet werden (siehe Teil 1 Abschnitt 6.2).

Hinweis 1: Daraus ergibt sich, welche Messverfahren, Messgeräte und -sonden einzusetzen und wie bzw. an welchen Orten die Messungen durchzuführen sind. Hierbei sind Orientierungsmessungen zweckmäßig.

Hinweis 2: Liegen keine Informationen zu dem Frequenzbereich oder den dominierenden Frequenzanteilen vor, so ist eine Messung oder Berechnung des Amplitudenspektrums, z. B. mittels Spektrumanalysator bzw. Fast Fourier Transformation (FFT), hilfreich. Für die Berechnung des Amplitudenspektrums sind Angaben über den zeitlichen Feldverlauf in unmittelbarer Nähe der relevanten Arbeitsplätze bzw. Aufenthaltsbereiche notwendig.

(2) Bei der Messung ist darauf zu achten, dass durch die Anwesenheit von Personen das Messergebnis nicht verfälscht wird.

(3) Für einen störungsfreien Ablauf der Messungen wird empfohlen, im Vorfeld zu prüfen, ob zur geplanten Messung:

1. Zutritt zu relevanten Aufenthaltsbereichen gewährt wird,
2. die relevanten EMF-Quellen funktionsfähig sind und ein Normalbetrieb unter Belastung

möglich ist,

3. die an diesen EMF-Quellen tätigen Beschäftigten anwesend sind und für Rückfragen zur Verfügung stehen,
4. bei individuellen Gefährdungsbeurteilungen die relevanten Beschäftigten anwesend und die von ihnen benutzten EMF-Quellen funktionsfähig und verfügbar sind bzw. Zutritt zu diesen gewährt wird und
5. Foto- bzw. Filmmaterial im Rahmen der Messung für die Dokumentation aufgenommen werden darf und welche Auflagen dafür einzuhalten sind.

(4) Die Messgeräte und -sonden sind vor unzulässigen Witterungseinflüssen (siehe Herstellerangaben) und unzulässiger EMF-Exposition (siehe ebenfalls Herstellerangaben) zu schützen.

(5) Die Messungen sind bei der betrieblich maximal auftretenden Leistung bzw. den Bedingungen, unter denen die maximale Exposition zu erwarten ist (z. B. mehrere EMF-Quellen), durchzuführen. Ist dies nicht möglich, sind die Messergebnisse entsprechend hochzurechnen.

(6) Bei Anlagen mit wechselnden Betriebsparametern sind die zu bewertenden Betriebszustände festzulegen und zu protokollieren. Um den Messaufwand auch hierbei auf das erforderliche Maß zu begrenzen, sind die Parameter für eine Messung auszuwählen, die die höchste Expositionssituation für Beschäftigte darstellen.

(7) Treten am Arbeitsplatz gleichzeitig Felder von mehr als einer relevanten Feldquelle auf, ist Folgendes zu berücksichtigen:

1. Sind die ALS im zu untersuchenden Frequenzbereich gleich, so ist es ausreichend, die resultierenden Feldstärken mit geeigneten breitbandigen Messeinrichtungen (lineare Summation) direkt zu messen.
2. Arbeiten die Feldquellen in Frequenzbereichen mit unterschiedlichen ALS, so sind frequenzselektive oder frequenzgangbewertende Messsysteme breitbandigen Geräten ohne Frequenzbewertung vorzuziehen. Werden dennoch breitbandige Geräte ohne Frequenzbewertung verwendet, so ist
 - a) entweder bei Einzelbetrieb der Feldquellen zu messen (sequentielle Messung mit anschließender linearer Summation) oder
 - b) die niedrigste ALS im betrachteten Frequenzspektrum zugrunde zu legen.

Hinweis: Im NF-Bereich erfolgt die Summation linear, im HF-Bereich hingegen leistungsbezogen, d. h. quadratisch.

(8) Die relevanten einzuhaltenden ALS und ggf. EGW sind im Vorfeld zur Messung zu bestimmen, um geeignete Messgeräte auszuwählen.

(9) Der Eigenschutz des Messpersonals ist sicherzustellen. Dazu gehört, dass die erforderliche persönliche Schutzausrüstung für den Eigenschutz (z. B. Helm, Schutzbrille, Gehörschutz, Sicherheitsschuhe, wetterfeste Kleidung) verfügbar und funktionstüchtig ist sowie bei Bedarf getragen wird.

(10) Werden EMF im Übergangsbereich (Teil „Allgemeines“ Abschnitt 4.44) gemessen, müssen zusätzlich die Anforderungen an Messungen nach TREMF HF beachtet werden.

4.1.2 Messgeräte

(1) Bei den Messgeräten wird zwischen frequenzselektiven und breitbandigen Verfahren unterschieden.

(2) Messgeräte und -sonden müssen dem Stand der Technik entsprechen und unter den vor Ort bei der Messung herrschenden Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Druck, Staub etc.) mindestens folgende Anforderungen erfüllen:

1. einwandfreie Funktion,
2. Stand der Technik,
3. verfügt über eine gültige Kalibrierung (z. B. nach Herstellerstandard),
Hinweis: Es wird empfohlen, das Kalibrierintervall anhand von Herstellerempfehlungen oder situationsbedingt (Gerät wird im Labor oder Außeneinsatz verwendet) festzulegen.
4. Einrichtung je nach Frequenzbereich so, dass sie in der Lage sind, die elektrische Feldstärke E , die magnetische Feldstärke H , die magnetische Flussdichte B , die Frequenz f oder Kontaktströme I_k zu messen und
5. ausreichend hohe Sensitivität und einen ausreichend großen Messbereich umfassen, sodass eine Entscheidung über die Einhaltung oder Überschreitung von ALS und vereinzelten EGW möglich ist.

Hinweis: Für weitere Anforderungen an Messgeräte siehe DIN EN 50413 sowie DIN EN 61786-1.

(3) Die Exposition gegenüber inhomogenen magnetischen Feldern, z. B. im Nahfeld von EMF-Quellen, wird über eine Mittelungsfläche von maximal 100 cm^2 bestimmt, die in der Regel kreisförmig ist. Kleinere Sensorflächen (Sondendurchmesser) sind zulässig. Beim Einsatz kleinerer Sensorflächen muss eine nachgelagerte räumliche Mittelung auf 100 cm^2 nach dem Stand der Technik berücksichtigt werden.

Hinweis 1: Aus praktischen Gründen wird empfohlen, wo immer möglich eine Sensorfläche von 100 cm^2 zu verwenden.

Hinweis 2: Kleinere Sensorflächen werden z. B. zur Bewertung der Exposition von Gliedmaßen verwendet. Die nachgelagerte räumliche Mittelung bezogen auf eine kreisförmige Mittelungsfläche von 100 cm^2 erfolgt linear auf Basis mehrerer an unterschiedlichen Messpunkten erfasster Messwerte.

(4) Eine räumliche Mittelung über das gesamte vom Körper des Beschäftigten eingenommene Raumvolumen oder den gesamten vom Beschäftigten eingenommenen Arbeitsbereich ist nicht zulässig, wenn hierdurch räumliche Maxima in inhomogenen Feldern unterbewertet werden.

(5) Das Messgerät wird entsprechend Art, Dauer und Ausmaß des EMF (auch Pulse und nicht sinusförmige Signalverläufe) sowie den technischen Bedingungen der EMF-Quelle ausgewählt.

(6) Gegebenenfalls ist es zweckmäßig, mehrere, sich im Messbereich ergänzende Messverfahren bzw. -geräte einzusetzen.

(7) Um den korrekten Betrag des Feldvektors zu ermitteln, sind isotrope Feldsonden zu verwenden. Falls diese nicht zur Verfügung stehen, ist der korrekte Betrag des Feldvektors beim Einsatz von einachsigen Sonden durch geeignetes Ausrichten und Verwendung der Max-Hold-Funktion im Messgerät zu ermitteln.

Hinweis: Die Feldmessung mit einer einachsigen Sonde und Ausrichtung auf Maximalwert führt bei zirkular oder elliptisch polarisierten Wellenfeldern zu einer Unterbewertung.

(8) Die Messung von Kontaktströmen erfolgt durch Kontaktstrommessgeräte oder Stromzangen.

4.1.3 Durchführung

(1) Bei der Durchführung der Messung ist darauf zu achten, dass an den Messungen beteiligte Personen nicht gefährdet werden. Bei hohen Expositionen ist eine Schädigung von Personen, die die Messung durchführen, schon nach kurzer Zeit möglich. Daher ist für das Messpersonal eine separate Abschätzung der Gefährdung durchzuführen und entsprechende Maßnahmen sind zu ergreifen (Eigenschutz, z. B. durch Leistungsabsenkung, zeitliche Aufenthaltsbeschränkung, sofern am Markt verfügbar: persönliche Schutzausrüstungen).

Hinweis: Zur Zeit der Drucklegung und Veröffentlichung dieser TREMF war am Markt keine PSA zum Schutz vor Gefährdungen durch EMF verfügbar.

(2) Die Anforderungen an die Durchführung der Messungen der verschiedenen Arten von EMF oder von Kontaktströmen nach DIN EN 50413 oder EMF-Leitfaden des AKNIR (Abschnitt 6.4.5) sind zu berücksichtigen.

(3) Die einwandfreie Funktion der Messausrüstung wird vor und nach der Messung überprüft und sichergestellt. Bei Messungen über mehrere Stunden oder in Bereichen unterschiedlich hoher Exposition wird die einwandfreie Funktion der Messausrüstung auch zwischen den einzelnen Messungen überprüft.

(4) Die Messung muss repräsentativ für die Exposition der Beschäftigten sein. In Abhängigkeit der Expositionssituation sind Einzelmessungen an verschiedenen Messorten und/oder unterschiedlichen Auslastungen der EMF-Quelle durchzuführen.

Hinweis: Es sind ggf. verschiedene Messpunkte an einem Messort notwendig, um die EMF-Exposition repräsentativ zu ermitteln. In Abhängigkeit von den Arbeitspositionen empfiehlt es sich, Messpunkte in Relation zu Kopf-, Brust-, Becken- und/oder Beinhöhen bzw. der Position der Hände festzulegen.

(5) Die räumliche Lage des Messortes wird eindeutig und nachvollziehbar angegeben.

(6) Wird bei Messungen an Arbeitsplätzen ein Mindestabstand zwischen Messwertaufnehmer und Gegenständen in dessen Umgebung gefordert (siehe Herstellerangaben zum Messwertaufnehmer oder in Messvorschriften einschlägiger Produktnormen), muss sichergestellt sein, dass die Aufenthaltsbereiche bei der Ausübung von Tätigkeiten durch Beschäftigte nicht innerhalb dieser Mindestabstände liegen.

(7) Sicherheitsvorschriften und/oder -abstände sind bei Messungen einzuhalten.

(8) Bei Messungen niederfrequenter Felder im Freien, insbesondere unter Hochspannungsleitungen, genügt im Allgemeinen an einem Messort ein Messpunkt in einer Höhe von 1 m bis 1,5 m über der Standfläche.

(9) Gemessen wird grundsätzlich am unbesetzten Arbeitsplatz. Die Beurteilung der Messergebnisse erfolgt auf der Basis der maximalen, in der gedachten Körperachse des Beschäftigten gemessenen Werte der Feldstärke am Messort.

(10) Die das Messgerät bedienende Person achtet darauf, dass sie sich während der Messung nicht zwischen Feldquelle und Feldsonde bzw. Messantenne befindet (Verringerung der Messwerte durch Abschirmung) und sich alle für die Messung benötigten Personen aus dem Bereich des Messortes entfernen. Anwesende Personen sind in der Lage, insbesondere beim elektrischen Feld, die Messwerte erheblich zu beeinflussen.

(11) Die Messdurchführung (z. B. alle relevanten Betriebsparameter) ist so zu protokollieren, dass sie bei Wiederholungsmessungen reproduzierbar ist. Die Anfertigung von Skizzen, oder falls möglich Fotos, unterstützen die Dokumentation der Expositionssituation.

Hinweis: Ergänzende Besonderheiten zur Durchführung der Expositionsmessungen sind in Anhang 2 Abschnitte A2.1 und A2.2 aufgeführt.

4.1.4 Messprotokoll

Ein während der Messung aufgenommenes Messprotokoll fasst die Randbedingungen und Messwerte zusammen, sodass die Messbedingungen auch später noch nachvollziehbar sind. Sämtliche Informationen, die für reproduzierbare Messungen erforderlich sind, müssen hier festgehalten werden.

Hinweis: Eine Übersicht über den Inhalt des Messprotokolls ist in Anhang 2 Abschnitt A2.3 vorgehalten.

4.1.5 Auswertung

(1) Die Auswertung der Messergebnisse anhand des Messprotokolls ist so durchzuführen, dass die Endergebnisse in den physikalischen Größen und Einheiten der zugrunde zu legenden ALS oder EGW vorliegen.

(2) Neben dem Messergebnis selbst ist auch die Messunsicherheit (siehe Abschnitt 5 Absatz 2) in die Betrachtung mit einzubeziehen. Die Messunsicherheit muss dabei für die bei der Messung relevanten Frequenzen bekannt sein. Sind die frequenzspezifischen Messunsicherheiten nicht bekannt, muss die höchste Messunsicherheit im für die Messung relevanten Frequenzbereich verwendet werden.

4.1.6 Messbericht

Der Messbericht beinhaltet das Messprotokoll sowie die Auswertung und Beurteilung der Messwerte. Darüber hinaus enthält der Messbericht weiterführende Angaben zur Messung, wie Ziel der Messung, Annahmen/Abschätzungen oder Eigenschaften eines Implantats.

Hinweis: Eine Übersicht über den Inhalt des Messberichts ist in Anhang 2 Abschnitt A2.4 vorgehalten.

4.2 Berechnungsmethoden und Simulationsrechnungen

(1) Ist der Nachweis der Einhaltung von ALS oder EGW anhand von Messungen oder Herstellerangaben nicht zu erbringen, besteht die Möglichkeit, numerische oder analytische Berechnungsmethoden heranzuziehen.

(2) Bei der Anwendung solcher Verfahren sind im Allgemeinen besondere Fachkenntnisse und in der Regel eine dem Stand der Technik entsprechende Simulations- bzw. Berechnungssoftware notwendig.

Hinweis: Für weitere Informationen siehe Anhang 3.

(3) Es ist auch die Unsicherheit im Sinne von Abschnitt 4.1.5 Absatz 2 zu berücksichtigen.

5 Mess- und Berechnungsunsicherheit

(1) Die Angabe eines gemessenen bzw. berechneten Wertes allein ohne Aussagen zur erweiterten Unsicherheit ist nicht ausreichend, da keine Information über die Qualität der Messung vorliegt.

(2) Zur Berücksichtigung der Mess- und Berechnungsunsicherheit ist der additive Ansatz zu wählen:

$$X + U \leq BW$$

Gl. 5.1

mit

X Mess- oder Berechnungswert

U erweiterte Unsicherheit

BW Bewertungswert

Hinweis: Für weitere Informationen siehe Anhang 4.

6 Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen

- (1) Die EGW und ALS für Expositionen von Beschäftigten an Arbeitsplätzen gegenüber EMF sind in Anhang 1 dieser TREMF aufgeführt.
- (2) Erfolgt die Bewertung der Exposition auf Basis des Expositionszonenkonzepts (siehe Teil 1 Abschnitt 4), gilt Anhang 1 Abschnitt A1.2.

7 Bewertung der Exposition

7.1 Allgemeines

- (1) Die Einhaltung der ALS oder EGW nach Anhängen 2 und 3 EMFV gilt als nachgewiesen, wenn das Mess- oder Berechnungsergebnis zuzüglich der frequenzspezifischen Gesamtmess- bzw. -berechnungsunsicherheit unter dem nach Anhängen 2 und 3 EMFV zulässigen Wert liegt.
- (2) Liegt keine Einhaltung der ALS oder EGW vor, sind Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Gefährdung durch EMF (siehe Teil 3) unverzüglich zu ergreifen. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist zu überprüfen und zu dokumentieren. Eine Überprüfung kann je nach Maßnahme z. B. durch Berechnung oder eine erneute Messung vorgenommen werden.
- (3) Werden die ALS oder die EGW für sensorische Wirkungen überschritten, sind die besonderen Festlegungen zum Schutz vor Gefährdungen durch EMF nach §§ 6, 7, 8, 14 sowie § 18 EMFV anzuwenden, siehe Teil 3.
- (4) Bei der Bewertung der Exposition sind alle Faktoren zu berücksichtigen, die zur Exposition beitragen oder die für die Bewertung von Bedeutung sind.

Hinweis: Für besonders schutzbedürftige Beschäftigte sind die Erkenntnisse aus der arbeitsmedizinischen Vorsorge heranzuziehen, sofern vorliegend.

- (5) Die Ergebnisse von breitbandigen Messungen (entspricht der Gesamtfeldstärke) werden aufgrund der fehlenden spektralen Auflösung mit der kleinsten ALS des bei der Messung betrachteten Frequenzbereichs bewertet.

7.2 Eine oder mehrere EMF-Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen

- (1) Zur Ermittlung der Gesamtexposition sind bei einer oder mehreren EMF-Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen sämtliche relevanten Frequenzen zu berücksichtigen. Für die nicht thermischen Wirkungen wird dabei der Frequenzbereich mit $0 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ betrachtet, für die thermischen Wirkungen der Frequenzbereich mit $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ (für letztere siehe TREMF HF Teil 2 Abschnitt 7).
- (2) Im Sinne einer konservativen Abschätzung ist es möglich, alle durch die EMF-Quelle(n) hervorgerufenen elektrischen und magnetischen Feldstärken innerhalb dieses Frequenzbereichs unter Berücksichtigung der Mess- und/oder Berechnungsunsicherheit zunächst auf die jeweilige zu prüfende ALS zu beziehen.

Hinweis: Dies erfolgt z. B. mittels Expositionsquotient EQ, siehe Gleichungen 7.1 und 7.2:

$$EQ = \frac{E_i}{E_{ALS,i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.1}$$

$$EQ = \frac{B_i}{B_{ALS,i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.2}$$

mit

EQ Expositionsquotient

E_i Spitzenwert (für nichtthermische Wirkungen) der elektrischen Feldstärke von Quelle Q bei der Frequenz i

$E_{ALS,i}$ die obere oder untere ALS für das elektrische Feld bei Frequenz i

B_i Spitzenwert (für nichtthermische Wirkungen) der magnetischen Flussdichte von Quelle Q bei der Frequenz i

$B_{ALS,i}$ die obere oder untere ALS für die magnetische Flussdichte bei Frequenz i

(3) Die Bewertung einer EMF-Quelle mit unterschiedlichen Frequenzen im Frequenzbereich von $0 \text{ Hz} < f \leq 100 \text{ kHz}$ erfolgt mit Verfahren im Zeitbereich. Hierfür können die Methode der gewichteten Spitzenwerte im Zeitbereich (WPM-z) oder die Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) herangezogen werden (siehe Abschnitt 8). Beide Verfahren berücksichtigen die Phasenlage der betrachteten Frequenzen.

(4) Für die Bewertung von mehreren EMF-Quelle(n) mit unterschiedlichen Frequenzen sind folgende Frequenzbereiche hinsichtlich ihrer Wirkungen zu unterscheiden:

1. Im Frequenzbereich von $0 \text{ Hz} < f < 100 \text{ kHz}$ werden zur Bewertung die einzelnen Frequenzanteile separat betrachtet und nicht summiert. Sind alle ermittelten Feldstärkewerte kleiner als die zu prüfende ALS, das heißt, es gilt $EQ \leq 1$, so werden die geprüften ALS eingehalten. Andernfalls kommt § 3 Absatz 3 EMFV zur Geltung, d. h., es muss eine detaillierte Expositionsbewertung durchgeführt werden und ggf. müssen erforderliche Maßnahmen getroffen werden (siehe Teil 3).
2. Im Frequenzbereich von $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ werden zur Bewertung die Summationsvorschriften nach TREMF HF Teil 1 Abschnitt 7 angewendet. Ist der Gesamtexpositionsquotient $TEQ \leq 1$, wird die geprüfte Auslöseschwelle eingehalten. Ist dies nicht der Fall, kommt § 3 Absatz 3 EMFV zur Geltung, d. h., es muss eine detaillierte Expositionsbewertung durchgeführt werden und ggf. müssen erforderliche Maßnahmen getroffen werden (siehe Teil 3).

7.3 Mehrere EMF-Quellen mit gleicher Frequenz

(1) Zur Ermittlung der Gesamtexposition müssen bei mehreren EMF-Quellen mit gleicher Frequenz alle EMF-Quellen berücksichtigt werden. Hierbei ist zu prüfen, ob auch bei voneinander unabhängigen Quellen die Emissionen in ihrer Wirkung additiv sind, z. B. in Abhängigkeit der Arbeitsabläufe.

(2) Im Sinne einer konservativen Abschätzung ist es möglich, alle durch die Quellen hervorgerufenen elektrischen und magnetischen Feldstärken bei dieser Frequenz unter Berücksichtigung der Mess- und/oder Berechnungsunsicherheit zunächst auf die zu prüfende ALS zu beziehen.

Hinweis 1: Dies erfolgt z. B. mittels Expositionsquotient EQ. Die einzelnen EQ werden dann zu einem Gesamtexpositionsquotienten (TEQ) aufaddiert (siehe Gleichungen 7.3 und 7.4). Ist der $TEQ \leq 1$, so wird die der Prüfung zugrunde gelegte ALS eingehalten. Andernfalls kommt § 3

Absatz 3 EMFV zur Geltung, d. h., es muss eine detaillierte Expositionsbewertung durchgeführt und ggf. müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden (siehe Teil 3).

Hinweis 2: Die mit diesen Gleichungen ermittelten Gesamtexpositionen gelten für den Fall, dass alle Einzelkomponenten dieselbe Phase besitzen. Die zusätzliche Berücksichtigung der relativen Phasenlage führt zu einer genaueren Abschätzung der Gesamtexposition. Je nach tatsächlicher Phasenlage der Einzelkomponenten zueinander kann die unter Berücksichtigung der Phasenlage ermittelte Gesamtexposition deutlich geringer sein.

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \frac{E_{i,Qx}}{E_{ALS,i}} \leq 1$$

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \frac{B_{i,Qx}}{B_{ALS,i}} \leq 1$$

mit

TEQ	Gesamtexpositionsquotient
EQ_{Qx}	Expositionsquotient von Quelle Qx
$E_{i,Qx}$	Spitzenwert (für nichtthermische Wirkungen) der elektrische Quelle Qx bei der Frequenz i
$E_{ALS,i}$	die obere oder untere ALS für das elektrische Feld bei Freq
$B_{i,Qx}$	Spitzenwert (für nichtthermische Wirkungen) der magnetische Quelle Qx bei der Frequenz i
$B_{ALS,i}$	die obere oder untere ALS für die magnetische Flussdichte

8 Verfahren für die Bewertung nicht sinusförmiger Signale

(1) Zur Bewertung nicht sinusförmiger EMF gibt es je nach Frequenzbereich und Art des Feldes unterschiedliche Methoden. Im Bereich der nichtthermischen Wirkungen können nach § 4 Absatz 3 EMFV Verfahren im Zeitbereich verwendet werden. Liegen bei Frequenzen mit $f > 100$ kHz thermische Wirkungen vor, gilt TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8 Absatz 3. Im Folgenden wird auf unterschiedliche Verfahren eingegangen.

(2) Ein Verfahren ist die Methode der gewichteten Spitzenwerte im Zeitbereich (weighted peak method time domain, WPM-z, siehe Teil „Allgemeines“ Abschnitt 4.45). Sie ist aus der sogenannten Summenformel abgeleitet, bei der jede Frequenzkomponente des Feldes unter Berücksichtigung ihrer Phasenlage ins Verhältnis zum Auslöse- bzw. Grenzwert gesetzt wird. Die WPM ist im Zeitbereich anzuwenden. Dabei wird der zeitliche Feldverlauf durch einen Filter bewertet. Die Filtercharakteristik ist aus dem (im Frequenzbereich definierten) ALS- bzw. EGW-Verlauf abgeleitet. Dabei werden alle gewichteten Feldanteile unter Berücksichtigung der Phasenlage summiert. Als Ergebnis der WPM-Berechnung wird ein Expositionsindex E_I ausgegeben. Das Ergebnis beschreibt die prozentuale Ausschöpfung zu den ALS- bzw. EGW-Werten. Ist $E_I < 1$, entspricht 100 %, gilt die Exposition als zulässig.

(3) Eine zweite Methode nach DGUV-I 203-038 ist die Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM, siehe Teil „Allgemeines“ Abschnitt 4.45). Bei dieser werden relevante Steigungen bzw. Gefälle im Zeitverlauf des Feldes ermittelt und daraus sowohl die Amplitude als auch die Anstiegs- bzw. Abfallzeiten bewertet. Diese ermittelten Werte werden mit den aus dem FB 457 aufgeführten Werten verglichen und bewertet. Die Werte aus dem FB 457 basieren auf den

ALS bzw. EGW der EMF-Richtlinie 2013/35/EU. Mit den in DGUV-I 203-038 und im FB 457 beschriebenen Feldverläufen (sinus-, dreieck- oder trapezförmigen sowie exponentiell) lassen sich beliebige Signalformen nachbilden und bewerten, sodass diese Methode vergleichbare Ergebnisse zur WPM-z liefert.

(4) Sind aufgrund der Eigenschaften der auftretenden EMF im Frequenzbereich von $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ thermische Wirkungen nicht auszuschließen, erfolgt deren Bewertung nach TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8.

9 Verfahren zum Nachweis der Einhaltung von Expositionsgrenzwerten

Der Nachweis der Einhaltung von EGW gilt als erbracht, wenn der ermittelte Wert zuzüglich der Unsicherheit den entsprechenden EGW unterschreitet.

Hinweis 1: Unabhängig vom verwendeten Verfahren ist die Unsicherheit anzugeben und zu berücksichtigen, siehe Abschnitt 5.

Hinweis 2: Im folgenden Abschnitt werden die an die Verfahren zum Nachweis der Einhaltung von EGW gestellten Anforderungen beschrieben.

9.1 Nachweis durch Messung

(1) Für folgende(n) Expositionsgrenzwert(e) kann ein Nachweis zu ihrer Einhaltung durch Messungen am Arbeitsplatz erbracht werden:

1. Expositionsgrenzwerte für die magnetische Flussdichte B von statischen Magnetfeldern (nach Anhang 1 Tabelle A1.7),
2. Expositionsgrenzwert für externe elektrische Feldstärke E_e von statischen elektrischen Feldern (nach Anhang 1 Tabelle A1.8),
3. Expositionsgrenzwerte für kontinuierliche Kontaktströme I_K bei greifendem Kontakt (nach Anhang 1 Tabelle A1.11),
4. Expositionsgrenzwerte für den Entladungspuls eines Kontaktstroms (nach Anhang 1 Tabelle A1.12).

(2) Es gelten die Anforderungen an die Durchführung von Messungen (siehe Abschnitt 3 und 4), Messunsicherheit (siehe Abschnitt 5), Bewertung (siehe Abschnitt 7) und Dokumentation (siehe Abschnitt 10).

Hinweis: Für weitere Informationen siehe Anhang 5.

9.2 Nachweis durch Berechnung

(1) Es ist möglich, den Nachweis zur Einhaltung von EGW durch Berechnung für alle EGW zu erbringen. Es werden numerische Berechnungs- oder Simulationsmethoden (z. B. Finite Elemente Methode (FEM) oder Finite Differenzen Methode im Zeitbereich (FDTD); siehe Anhang 3) mit hochaufgelösten anatomischen Körpermodellen unter Berücksichtigung der verschiedenen frequenzabhängigen elektrischen Gewebeeigenschaften eingesetzt.

(2) Vereinfachte Berechnungs- oder Simulationsmethoden können verwendet werden, wenn die damit erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Berechnungs- oder Simulationsmethoden aus Absatz 1 vergleichbar sind.

Hinweis: Sind nur unzureichende Daten über das Unsicherheitsbudget (Zusammenfassung der Unsicherheiten) von einfachen Körperrnachbildungen (z. B. sphäroidische Modelle) vorhanden, wird empfohlen, diese einfachen Körperrnachbildungen nur bis zu einer Ausschöpfung des halben EGW einzusetzen. Oberhalb dieser Grenzwertausschöpfung ist die Verwendung anatomischer Menschmodelle zielführend.

(3) Es gelten die Anforderungen an die Durchführung von Berechnungen (siehe Abschnitte 3 und 4), Messunsicherheit (siehe Abschnitt 5), Bewertung (siehe Abschnitt 7) und Dokumentation (siehe Abschnitt 10).

Hinweis: Für weitere Informationen siehe Anhang 5.

10 Ergebnisdokumentation, Messbericht

(1) Die Ergebnisse aus der Informationsermittlung sowie aller durchgeführten Messungen, Berechnungen, Simulationsrechnungen, Beurteilungen und Bewertungen sind widerspruchsfrei und objektiv in einer Ergebnisdokumentation (z. B. Messbericht) festzuhalten.

(2) Diese muss sämtliche Informationen, die für die Interpretation der Ergebnisse, der Beurteilung und der Bewertung sowie für die Nachvollziehbarkeit der angewandten Verfahren erforderlich sind, enthalten.

Hinweis: Eine Übersicht über den Inhalt des Messberichts ist in Anhang 2 Abschnitt A2.4 vorgehalten.

(3) Nach § 3 Absatz 6 EMFV hat der Arbeitgeber die Ergebnisse aus Messungen, Berechnungen oder Simulationen nach der Erstellung in einer Form aufzubewahren, die eine spätere Einsichtnahme ermöglicht.

(4) Die Ergebnisdokumentation ist Teil der Gefährdungsbeurteilung. Wurde bei der Bewertung festgestellt, dass die oberen ALS bei nichtthermischen oder die ALS bei thermischen Wirkungen nach den Anhängen 2 und 3 EMFV überschritten werden, ist die Ergebnisdokumentation und damit die ermittelten Ergebnisse aus Messungen oder Berechnungen nach § 3 Absatz 6 EMFV mindestens 20 Jahre aufzubewahren.

Hinweis: Ist dies nicht der Fall, wird dennoch empfohlen, die Unterlagen zum Zwecke der Nachvollziehbarkeit abgeleiteter Maßnahmen als Bestandteil der Gefährdungsbeurteilung aufzubewahren.

11 Literaturhinweise

11.1 Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln

Nationales Regelwerk

BetrSichV	Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV)
EMFV	Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder (Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV)
TREMF HF	Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – Beurteilung der Gefährdungen durch elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz
TREMF MR	Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – Magnetresonanzverfahren

11.2 DGUV-Publikationen

DGUV V 3	DGUV Vorschrift 3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“, von April 1979, aktualisierte Fassung Januar 1997
DGUV-I 203-038	DGUV Information 203-038 „Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen“ von Oktober 2006

11.3 Normen und Leitfäden

DIN EN 50413:2009	Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)
DIN EN 61786-1	Messung von magnetischen Gleichfeldern und von elektrischen und magnetischen Wechselfeldern von 1 Hz bis 100 kHz im Hinblick auf die Exposition von Personen – Teil 1: Anforderungen an Messgeräte (IEC 61786-1:2013); Deutsche Fassung EN 61786-1:2014
DIN EN IEC 62822-1	Elektrische Schweißeinrichtungen - Bewertung in Bezug auf Begrenzungen der Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz) – Teil 1: Produktfamiliennorm; Deutsche Fassung EN IEC 62822-1:2018
DIN EN ISO 13849	Normenreihe Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen
DIN EN ISO 17025	Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017
Leitfaden EA-4/02 M	Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, deutsche Übersetzung, Deutsche Akkreditierungsstelle, 2013
FB 457	Forschungsbericht „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“, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Mai 2015
AKNIR EMF-Leitfaden	Leitfaden "Elektromagnetische Felder", FS-2019-180-AKNIR, Fachverband für Strahlenschutz e.V., Köln, November 2019, https://www.fs-ev.org/service/veroeffentlichungen

11.4 Sonstiges

Feynmann, 2007	Feynmann, R. P.: „Feynmann – Vorlesungen über Physik“, Band 2, 2007
----------------	---

Anhang 1: Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen, Expositionszonen

Hinweis: In der EMFV sind die ALS im Niederfrequenzbereich als Spitzenwerte und im Hochfrequenzbereich als Effektivwerte angegeben. Die Effektivwerte gelten ausschließlich für sinusförmige Signalformen einer Frequenz. Eine Umrechnung des Spitzenwertes in einen Effektivwert ist grundsätzlich nicht möglich; siehe Teil „Allgemeines“ Abschnitt 4.8 für weitere Informationen.

A1.1 Überblick über die anzuwendenden Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen

Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, welche ALS und EGW für eine Bewertung der Exposition gegenüber EMF heranzuziehen sind. Die detaillierten Werte sind in den folgenden Abschnitten in Tabellenform bereitgestellt.

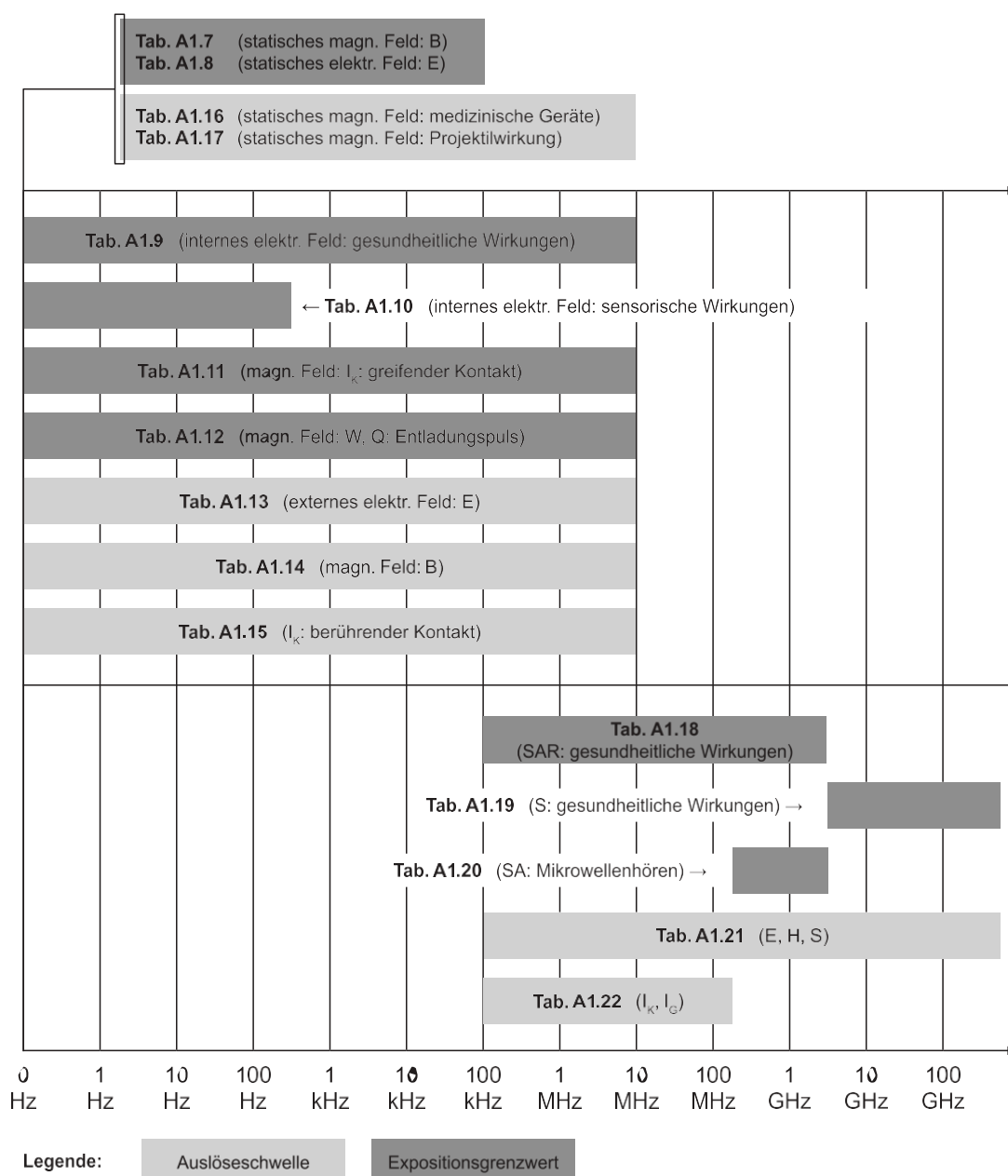


Abb. A1.1 Übersicht über die Gültigkeitsbereiche der Auslöseschwellen und Expositionsgrenzwerte in Abhängigkeit von der Frequenz

A1.2 Expositionszonen

A1.2.1 Expositionszonen für statische Felder

Tab. A1.1 Expositionszonen für statische elektrische Felder

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\hat{E}_e \left(\frac{V}{m} \right)$
	Expositionszone 0
0 Hz	$2,82 \cdot 10^4$

- Anmerkung 1: Spitzenwerte der externen elektrischen Feldstärke sind als obere Grenze der jeweiligen Zone angegeben.
- Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber elektrischen Feldern stellen die gemessenen oder berechneten räumlichen Maximalwerte am Arbeitsplatz von Beschäftigten dar. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Bewertung der Messergebnisse an unterschiedlichen räumlichen Messorten eines Arbeitsplatzes.
- Anmerkung 3: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Messtechnik oder das Messverfahren für ein Messergebnis an einem bestimmten Messort.

Tab. A1.2 Expositionszonen für statische magnetische Felder

Frequenzbereich	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $\hat{B}$ (T)		
	Expositionszone 0	Expositionszone 1	Expositionszone 3
0 Hz	$0,5 \cdot 10^{-3}$	2	8

- Anmerkung 1: Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte sind als obere Grenze der jeweiligen Zone angegeben.
- Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern stellen die gemessenen oder berechneten räumlichen Maximalwerte am Arbeitsplatz von Beschäftigten dar. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Bewertung der Messergebnisse an unterschiedlichen räumlichen Messorten eines Arbeitsplatzes.
- Anmerkung 3: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Messtechnik oder das Messverfahren für ein Messergebnis an einem bestimmten Messort.

A1.2.2 Expositionszonen für zeitveränderliche elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich bis 10 MHz

Tab. A1.3 Expositionszonen für elektrische Felder im Frequenzbereich bis 10 MHz

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\hat{E}_e \left(\frac{V}{m} \right)$		
	Expositionszone 0	Expositionszone 1	Expositionszone 2
$0 \text{ Hz} < f \leq 15,9 \text{ Hz}$	$2,82 \cdot 10^4$	n. a.	n. a.
$15,9 \text{ Hz} < f < 25 \text{ Hz}$	$4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$2,82 \cdot 10^4$	n. a.
$25 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz}$	$4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$2,82 \cdot 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1 \text{ kHz}$	$4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$1,41 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$1 \text{ kHz} \leq f < 1,2534 \text{ kHz}$	$450 \cdot 10^{-3} \cdot f$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$1,41 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$1,2534 \text{ kHz} \leq f < 1,635 \text{ kHz}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	$1,41 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$1,635 \text{ kHz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	862
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 1,007 \text{ MHz}$	236	n. a.	862
$1,007 \text{ MHz} < f \leq 3,68 \text{ MHz}$	236	n. a.	$868 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$3,68 \text{ MHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$868 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	n. a.

n. a.: nicht anwendbar

Anmerkung 1: Spitzenwerte der externen elektrischen Feldstärke sind als obere Grenze der jeweiligen Zone angegeben, f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber elektrischen Feldern stellen die gemessenen oder berechneten räumlichen Maximalwerte am Arbeitsplatz von Beschäftigten dar. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Bewertung der Messergebnisse an unterschiedlichen räumlichen Messorten eines Arbeitsplatzes.

Anmerkung 3: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Messtechnik oder das Messverfahren für ein Messergebnis an einem bestimmten Messort.

Tab. A1.4 Expositionszonen für magnetische Felder im Frequenzbereich bis 10 MHz

Frequenzbereich	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ (T)			
	Expositionszone 0	Expositionszone 1	Expositionszone 2	Expositionszone 3
0 Hz < f < 0,0175 Hz	$0,7 \cdot 10^{-3}$	2	2	8
0,0175 Hz $\leq$ f < 0,1575 Hz	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	2	8
0,1575 Hz $\leq$ f < 0,21 Hz	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	2	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
0,21 Hz $\leq$ f $\leq$ 9,97 Hz	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
9,97 Hz < f < 25 Hz	$7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
25 Hz $\leq$ f < 300 Hz	$7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
300 Hz $\leq$ f $\leq$ 1 kHz	$7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
1 kHz < f < 3 kHz	$7 \cdot 10^{-9} \cdot f$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
3 kHz $\leq$ f $\leq$ 20,7 kHz	$21 \cdot 10^{-6}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	n. a.	$0,42 \cdot 10^{-3}$
20,7 kHz < f $\leq$ 48,769 kHz	$21 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	n. a.
48,769 kHz < f $\leq$ 138,095 kHz	$21 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	n. a.
138,095 kHz < f $\leq$ 10 MHz	$2,9 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	n. a.	n. a.

n. a.: nicht anwendbar

Anmerkung 1: Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte sind als obere Grenze der jeweiligen Zone angegeben, f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern stellen die gemessenen oder berechneten räumlichen Maximalwerte am Arbeitsplatz von Beschäftigten dar. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Bewertung der Messergebnisse an unterschiedlichen räumlichen Messorten eines Arbeitsplatzes.

Anmerkung 3: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Messtechnik oder das Messverfahren für ein Messergebnis an einem bestimmten Messort.

Anmerkung 4: Für den Übergang von Expositionszone 0 in 1 gilt der Spitzenwert der magnetischen Feldstärke

[H] = A/m als Schwellenwert (Tabelle A1.26), mit $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$; $\mu_r = 1$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$.

A1.2.3 Expositionszonen für elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz

Tab. A1.5 Expositionszonen für elektrische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\tilde{E}_e \left(\frac{V}{m} \right)$	
	Expositionszone 0	Expositionszone 2
$100 \text{ kHz} \leq f < 1,007 \text{ MHz}$	236	862
$1,007 \text{ MHz} \leq f \leq 3,68 \text{ MHz}$	236	$868 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$3,68 \text{ MHz} < f < 10 \text{ MHz}$	$868 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.
$10 \text{ MHz} \leq f \leq 400 \text{ MHz}$	86,8	n. a.
$400 \text{ MHz} < f < 2 \text{ GHz}$	$4,34 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	n. a.
$2 \text{ GHz} \leq f < 6 \text{ GHz}$	194,2	n. a.
$6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	194,2	n. a.

Frequenzbereich	Effektivwert der externen elektrischen Feldstärke $E_{e,eff} \left(\frac{V}{m} \right)$	
	Expositionszone 0	Expositionszone 2
$100 \text{ kHz} \leq f < 1,007 \text{ MHz}$	166,8	609
$1,007 \text{ MHz} \leq f \leq 3,68 \text{ MHz}$	166,8	$614 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$3,68 \text{ MHz} < f < 10 \text{ MHz}$	$614 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.
$10 \text{ MHz} \leq f \leq 400 \text{ MHz}$	61,4	n. a.
$400 \text{ MHz} < f < 2 \text{ GHz}$	$3,07 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	n. a.
$2 \text{ GHz} \leq f < 6 \text{ GHz}$	137,3	n. a.
$6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	137,3	n. a.

n. a.: nicht anwendbar

- Anmerkung 1: Spitzenwerte der externen elektrischen Feldstärke sind als obere Grenze der jeweiligen Zone angegeben, f ist die Frequenz in Hertz (Hz).
- Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen werden bis 10 GHz über ein repräsentatives Sechs-Minuten-Intervall gemittelt. Über 10 GHz werden die Auslöseschwellen über ein beliebiges Zeitintervall von jeweils 68 s gemittelt.
- Anmerkung 3: Die Leistungsdichte wird über ein beliebiges exponiertes Flächenelement von 20 cm² gemittelt. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm², sollte das 20-Fache des Wertes von 50 W/m², also 1 kW/m², nicht überschreiten.
- Anmerkung 4: Bei Hochfrequenzpulsen im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz berechnen sich die Spitzenwerte für die elektrischen Feldstärken E durch lineare Interpolation des 1,5-fachen Wertes der Auslöseschwelle bei 100 kHz und des 32-fachen Wertes bei 10 MHz (siehe TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8).
- Anmerkung 5: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden.

Tab. A1.6 Expositionszonen für magnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz

Frequenzbereich	Spitzenwert der magnetischen Feldstärke $\tilde{H}$ $\left(\frac{A}{m}\right)$	
	Expositionszone 0	Expositionszone 1
100 kHz < f ≤ 138,095 kHz	16,7	$2,31 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
138,095 kHz < f < 10 MHz	$2,31 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.
10 MHz ≤ f < 400 MHz	0,231	n. a.
400 MHz ≤ f < 2 GHz	$11,51 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{f}$	n. a.
2 GHz ≤ f < 6 GHz	0,515	n. a.
6 GHz ≤ f ≤ 300 GHz	0,515	n. a.

Frequenzbereich	Effektivwert der magnetischen Feldstärke H_{eff} $\left(\frac{A}{m}\right)$	
	Expositionszone 0	Expositionszone 1
100 kHz < f ≤ 138,095 kHz	11,8	$1,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
138,095 kHz < f < 10 MHz	$1,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.
10 MHz ≤ f < 400 MHz	0,163	n. a.
400 MHz ≤ f < 2 GHz	$8,14 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{f}$	n. a.
2 GHz ≤ f < 6 GHz	0,364	n. a.
6 GHz ≤ f ≤ 300 GHz	0,364	n. a.

n. a.: nicht anwendbar

Anmerkung 1: Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke sind als obere Grenze der jeweiligen Zone angegeben, f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen werden bis 10 GHz über ein repräsentatives Sechs-Minuten-Intervall gemittelt. Über 10 GHz werden die Auslöseschwellen über ein beliebiges Zeitintervall von jeweils $68 \cdot \frac{1}{f_{\text{MHz}}}$ Minuten gemittelt (wobei f die Frequenz in GHz ist).Anmerkung 3: Die Leistungsdichte wird über ein beliebiges exponiertes Flächenelement von 20 cm² gemittelt. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm², sollte das 20-Fache des Wertes von 50 W/m², also 1 kW/m², nicht überschreiten.

Anmerkung 4: Bei Hochfrequenzpulsen im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz berechnen sich die Spitzenwerte für die magnetischen Feldstärken H durch lineare Interpolation des 1,5-fachen Wertes der Auslöseschwelle bei 100 kHz und des 32-fachen Wertes bei 10 MHz (siehe TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8).

Anmerkung 5: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMF durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden.

Anmerkung 6: Für Frequenzen bis 138,095 kHz gilt für den Übergang von Expositionszone 0 in 1 der Spitzenwert der externen magnetischen Feldstärke $[H] = \frac{A}{m}$ (Tabelle A1.26).

A1.3 Expositionsgrenzwerte für EMF im Frequenzbereich bis 10 MHz nach Anhang 2 EMFV

Tab. A1.7 Expositionsgrenzwerte für die magnetische Flussdichte B von statischen Magnetfeldern, entspricht Tabelle A2.1 EMFV

Maximalwert der magnetischen Flussdichte $\tilde{B}$ (T)		
Sensorische Wirkungen (normale Arbeitsbedingungen)	Sensorische Wirkungen (lokale Exposition von Gliedermaßen)	Gesundheitliche Wirkungen (kontrollierte Arbeitsbedingungen)
2	8	8

- Anmerkung 1: Die Expositionsgrenzwerte in Tabelle A1.7 sind räumliche Maximalwerte für statische Magnetfelder zur Begrenzung der Wirkungen bei Beschäftigten, die in dem statischen Magnetfeld tätig werden. Wirkungen können insbesondere bei Bewegungen in den Bereichen mit hohen räumlichen Magnetfeldgradienten auftreten.
- Anmerkung 2: Bei Tätigkeiten in einem statischen Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte B bis 2 T sind die Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen nach Tabelle A1.10 für normale Arbeitsbedingungen im Frequenzbereich bis 10 Hz eingehalten.
- Anmerkung 3: Ist bei Tätigkeiten in einem statischen Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte B bis 8 T die Exposition nur auf die Gliedermaßen beschränkt, so sind die Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen nach Tabelle A1.10 im Frequenzbereich bis 10 Hz eingehalten.
- Anmerkung 4: Bei Tätigkeiten in einem statischen Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte B bis 8 T sind die Expositionsgrenzwerte für sensorische und gesundheitliche Wirkungen nach Tabelle A1.9 im Frequenzbereich bis 10 Hz nur für kontrollierte Arbeitsbedingungen eingehalten.

Tab. A1.8 Expositionsgrenzwert für die externe elektrische Feldstärke E_e von statischen elektrischen Feldern, entspricht Tabelle A2.2 EMFV

Maximalwert der externen elektrischen Feldstärke $\tilde{E}_e$ ($\frac{V}{m}$)
$2,82 \cdot 10^4$

- Anmerkung: Der Expositionsgrenzwert in Tabelle A1.8 ist ein räumlicher Maximalwert für statische elektrische Felder zur Begrenzung der Wirkungen bei Beschäftigten, die in dem statischen elektrischen Feld tätig werden.

Tab. A1.9 Expositionsgrenzwerte der internen elektrischen Feldstärke E_i für gesundheitliche Wirkungen im Frequenzbereich bis 10 MHz, entspricht Tabelle A2.3 EMFV

Frequenzbereich	Spitzenwert der internen elektrischen Feldstärke $\tilde{E}_i$ ($\frac{V}{m}$)
$0 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$	1,1
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$0,38 \cdot 10^{-3} \cdot f$

- Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).
- Anmerkung 2: Die Expositionsgrenzwerte der internen elektrischen Feldstärke E_i für gesundheitliche Wirkungen sind räumliche Maximalwerte im Körper von Beschäftigten.

Tab. A1.10 Expositionsgrenzwerte der internen elektrischen Feldstärke E_i für sensorische Wirkungen im Frequenzbereich bis 400 Hz, entspricht Tabelle A2.4 EMFV

Frequenzbereich	Spitzenwert der internen elektrischen Feldstärke $\tilde{E}_i$ ($\frac{V}{m}$)
$0 \text{ Hz} < f < 25 \text{ Hz}$	0,07
$25 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$	$2,8 \cdot 10^{-3} \cdot f$

- Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).
- Anmerkung 2: Die Expositionsgrenzwerte der internen elektrischen Feldstärke E_i für sensorische Wirkungen in Tabelle A1.10 sind räumliche Maximalwerte im Kopf von Beschäftigten.

Tab. A1.11 Expositionsgrenzwerte für kontinuierliche Kontaktströme I_K bei greifendem Kontakt, entspricht Tabelle A2.5 EMFV

Frequenzbereich	Spitzenwert des stationären zeitveränderlichen Kontaktstroms I_K (mA)
bis 3 kHz	5
$3 \text{ kHz} \leq f < 45 \text{ kHz}$	$\frac{f}{600}$
$45 \text{ kHz} \leq f < 100 \text{ kHz}$	75
$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	75

Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Durch den greifenden Kontakt wird die Kontaktfläche größer als bei berührendem Kontakt.

Tab. A1.12 Expositionsgrenzwerte für den Entladungspuls eines Kontaktstroms, entspricht Tabelle A2.6 EMFV

Maximale übertragene Entladungsenergie W (mJ)	Maximale übertragene Ladung Q (μC)
350	50

A1.4 Auslöseschwellen für EMF im Frequenzbereich bis 10 MHz nach Anhang 2 EMFV**Tab. A1.13** Auslöseschwellen für externe elektrische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 10 MHz, entspricht Tabelle A2.7 EMFV

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\vec{E}_e$ ($\frac{\text{V}}{\text{m}}$)	
	Untere Auslöseschwelle	Obere Auslöseschwelle
$0 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,82 \cdot 10^4$	$2,82 \cdot 10^4$
$25 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$2,82 \cdot 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1,635 \text{ kHz}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$1,41 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$1,635 \text{ kHz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$8,62 \cdot 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$2,36 \cdot 10^2$	$8,62 \cdot 10^2$

Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber elektrischen Feldern stellen die gemessenen oder berechneten räumlichen Maximalwerte am Arbeitsplatz von Beschäftigten dar. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Bewertung der Messergebnisse an unterschiedlichen räumlichen Messorten eines Arbeitsplatzes.

Anmerkung 3: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Messtechnik oder das Messverfahren für ein Messergebnis an einem bestimmten Messort.

Tab. A1.14 Auslöseschwellen für magnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 10 MHz, entspricht Tabelle A2.8 EMFV

Frequenzbereich	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ (T)		
	Untere Auslöseschwelle	Obere Auslöseschwelle	Auslöseschwelle für die Exposition von Gliedmaßen
$0 \text{ Hz} \leq f < 0,0175 \text{ Hz}$	2	2	8
$0,0175 \text{ Hz} \leq f < 0,1575 \text{ Hz}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	2	8
$0,1575 \text{ Hz} \leq f < 0,21 \text{ Hz}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	2	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$0,21 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-3}$

Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern stellen die gemessenen oder berechneten räumlichen Maximalwerte am Arbeitsplatz von Beschäftigten dar. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Bewertung der Messergebnisse an unterschiedlichen räumlichen Messorten eines Arbeitsplatzes.

Anmerkung 3: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden. Diese Anmerkung bezieht sich auf die Messtechnik oder das Messverfahren für ein Messergebnis an einem bestimmten Messort.

Tab. A1.15 Auslöseschwellen für Kontaktströme I_K bei berührendem Kontakt, entspricht Tabelle A2.9 EMFV

Frequenzbereich	Spitzenwert des stationären zeitveränderlichen Kontaktstroms I_K (mA)
Bis 3 kHz	1
$3 \text{ kHz} \leq f < 45 \text{ kHz}$	$\frac{f}{3000}$
$45 \text{ kHz} \leq f < 100 \text{ kHz}$	15
$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	15

Anmerkung: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Tab. A1.16 Auslöseschwellen der magnetischen Flussdichte B bei statischen Magnetfeldern für die Beeinflussung von implantierten aktiven oder am Körper getragenen medizinischen Geräten, z. B. Herzschrittmacher, entspricht Tabelle A2.10 EMFV

Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ (mT)	
Untere Auslöseschwelle	Obere Auslöseschwelle
0,5	1

Tab. A1.17 Auslöseschwellen der magnetischen Flussdichte B für die Projektilwirkung von ferromagnetischen Gegenständen im Streufeld von Anlagen mit hohen statischen Magnetfeldern (> 100 mT), entspricht Tabelle A2.11 EMFV

Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ (mT)		
Untere Auslöseschwelle	Obere Auslöseschwelle	
	aktiv geschirmte Magnete	sonstige Magnete
3	30	60

A1.5 Expositionsgrenzwerte für EMF im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz nach Anhang 3 EMFV

Tab. A1.18 Expositionsgrenzwerte der spezifischen Absorptionsrate SAR für gesundheitliche Wirkungen von elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 6 GHz, entspricht Tabelle A3.1 EMFV

Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen	Spezifische Absorptionsrate SAR $\left(\frac{W}{kg}\right)$
Ganzkörpermittelwert der SAR	0,4
Lokale SAR-Wärmebelastung für Kopf und Rumpf	10
Lokale SAR-Wärmebelastung für Gliedmaßen	20

Anmerkung 1: Die SAR-Werte sind über ein Sechs-Minuten-Intervall zu mitteln.

Anmerkung 2: Lokale SAR-Werte sind über 10 g eines beliebigen zusammenhängenden Körpergewebes zu mitteln.

Tab. A1.19 Expositionsgrenzwert der Leistungsdichte S für gesundheitliche Wirkungen bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 6 GHz bis 300 GHz, entspricht Tabelle A3.2 EMFV

Frequenzbereich	Expositionsgrenzwert der Leistungsdichte S $\left(\frac{W}{m^2}\right)$
$6\text{ GHz} \leq f \leq 300\text{ GHz}$	50

Anmerkung: Die Leistungsdichte wird über jedes Flächenelement von 20 cm^2 gemittelt. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm^2 , darf das 20-Fache des Wertes von 50 W/m^2 , also 1 kW/m^2 , nicht überschreiten. Leistungsdichten im Frequenzbereich von 6 GHz bis 10 GHz werden über repräsentative Sechs-Minuten-Intervalle gemittelt. Oberhalb von 10 GHz wird die Leistungsdichte über ein beliebiges Zeitintervall von jeweils $68 \cdot \frac{1}{f^{1,02}}$ Minuten gemittelt (wobei f die Frequenz in GHz ist).

Tab. A1.20 Expositionsgrenzwert der lokalen spezifischen Energieabsorption SA für sensorische Wirkungen von gepulsten elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0,3 GHz bis 6 GHz (Mikrowellenhören), entspricht Tabelle A3.3 EMFV

Frequenzbereich	Expositionsgrenzwert der lokalen spezifischen Energieabsorption SA $\left(\frac{mJ}{kg}\right)$
$0,3\text{ GHz} \leq f \leq 6\text{ GHz}$	10

Anmerkung 1: Die zu mittelnnde Gewebemasse für lokale SA beträgt 10 g.

Anmerkung 2: Die sensorische Wirkung des Mikrowellenhörens kann nur bei Pulsbreiten kleiner als $30\text{ }\mu\text{s}$ auftreten.

A1.6 Auslöseschwellen für EMF im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz nach Anhang 3 EMFV

Tab. A1.21 Auslöseschwellen für elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz, entspricht Tabelle A3.4 EMFV

Frequenzbereich	Effektivwert der elektrischen Feldstärke $E_{\text{eff}} \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right)$	Effektivwert der magnetischen Feldstärke $H_{\text{eff}} \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$	Mittelwert der Leistungsdichte $S \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	614	$1,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	—
$1 \text{ MHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$614 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	$1,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	—
$10 \text{ MHz} \leq f < 400 \text{ MHz}$	61,4	0,163	10
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	$3,07 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$8,14 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{f}$	$25 \cdot 10^{-9} \cdot f$
$2 \text{ GHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	137,3	0,364	50

Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Auslöseschwellen für E , H und S werden bis 10 GHz über ein Sechs-Minuten-Intervall gemittelt. Über 10 GHz werden die Auslöseschwellen für E , H und S über ein beliebiges Zeitintervall von jeweils $68 \cdot \frac{1}{f^{1,05}}$ Minuten gemittelt (wobei f die Frequenz in GHz ist).

Anmerkung 3: Die Leistungsdichte wird über ein beliebiges exponiertes Flächenelement von 20 cm² gemittelt. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm², sollte das 20-Fache des Wertes von 50 W/m², also 1 kW/m², nicht überschreiten.

Anmerkung 4: Bei Hochfrequenzpulsen im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz berechnen sich die Spitzenwerte für die elektrischen Feldstärken E durch Interpolation des 1,5-fachen Wertes der Auslöseschwelle bei 100 kHz und des 32-fachen Wertes bei 10 MHz in Tabelle A1.21. Bei Frequenzen über 10 MHz überschreitet die über die Impulsbreite gemittelte Leistungsdichte S_{eq} nicht das Tausendfache der Auslöseschwellen oder die Feldstärken nicht das 32-Fache der entsprechenden Auslöseschwellen; für weitere Informationen siehe TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8 Absatz 3.

Anmerkung 5: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMFV durchzuführenden Bewertung der Exposition können Mess- oder Berechnungsverfahren mit definierter räumlicher Mittelung nach dem Stand der Technik angewendet werden.

Tab. A1.22 Auslöseschwellen für stationäre Kontaktströme I_K und induzierte Ströme durch die Gliedmaßen I_G im Frequenzbereich von 100 kHz bis 110 MHz, entspricht Tabelle A3.5 EMFV

Frequenzbereich	Effektivwert des stationären zeitveränderlichen Kontaktstroms $I_K \text{ (mA)}$	Effektivwert des induzierten Stroms durch eine beliebige Gliedmaße $I_G \text{ (mA)}$
$100 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	40	—
$10 \text{ MHz} \leq f \leq 110 \text{ MHz}$	40	100

Anmerkung: Die Auslöseschwellen I_K und I_G werden jeweils über ein Sechs-Minuten-Intervall gemittelt.

Neben der Angabe von zulässigen Werten für Dauerexposition (siehe Tabelle A1.21) sind für EMF mit nicht konstanter Leistungsabgabe wegen der Thermoregulation des Körpers höhere Werte zulässig (siehe TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8). Diese höheren Werte sind für jeden Einzelfall mit den in der Tabelle A1.23 enthaltenen Formeln zu bestimmen. Bei Anwendung der Werte nach Tabelle A1.23 ist zusätzlich sicherzustellen, dass die Spitzenwerte nach Tabelle A1.24 nicht überschritten werden.

Tab. A1.23 Höchstwerte der ALS für Mittelungsintervalle nach Tabelle A3.4 Anmerkung 2 EMFV

Frequenzbereich	Mittelungsintervall T_M in s	Höchstwert von $\sum E_{i,\text{eff}}^2 \cdot t_i$ in $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)^2 \cdot \text{s}$	Höchstwert von $\sum H_{i,\text{eff}}^2 \cdot t_i$ in $\left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right)^2 \cdot \text{s}$	Höchstwert von $\sum S_i \cdot t_i$ in $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) \cdot \text{s}$
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	360	$1,36 \cdot 10^8$	$9,56 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{f^2}$	—
$1 \text{ MHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	360	$1,36 \cdot 10^{20} \cdot \frac{1}{f^2}$	$9,56 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{f^2}$	—
$10 \text{ MHz} \leq f < 400 \text{ MHz}$	360	$1,36 \cdot 10^6$	9,56	$3,60 \cdot 10^3$
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	360	$3,39 \cdot 10^{-3} \cdot f$	$2,39 \cdot 10^{-8} \cdot f$	$9 \cdot 10^{-6} \cdot f$
$2 \text{ GHz} \leq f < 10 \text{ GHz}$	360	$6,79 \cdot 10^6$	47,7	$18 \cdot 10^3$
$10 \text{ GHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	$68 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f^{1,05}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}$, mit f in GHz, $363,63 > T_M > 10,23$	$76,9 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f^{1,08}}$ (f in GHz)	$541 \cdot \frac{1}{f^{1,08}}$ (f in GHz)	$204 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{f^{1,08}}$ (f in GHz)

Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz), wenn nicht anders in Formel aufgeführt; $E_{i,\text{eff}}$ und $H_{i,\text{eff}}$ sind Effektivwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke während des i -ten Intervalls; S_i Mittelwert der Leistungsdichte während des i -ten Intervalls; t_i Dauer des i -ten Intervalls in Sekunden.

Anmerkung 2: Die Leistungsdichte wird über ein beliebiges exponiertes Flächenelement von 20 cm^2 gemittelt. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm^2 , sollte das 20-Fache des Wertes von 50 W/m^2 , also 1 kW/m^2 , nicht überschreiten.

Tab. A1.24 Spitzenwerte der ALS und der über die Impulsbreite gemittelten Leistungsdichte (Tabelle A3.4 Anmerkung 4 EMFV)

Frequenzbereich	Spitzenwert der elektrischen Feldstärke $E_{\text{eff,max}} \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right)$	Spitzenwert der magnetischen Feldstärke $H_{\text{eff,max}} \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$	Spitzenwert der über die Impulsbreite gemittelten Leistungsdichte S_{eq} $\bar{S}_{\text{eq,max}} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$
$f = 100 \text{ kHz}$	921	24,45	—
$100 \text{ kHz} < f \leq 1 \text{ MHz}$	$0,436 \cdot f^{0,665}$	$1156,6 \cdot \frac{1}{f^{0,335}}$	—
$1 \text{ MHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$0,436 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f^{0,335}}$	$1156,6 \cdot \frac{1}{f^{0,335}}$	—
$10 \text{ MHz} < f < 400 \text{ MHz}$	$1,96 \cdot 10^3$	5,22	$10 \cdot 10^3$
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	$0,098 \cdot \sqrt{f}$	$0,26 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$25 \cdot 10^{-6} \cdot f$
$2 \text{ GHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	$4,39 \cdot 10^3$	11,65	$50 \cdot 10^3$

Anmerkung 1: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anmerkung 2: Die Leistungsdichte wird über ein beliebiges exponiertes Flächenelement von 20 cm^2 gemittelt. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm^2 , sollte das 20-Fache des Wertes von 50 W/m^2 , also 1 kW/m^2 , nicht überschreiten.

Anmerkung 3: Die Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke im Frequenzbereich $100 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$ wurden zur Aussage in Tabelle A3.4 Anmerkung 4 EMFV ergänzt (siehe TREMF HF Teil 2 Abschnitt 8).

A1.7 Schwellenwerte zur Gewährleistung der Sicherheit von besonders schutzbedürftigen Beschäftigten

A1.7.1 Schwellenwerte zur Beeinflussung aktiver Implantate im Sinne des Forschungsberichts FB 451

Tab. A1.25 Schwellenwerte der externen elektrischen Feldstärke E_e , die die Sicherheit von Personen mit aktiven medizinischen Implantaten im Sinne des Forschungsberichts FB 451 gewährleisten (nach Tabelle 6.3 FB 451 bzw. Anhang 1 Tabelle A1.13)

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\hat{E}_e$ (V/m)
0 Hz < f ≤ 15,9 Hz	28200
15,9 Hz < f ≤ 1000 Hz	$4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$
1000 Hz < f ≤ 3000 Hz	$0,45 \cdot f$
3 kHz < f ≤ 25 kHz	1350
25 kHz < f ≤ 167 kHz	$0,055 \cdot f$
167 kHz < f ≤ 300 kHz	9185
300 kHz < f ≤ 1 MHz	$2,77 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{f}$
1 MHz < f ≤ 5,33 MHz	2770
5,33 MHz < f ≤ 10 MHz	$6,16 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{(f \cdot 10^{-6})^{1,85}}$
10 MHz < f ≤ 16,9 MHz	$6,16 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{(f \cdot 10^{-6})^{2,85}}$
16,9 MHz < f ≤ 200 MHz	195
200 MHz < f ≤ 400 MHz	$3,36 \cdot 10^{-5} \cdot (f \cdot 10^{-6})^{2,94}$
400 MHz < f ≤ 1,5 GHz	1500
1,5 GHz < f ≤ 2,5 GHz	$446 \cdot 10^{-27} \cdot f^3$

Anmerkung: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Tab. A1.26 Schwellenwerte der externen magnetischen Feldstärke H und Flussdichte B , die die Sicherheit von Personen mit aktiven medizinischen Implantaten im Sinne des Forschungsberichts FB 451 gewährleisten (nach Tabelle 6.4 FB 451), mit $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$; $\mu_r = 1$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen magnetischen Feldstärke $\hat{H} \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$	Spitzenwert der externen magnetischen Flussdichte $\hat{B} \text{ (T)}$
$0 \text{ Hz} < f \leq 9,97 \text{ Hz}$	555	$697 \cdot 10^{-6}$
$9,97 \text{ Hz} < f \leq 1000 \text{ Hz}$	$5555 \cdot \frac{1}{f}$	$6,97 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$
$1000 \text{ Hz} < f \leq 3000 \text{ Hz}$	$5,55 \cdot 10^{-3} \cdot f$	$6,97 \cdot 10^{-9} \cdot f$
$3 \text{ kHz} < f \leq 167 \text{ kHz}$	16,7	$21 \cdot 10^{-6}$
$167 \text{ kHz} < f \leq 1 \text{ MHz}$	$2778 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{f}$	$3,5 \cdot \frac{1}{f}$
$1 \text{ MHz} < f \leq 5,33 \text{ MHz}$	2,78	$3,5 \cdot 10^{-6}$
$5,33 \text{ MHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$14,8 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	$18,6 \cdot \frac{1}{f}$
$10 \text{ MHz} < f \leq 16,9 \text{ MHz}$	$148 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1}{f^2}$	$1,86 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{f^2}$
$16,9 \text{ MHz} < f \leq 200 \text{ MHz}$	0,52	$0,65 \cdot 10^{-6}$
$200 \text{ MHz} < f \leq 400 \text{ MHz}$	$8,9 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{f}{10^6} \right)^{2,94}$	$11,18 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{f}{10^6} \right)^{2,94}$
$400 \text{ MHz} < f \leq 1,5 \text{ GHz}$	4	$5,03 \cdot 10^{-6}$
$1,5 \text{ GHz} < f \leq 2,5 \text{ GHz}$	$1,18 \cdot 10^{-27} \cdot f^3$	$1,48 \cdot 10^{-23} \cdot f^3$

Anmerkung: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

A1.7.2 Schwellenwerte zur Beeinflussung passiver Implantate

Tab. A1.27 Schwellenwerte der externen elektrischen Feldstärke E_e , die die Sicherheit von Personen mit passiven medizinischen Implantaten gewährleisten (nach Tabelle 6.5 FB 451)

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\hat{E}_e \left(\frac{V}{m} \right)$
$0 \text{ Hz} < f \leq 53,3 \text{ Hz}$	28200
$53,3 \text{ Hz} < f \leq 1000 \text{ Hz}$	$1,51 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$1000 \text{ Hz} < f \leq 576 \text{ kHz}$	1510
$576 \text{ kHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$8,68 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{f}$
$10 \text{ MHz} < f \leq 400 \text{ MHz}$	86,8
$400 \text{ MHz} < f \leq 2 \text{ GHz}$	$4,34 \cdot 10^{-3} \sqrt{f}$
$2 \text{ GHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$	194

Anmerkung: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Tab. A1.28 Schwellenwerte der externen magnetischen Feldstärke H und Flussdichte B , die die Sicherheit von Personen mit passiven medizinischen Implantaten gewährleisten (nach Tabelle 6.6 FB 451), mit

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H; \mu_r = 1; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen magnetischen Feldstärke $\hat{H} \left(\frac{A}{m} \right)$	Spitzenwert der externen magnetischen Flussdichte $\hat{B} \text{ (T)}$
$0 \text{ Hz} < f \leq 1,6 \text{ Hz}$	47750	$60 \cdot 10^{-3}$
$1,6 \text{ Hz} < f \leq 1000 \text{ Hz}$	$76400 \cdot \frac{1}{f}$	$96 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$
$1000 \text{ Hz} < f \leq 91 \text{ kHz}$	76,4	$96 \cdot 10^{-6}$
$91 \text{ kHz} < f \leq 30 \text{ MHz}$	$6,93 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	$8,71 \cdot \frac{1}{f}$
$30 \text{ MHz} < f \leq 400 \text{ MHz}$	0,231	$0,29 \cdot 10^{-6}$
$400 \text{ MHz} < f \leq 2 \text{ GHz}$	$11,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$14,5 \cdot 10^{-12} \sqrt{f}$
$2 \text{ GHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$	0,515	$0,647 \cdot 10^{-6}$

Anmerkung: f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Anhang 2: Ergänzungen zur Ermittlung der Exposition

A2.1 Allgemeines

(1) Ergänzend zu den Festlegungen in Abschnitt 4.1.3 werden nachstehend Besonderheiten bei der Durchführung von Expositionsmessungen im Frequenzbereich mit $f \leq 100$ kHz beschrieben:

1. Bei zeitabhängiger Richtung der Feldvektoren, z. B. Drehfelder von dreiphasigen Leiteranordnungen, ist die mit eindimensionalen Messwertaufnehmern (Feldsonden mit Richtcharakteristik) gemessene maximale Feldstärke immer kleiner als der Feldstärkewert, der aus Messungen in drei orthogonalen Achsen berechnet werden kann. In diesem Fall muss in drei orthogonalen Achsen gemessen und aus den Einzelmesswerten die Summenfeldstärke berechnet werden.
2. Es ist bei der Messung der elektrischen Feldstärke besonders darauf zu achten, dass die Messergebnisse nicht durch die feldverzerrende Wirkung von Personen oder Gegenständen, z. B. Messleitungen und Pflanzenbewuchs, unzulässig beeinflusst werden. Deshalb werden die Geräte zur Messung der elektrischen Feldstärke entweder an einer Isolierstange ins Feld gehalten oder das Messgerät befindet sich auf einem nicht leitfähigen Stativ. Die Messwertübertragung erfolgt über einen Lichtwellenleiter zu einem abgesetzten Anzeigeteil (potentialfreie Messung). Auf diesbezügliche Angaben des Geräteherstellers ist zu achten.
3. Bei inhomogenen elektrischen Feldern sind Messverfahren, die den Gesamtkörperableitstrom erfassen, zulässig.
4. Verzerrungen des magnetischen Feldes sind nur durch Gegenstände aus Metall (Stahlträger, Armierungen, Blechtüren und -bedachungen, Fahrzeuge) zu erwarten. Personen beeinflussen das magnetische Feld nicht, sodass die Messgeräte vom Messenden direkt ins Feld gebracht werden dürfen.

(2) Für Festlegungen zur Durchführung von Expositionsmessungen im Frequenzbereich mit $f > 100$ kHz siehe TREMF HF Teil 2.

(3) Feldsonden mit isotroper Empfangscharakteristik, die durch eine orthogonale Anordnung von drei Messwertaufnehmern im Sondenkopf erzielt wird, liefern einen von Einfallsrichtung und Polarisation des zu messenden Feldes weitgehend unabhängigen Messwert. Das Zusammenführen der Einzelsignale nach der Summenformel führt zu einer Summenfeldstärke, die den beschriebenen Messwert darstellt. Feldsonden mit nur einem Messwertaufnehmer oder einachsige Messantennen weisen eine Richtcharakteristik auf und erfordern eine Orientierung der Sonde bzw. Antenne im Feld mit Maximumanzeige am Messgerät.

(4) Bei der Ausbreitung eines EMF kann es zu Inhomogenitäten z. B. aufgrund geringer Nähe zur EMF-Quelle, zu Konstruktionselementen oder zu leitfähigen Oberflächen kommen. Um eine Beeinflussung des Messwertaufnehmers zu vermeiden, müssen ggf. Mindestabstände zu Gegenständen in der Umgebung des Messwertaufnehmers berücksichtigt werden (siehe Herstellerangaben zum Messwertaufnehmer oder in Messvorschriften einschlägiger Produktnormen). Bei Nichteinhaltung der Mindestabstände ist die Verlässlichkeit der Feldstärkemessung nicht mehr in dem Maße gegeben wie bei Einhaltung der Abstände. Es ist sowohl eine Über- als auch Unterbewertung denkbar. Da es jedoch bei der Ausübung von Tätigkeiten sehr wohl sein kann, dass die Aufenthaltsbereiche von Beschäftigten (Ganz- oder Teilkörperexposition) innerhalb dieser Mindestabstände liegen, ist eine Bewertung dieser Inhomogenitäten zur korrekten Ermittlung der auftretenden Exposition unbedingt notwendig. Das heißt,

dass bei Messungen am Arbeitsplatz diese Mindestabstände nur dann berücksichtigt werden dürfen, wenn sichergestellt ist, dass es zu keiner Exposition von Beschäftigten (Ganz- oder Teilkörperexposition) innerhalb dieser Mindestabstände kommt.

(5) ALS sind festgelegte Werte von direkt messbaren physikalischen Größen. Bei ALS, die von EGW abgeleitet sind, bedeutet die Einhaltung dieser ALS, dass die entsprechenden EGW nicht überschritten werden. Bei Exposition oberhalb dieser ALS sind Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten zu ergreifen, es sei denn, dass die relevanten EGW nachweislich eingehalten sind.

(6) Analytische Berechnungsmethoden lassen sich anwenden, wenn die reale komplexe Expositionssituation in ein stark vereinfachendes Modell übertragen werden kann. Auf diese Weise können Näherungsergebnisse für die Feldgrößen um eine Feldquelle herum oder im Inneren des menschlichen Körpers ermittelt werden.

Numerische Berechnungsmethoden ermöglichen es, deutlich mehr Details, wie z. B. die Komplexität des menschlichen Körpers, zu berücksichtigen. Die Ergebnisse lassen sich unter Berücksichtigung der vollständigen zugrundeliegenden physikalischen Feldgleichungen ermitteln. Oftmals werden aber auch bei diesen Methoden Näherungen eingesetzt.

A2.2 Messung von Effektiv- und Spitzenwert

Die Tabellen in Anhang 1 geben teilweise Spitzenwert und teilweise Effektivwert (RMS-Wert) einer Feldgröße an. Messgeräte müssen also in vielen Fällen beide Werte liefern, da eine Berechnung des Spitzenwerts aus dem gemessenen Mittelwert nur in Spezialfällen möglich ist (z. B. bei einem rein sinusförmigen Zeitverlauf des gemessenen Feldes).

Messgeräte für niederfrequente Felder liefern meist sowohl den Effektivwert als auch den Spitzenwert des gemessenen Feldes.

Den „Spitzenwert“ im Sinne der EMFV bzw. der TREMF (z. B. bei Grenzwertvergleich für Frequenzen unter 10 MHz oder bei Vergleich mit den Grenzwerten für Implantatbeeinflussung) erhält man, wenn man den vom Analysator angegebenen „Peak-Wert“ noch mit dem Faktor $\sqrt{2} \approx 1,414$ multipliziert.

A2.3 Messprotokoll

Das Messprotokoll enthält, soweit zutreffend, folgende Angaben:

1. Allgemeine Angaben:
 - a) Anlass und Ziel der Messung,
 - b) Name und Adresse des Betriebs ggf. mit Angabe des Standorts,
 - c) Datum der Messung und
 - d) Angaben zu den Personen, die an der Messung teilnahmen;
2. Angaben zum Arbeitsplatz und den dort vorhandenen EMF-Quellen:
 - a) Ort und Zeit der Messung (z. B. Gebäudebezeichnung, Raumnummer),
 - b) Zugänglichkeit (Zugangsbeschränkungen, Befugnisse),
 - c) klimatische Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte), auch während der Messung zu protokollieren,
 - d) Beschreibung des Arbeitsplatzes mit Identifikation und Beschreibung von dort vorhandenen EMF-Quellen unter Angabe von:
 - Art der EMF-Quelle, ggf. Funktionsprinzip, Anlagen- oder Generatorbezeichnung,
 - Hersteller,
 - Modell, Typ,
 - Baujahr,
 - Seriennummer, Fabriknummer,
 - Verwendungszweck,

- maximale Betriebsspannung und -strom,
 - maximale Ausgangsleistung,
 - Betriebsspannung und -strom, Mastbild und Bodenabstand der Leiterseile (Energieversorgungs- und Bahnstromanlagen),
 - dominierende Feldart (elektrisch, magnetisch, elektromagnetisch),
 - Arbeitsfrequenz(en),
 - kontinuierlicher oder gepulster Feldverlauf, ggf. Angaben zu Pulsdauern, Pausen, zeitlichem Verlauf des Pulses und
 - Modulation,
 - e) ggf. Skizzen und/oder Fotos zur Dokumentation von z. B. Abständen, Abmessungen, dem Arbeitsbereich oder der Lage der Feldquellen zueinander;
3. Angaben zu den Arbeitsbedingungen während des Arbeitsprozesses:
- a) Ablauf des Arbeitsprozesses/Art der Tätigkeit (Bedienung, Wartung, Instandsetzung...),
 - b) Betriebsart und betriebliche Anlagenauslastung,
 - c) effektive Expositionszeit pro Tag, Taktzeiten,
 - d) räumliche Position des Beschäftigten gegenüber der Feldquelle (ggf. mit Skizze und/oder Foto),
 - e) mögliche minimale Annäherung an die Feldquelle/Erreichbarkeit von Teilen der Feldquelle mit den Extremitäten Hand/Arm;
4. Angaben zu den verwendeten Messgeräten und Messsonden:
- a) Herstellername, Modell und Seriennummer,
 - b) Spezifikationen des Messgeräts (Messbereiche, Frequenzbereiche, Messgenauigkeit),
 - c) Bezeichnung und Eigenschaften der verwendeten Sondentypen (z. B. Richtcharakteristik (isotrop, einachsig), Messfläche),
 - d) Datum der letzten Kalibrierung;
5. Angaben zur Messung:
- a) Einstellungen des Messgeräts während der Messung, z. B.
 - Einstellungen des Messgeräts (z. B. Messbereich, Durchlassband, Aufnahme- bzw. Abtastfrequenz),
 - Messbereich,
 - Frequenzfilter;
 - b) Messmethode
 - orientierende Messung (Maximum-Suche in einem Messvolumen),
 - Punktmessung:
 - Lage der Messpunkte,
 - Begründung für die Lage der Messpunkte,
 - Dokumentation des Messorts bzw. der Lage der Messpunkte durch Lageskizze oder Fotos;
6. Eindeutige Angaben zu den Messwerten, wie:
- a) Einheit des Wertes,
 - b) Art des Wertes (Spitzenwert, Effektivwert),
 - c) zeitliche oder räumliche Mittelungen,
 - d) Art der gemessenen Feldkomponente (Gesamtfeld, x-, y- oder z-Komponenten),
 - e) ggf. statistische Informationen, z. B. die höchsten und niedrigsten Feldwerte, Mittelwert (Median), geometrisches Mittel usw.,

- f) bei der Aufnahme von Spektren und zeitlichen Feldverläufen
 - Frequenzauflösung,
 - Amplitudenauflösung,
 - Aufnahme- bzw. Abtastfrequenz,
- g) Angaben zur Messunsicherheit (siehe Abschnitt 5).

A2.4 Messbericht

Der Messbericht umfasst in der Regel folgende Angaben:

1. Allgemeine Informationen
 - a) eindeutige Identifikation des Messberichts (z. B. Berichtsnummer),
 - b) Anlass und Ziel der Messung,
 - c) Angaben zu der Stelle und Person, die die Messung durchgeführt hat,
 - d) Zeitpunkt und Dauer der Messung,
 - e) Angaben zur Tätigkeit und zum Arbeitsplatz,
 - f) falls relevant Angaben zu exponierten Personen,
 - g) Analyse der Arbeitsaufgabe,
 - h) wesentliche Informationen aus dem Messprotokoll (siehe Abschnitte 4.1.4 sowie A2.2), insbesondere die Messergebnisse;
2. Aufnahme der Exposition:
 - a) Art und Typ der EMF-Quelle(n),
 - b) verwendete Schutzausrüstung(en), nicht nur EMF spezifisch,
 - c) falls möglich Fotos, ansonsten Skizzen des Arbeitsplatzes, der Expositionssituation und der Messorte,
 - d) verwendete Messeinrichtung(en) und Details zum Messverfahren,
 - e) Ergebnisse der Messung (siehe Abschnitt 4.1.4), Angaben zur Messunsicherheit (siehe Abschnitt 5) und deren Bewertung in Relation zu den EGW, die zur Bewertung herangezogen wurden,
 - f) sind zusätzlich analytische oder numerische Berechnungen durchgeführt worden (Anhang 3), sind die Ergebnisse in geeigneter Form dem Messbericht beizufügen:
 - Name, Version und Hersteller der verwendeten Berechnungssoftware,
 - verwendete Berechnungsmethode,
 - Beschreibung der getroffenen Modellannahmen:
 - welche wesentlichen Vereinfachungen gegenüber der realen Problemstellung wurden gemacht,
 - Eigenschaften der modellierten Feldquelle (Geometrie, Frequenz),
 - ggf. Angaben zum verwendeten anatomischen Körpermodell,
 - ausreichende Einzelheiten, um die Wiederholbarkeit der Berechnungsergebnisse zu ermöglichen,
 - Abschätzung der Unsicherheit der Berechnungsergebnisse (auch als Ergebnis von Modellannahmen, Diskretisierung oder gewählten Randbedingungen),
 - Begründung für die berechneten Positionen (z. B. aufgrund von möglichem Aufenthalt und Aktivitäten von dem Feld ausgesetzten Personen);
3. Bewertung:
 - a) Angaben zu den Werten, die zur Bewertung herangezogen wurden, mit Begründung und gegebenenfalls Erläuterung
 - untere/obere ALS,
 - EGW,
 - andere (z. B. Werte aus dem Forschungsbericht FB 451, individuell berechnete zulässige Werte für Implantatträger),

- b) sonstige Überlegungen, die zur Beurteilung der Messwerte herangezogen wurden (z. B. Hochrechnen der Messwerte auf maximale Anlagenauslastung),
- c) Ergebnis der Bewertung und Beurteilung und darauf basierend gegebenenfalls Empfehlungen von Maßnahmen zur Verbesserung der Expositionssituation und der Sicherheit am Arbeitsplatz (inklusive geeigneter Schutzmaßnahmen).

Weitere Informationen bezüglich des Bewertungsberichts können DIN EN ISO/IEC 17025 entnommen werden.

Anhang 3: Ergänzungen zu Simulations- und Berechnungsverfahren

Die hier aufgeführten Ergänzungen zu Simulations- und Berechnungsverfahren entfalten keine Vermutungswirkung im Sinne von § 21 Absatz 6 Nummer 1 BetrSichV.

Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, sind neben der messtechnischen Bestimmung der EMF auch numerische oder analytische Methoden zur Feldberechnung anwendbar. Grundlegend für alle Methoden sind die Maxwell'schen Gleichungen. Unterschiede ergeben sich durch variable Anfangs-, Rand- und Stetigkeitsbedingungen sowie getroffene Vereinfachungen (Approximationen).

Werden die Berechnungsmethoden auf Modelle angewendet, die die reale Problemstellung geeignet beschreiben, spricht man von Simulationen oder Simulationsrechnungen. Das Ergebnis solcher Rechnungen beschreibt das Verhalten der EMF oder bestimmter Größen, die mithilfe einer Messung nicht direkt zugänglich sind.

Für die Simulation ist eine Vielzahl von Berechnungsprogrammen verfügbar, die sich in der Anwendung der Methoden, der Ausrichtung auf bestimmte Problemstellungen und in ihrer Flexibilität unterscheiden.

A3.1 Analytische Methoden zur Feldberechnung

Analytische Methoden lassen sich dann sinnvoll einsetzen, wenn sich die komplexe Geometrie einer praktischen Problemstellung mit mathematischen Gleichungen beschreiben lässt. Die Lösungen dieser Gleichungen beschreiben die Feldverteilung der EMF.

Analytische Methoden zur Feldberechnung nutzen z. B.:

1. das Gesetz von Biot-Savart,
2. den Gauss'schen Satz der Elektrotechnik,
3. das Vektorpotential,
4. das Skalarpotential oder
5. die Spiegelungsmethode.

Analytische Berechnungen können insbesondere hilfreich sein, um mit guter Genauigkeit zu einer ersten Einschätzung der Expositionssituation einer Person zu kommen.

Für den niederfrequenten Fall finden sich in der Literatur Lösungen [Feynmann, 2007] für viele Arten von einfachen Quellen, wie z. B. Stromschleifen, einzelne Leiter, Spulen oder elementare Dipole. So lässt sich das Magnetfeld eines einzelnen vom Strom I durchflossenen geraden Leiters im Abstand r zum Leitermittelpunkt mithilfe der Gleichung A3.1

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}; \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad \text{Gl. A3.1}$$

berechnen.

Im Frequenzbereich mit $100 \text{ kHz} < f < 10 \text{ MHz}$ (hochfrequenter Fall) wird der Raum um die abstrahlende Feldquelle je nach Entfernung von der Feldquelle in den reaktiven Nahfeldbereich, den abstrahlenden Nahfeldbereich und den Fernfeldbereich unterteilt. Bei der Auswahl analytischer Berechnungsmodelle ist daher zu beachten, dass die Gleichungen für den jeweiligen Bereich anwendbar sind [DIN EN 50413:2009, Anhang A1.2].

Neben dem Einsatz analytischer Methoden zur Berechnung der Feldverteilung im Raum können diese auch eingesetzt werden, um die durch ein äußeres Feld hervorgerufenen Stromdichten oder elektrischen Feldstärken bzw. die absorbierte Energie im menschlichen Körper abschätzen zu können. Hierzu werden in der Regel folgende vereinfachende Annahmen gemacht [DIN EN 50413:2009]:

1. Die äußeren elektrischen und magnetischen Felder sind gleichförmig und haben nur eine Frequenz.
2. Das Körpermodell ist hinsichtlich seiner dielektrischen Eigenschaften homogen. (Häufig werden hierfür die bei der untersuchten Frequenz auftretenden Ganzkörpermittelwerte über alle Gewebearten herangezogen.)
3. Die Form des Körpermodells kann analytisch beschrieben werden, z. B. durch Kugeln, Kugelformen (Sphäroide), Scheiben, Würfelformen (Kuben) o. Ä.

Die komplexe inhomogene menschliche Anatomie und die in der Praxis üblicherweise nicht gleichförmigen Expositionsbedingungen können bei solchen Berechnungen nicht berücksichtigt werden. Daher sind sie zum Nachweis der Einhaltung der EGW im menschlichen Körper nur eingeschränkt sinnvoll anwendbar. Die unter Zuhilfenahme solcher vereinfachten Modelle ermittelten Ergebnisse lassen sich aber verwenden, um die Gültigkeit numerischer Rechnungen zu überprüfen (Validierung).

A3.2 Numerische Methoden zur Feldberechnung

Stellt sich die Problemstellung als zu komplex für die Anwendung einer analytischen Berechnungsmethode dar, kommen numerische Methoden zum Einsatz. Für die computergestützte Umsetzung numerischer Berechnungsmethoden ist eine räumliche und, bei zeitabhängigen Problemen, zeitliche Diskretisierung erforderlich. Als Folge dieser Diskretisierung und abhängig von der angewandten numerischen Methode wird die Lösung nur für bestimmte diskrete Punkte im Raum und dort nur näherungsweise berechnet, sodass das Ergebnis aus einer meist großen, aber endlichen Zahl von diskreten Werten besteht.

Übliche numerische Methoden zur Feldberechnung sind z. B.:

1. Finite Differenzen Methode im Zeitbereich (FDTD),
2. Finite Integrale Methode (FIT),
3. Finite Elemente Methode (FEM),
4. Boundary Element Method (BEM), Randelementmethode,
5. Method of Moments (MoM), Momentenmethode oder
6. Methode der multiplen Multipole (MMP).

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von feldtheoretischen Lösungsmethoden. Abhängig von der Problemstellung können die Methoden auch miteinander gekoppelt werden, um die jeweiligen Vorteile miteinander zu kombinieren.

Bei den unterschiedlichen numerischen Feldberechnungsmethoden wird die Lösung für das Gesamtfeld aus den jeweils zugrundeliegenden Feldgleichungen gewonnen. Dies können die vollständigen Maxwell-Gleichungen oder aber aus diesen abgeleitete, angenäherte oder vereinfachte Gleichungen sein, die die Problemstellung ausreichend genau beschreiben.

Bei der Auswahl einer numerischen Methode zur Feldberechnung oder eines geeigneten Computerprogramms für Berechnungen mittels einer solchen Methode sollten, mit Blick auf die Problemstellung, Überlegungen zu folgenden Punkten angestellt werden:

1. Größe des Raums, für den das Feld berechnet werden soll,
2. primär interessierende Feldgröße (elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld),
3. Rand- und Nebenbedingungen,
4. dosimetrische Größen (Gewebefeldstärken, SAR-Werte, SA-Werte),

5. Art der Diskretisierung im Hinblick auf die Modellierung komplexer Modelle, gekrümmter Oberflächen o. Ä.,
6. erforderliche Dimension der Lösung (2D/3D),
7. Zeitabhängigkeiten bzw. Zeitverhalten,
8. Art der Feldquelle,
9. Genauigkeitsanforderungen,
10. mögliche Einbindung detaillierter menschlicher Körpermodelle oder
11. Berücksichtigung frequenzabhängiger, dielektrischer Materialeigenschaften.

Zur Berechnung von EMF innerhalb des menschlichen Körpers (Dosimetrie), die beispielsweise zur Nachweisführung der Einhaltung der Expositionsgrenzwerte notwendig sein kann, können numerische Körpermodelle, die den inneren Aufbau des menschlichen Körpers detailliert wiedergeben, eingesetzt werden. Insgesamt existiert eine Vielzahl von numerischen Modellen für den weiblichen und männlichen Körper.

Die wesentlichen Unterschiede der Modelle liegen zum einen in der Anzahl der nachgebildeten Gewebearten (Detaillierungsgrad) und zum anderen in der für Berechnungen verfügbaren Auflösung. Manche Körpermodelle lassen überdies Haltungsmanipulationen zu, sodass z. B. die Arbeitsposition an einer Feldquelle realistischer abgebildet werden kann.

Für eine Berechnung sollte es möglich sein, den unterschiedlichen Gewebearten die passenden frequenzabhängigen dielektrischen Eigenschaften zuzuweisen.

Hinweis: Aufgrund der zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen stellt der Einsatz von einfachen Geometrien (z. B. scheibenförmige, würfelförmige oder kugelförmige (Sphäroid) Modelle) als einfache menschliche Körperrückbildung nicht den Stand der Technik dar. Insbesondere für den Nachweis der Einhaltung der EGW müssen numerische Körpermodelle (siehe oben) verwendet werden.

Anhang 4: Ergänzungen zu Mess- und Berechnungsunsicherheiten

Die hier aufgeführten Ergänzungen zu Mess- und Berechnungsunsicherheiten entfalten keine Vermutungswirkung im Sinne von § 21 Absatz 6 Nummer 1 BetrSichV.

A4.1 Allgemeines

Der wahre Wert einer Größe entspricht in der Regel nicht dem gemessenen oder berechneten Wert. Messung oder Berechnung werden durch die Angabe einer Unsicherheit legitimiert.

Die Unsicherheit kennzeichnet den Wertebereich um den Messwert herum, innerhalb dessen der wahre Wert sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit befindet. Systematische Abweichungen werden hier nicht berücksichtigt, da diese korrigiert werden können. Es werden bei der Messunsicherheitsanalyse nur zufällige Einflüsse auf die Größe des Messergebnisses einbezogen. Oft kann man bei der statistischen Verteilung der zufallsbeeinflussten Messergebnisse von einer Normalverteilung ausgehen, da viele statistisch unabhängige Einflüsse auf die Messunsicherheit einwirken. Die Standardabweichung (Sigma: σ) dieser Verteilung wird Standardunsicherheit (Abkürzung oft u) genannt. Der wahre Wert liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 68 % im Bereich Messwert $X \pm \sigma$. Um eine höhere Sicherheit zu gewährleisten, wird oft die erweiterte Unsicherheit U verwendet. Meist ist diese so gewählt, dass der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im Bereich Messwert $X \pm U$ liegt. Fällt also Messwert plus Unsicherheit auf einen Referenzwert, so wird dieser mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % eingehalten. Das bedeutet, dass der wahre Wert der gemessenen Größe mit einer Wahrscheinlichkeit von 2,5 % den Referenzwert überschreitet.

Die Angabe eines gemessenen bzw. berechneten Wertes allein ohne Aussagen zur erweiterten Unsicherheit ist nicht ausreichend, da keine Information über die Qualität der Messung vorliegt. In die Kalkulation der erweiterten Unsicherheit sind alle relevanten Beiträge mit einzubeziehen, insbesondere auch die Unsicherheit der Probennahme (Wiederholbarkeit der Messung). Dies bedeutet in der Praxis, dass Messwert plus erweiterte Messunsicherheit den heranzuziehenden Referenzwert (ALS, Schwellenwert oder EGW) nicht überschreiten darf (additiver Ansatz).

Für die Praxis sind daher die Art der Verteilung, die Standardunsicherheit, der angewendete Vertrauensbereich und der Wert für die daraus resultierende erweiterte Unsicherheit wichtig. Standardunsicherheit u und erweiterte Messunsicherheit U können über einen Erweiterungsfaktor k verknüpft werden:

$$U = k \cdot u$$

Gl. A4.1

Der Faktor k hängt von der Art der Verteilung und des gewählten Vertrauensintervalls ab. Für ein Vertrauensintervall von 95 % und eine Normalverteilung liegt dieser Faktor bei 1,96 (oft auch gerundet angegeben, dann 2).

Generell wird empfohlen, schon bei der Beschaffung von Geräten und Software von dem Hersteller eine Angabe zu Unsicherheit, Verteilung und angewendetem Vertrauensintervall zu verlangen. Hilfreich kann hier ein Verweis auf die DIN EN 50413:2009 sein. Bei Angabe von Unsicherheiten einzelner Bauelemente oder Komponenten in einem System alleine kann die Bestimmung einer Gesamtunsicherheit schwierig werden. In diesem Fall sollte der Hersteller eine Gleichung angeben, wie diese insgesamt zu berücksichtigen sind.

Unsicherheiten, die ohne statistische Methoden ermittelt werden (z. B. Angaben in Kalibrierscheinen) werden als Typ-B-Unsicherheit bezeichnet. Erfolgt die Ermittlung auf Basis einer statistischen Analyse statistisch unabhängiger Messwerte, so handelt es sich um eine Typ-A-

Unsicherheit. Letzteres Verfahren kann angewandt werden, wenn über das zu verwendende Messgerät (inklusive Sonden, Verbindungsleitungen) keine Informationen zur Messunsicherheit zur Verfügung stehen.

In den beiden folgenden Abschnitten wird auf den Umgang mit Unsicherheiten bei Messungen und Berechnungen eingegangen. Zur Vertiefung sei auf den Leitfaden EA-4/02 M verwiesen.

A4.2 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit wird üblicherweise als relative Größe in Prozent (%) oder Dezibel (dB) angegeben. Die Einheit dB setzt immer zwei Leistungen (P_1/P_2) oder Feldstärken (E_1/E_2) ins Verhältnis zueinander; für exemplarische Umrechnungen siehe Tabelle A4.1. Die Größe im Nenner muss bekannt sein:

$$U[\text{dB}] = 10 \lg \left(\frac{P_1 [\text{W}]}{P_2 [\text{W}]} \right) \quad \text{Gl. A4.2}$$

bzw.

$$U[\text{dB}] = 20 \lg \left(\frac{E_1 \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]}{E_2 \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]} \right) \quad \text{Gl. A4.3}$$

Tab. A4.1 Umrechnung von dB in Verhältnis von Feldstärke- bzw. Leistungswerten

Wert [dB]:	-1	1	3	6	10
Wert E_1/E_2 :	0,9	1,1	1,4	2	3,2
Wert P_1/P_2 :	0,8	1,3	2	4	10

Hinweis: Die elektrische Feldstärke E wurde hier als Beispiel für lineare Größen gewählt. Die angegebenen Zahlenwerte sind auf die erste Nachkommastelle gerundet worden.

Messunsicherheiten können durch verschiedene Faktoren entstehen, z. B.:

1. messgerätbedingte Faktoren (Frequenzgang, Amplitudengang, Isotropie),
2. kalibrierungsbedingte Beiträge,
3. Zugänglichkeit des Messortes,
4. Messumgebung (z. B. Temperatur),
5. Zugänglichkeit des Messortes,
6. Lastschwankungen der EMF-Quelle und
7. Weiterverarbeitung der Daten direkt im Messgerät (Berechnungsunsicherheit, z. B. automatische Bildung des Expositionsquotienten).

Folgende Fehler können nicht mittels Messunsicherheit quantifiziert werden und müssen somit bei der Durchführung von Messungen vermieden werden:

1. Antennenwirkung von Anschlussleitungen,
2. ungenügende Einstrahlfestigkeit des Gerätes,
3. Störung des Feldes oder Messgerätes, z. B. durch andere Personen, die bei der Messung zugegen sind oder die Messperson während der Ablesung des Messergebnisses,
4. Ablesefehler,

5. zeitliche Einflussgrößen auf den Messwert und
6. Abtastrate des Messgerätes.

Darauf aufbauend werden unterschieden:

1. zufällige oder statistische Messabweichungen:
 - a) treten unregelmäßig auf und resultieren in unvorhersehbaren Schwankungen in Größe und Vorzeichen,
 - b) entstehen durch nicht zu beeinflussende unsystematische Änderungen der Messbedingungen (z. B. Umgebung) und durch subjektive Messwerterfassung (z. B. Ablesefehler),
 - c) Minimierung durch Mehrfachmessung und Bildung des arithmetischen Mittelwertes möglich (Abweichung kann als normalverteilte Zufallsgröße angesehen werden) und
2. systematische Messabweichungen:
 - a) beeinflussen das Messergebnis bei gleichem Messaufbau einseitig und in der gleichen Weise,
 - b) entstehen z. B. durch Unvollkommenheit des Messverfahrens, des Messgerätes,
 - c) Minimierung durch Berücksichtigung der bekannten systematischen Messabweichung möglich.

Einige der oben genannten Faktoren lassen sich durch präzises und sorgfältiges Arbeiten und Nutzen eines Messgeräts nach dem Stand der Technik minimieren. Praktisch können nie alle Einflüsse erfasst und beziffert werden. Es sollten jedoch alle entscheidenden Beiträge berücksichtigt werden. Für die Bestimmung einer Gesamtmessunsicherheit kann eine Tabelle mit dem Gesamtmessunsicherheitsbudget aufgestellt werden (siehe DIN EN 50413:2009 Anhang C). In ihr werden Unsicherheitsbeiträge für die verwendete Technik oder auch Wiederholbarkeit berücksichtigt. Häufige Quelle für die benötigten Informationen ist der Kalibrierschein des verwendeten Messgerätes (Typ-B-Unsicherheit). Zu berücksichtigen ist auch, auf welche Größe sich die Unsicherheit bezieht: Eine Unsicherheit von 10 % in der Feldstärke bedeutet eine Unsicherheit von 1 % in der Leistungsdichte.

Typische Werte für die Messunsicherheit sind in Tabelle A4.2 beispielhaft aufgeführt.

Tab. A4.2 Typische Werte für Messunsicherheiten (erweiterte Messunsicherheit, $k = 2$, normalverteilt, siehe IEC 62822-1:2018 und DIN EN 50413:2009);
 Erläuterung: Wiederholbarkeit berücksichtigt die zufällige Unsicherheit durch die messende Person
 Hinweis: Werte sind nur informativ und ersetzen nicht die Ermittlung der eigenen Unsicherheit

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte
NF, mit $0 \text{ Hz} \leq f < 10 \text{ kHz}$	ca. 58 % (einschließlich Wiederholbarkeit)
NF, mit $10 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	ca. 41 % (einschließlich Wiederholbarkeit)
NF, mit $1 \text{ MHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	ca. 41 % (einschließlich Wiederholbarkeit)
HF, mit $100 \text{ kHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	ca. 27 % (Feldstärkemessung, ohne Wiederholbarkeit) ca. 40 % (Feldstärkemessung, einschließlich Wiederholbarkeit)

Bei den hier angegebenen Werten handelt es sich um typische Werte. Sie dienen lediglich als Orientierung, welche Werte in etwa erreicht werden können. Im Frequenzbereich mit $1 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$ sowie bei $f > 6 \text{ GHz}$ fallen diese typischerweise etwas größer aus.

A4.3 Berechnungsunsicherheit

Auch bei der Verwendung von Simulations- und Berechnungsprogrammen ist prinzipiell eine Unsicherheit zu berücksichtigen. Wesentliche Unsicherheiten liegen in der Numerik, der Mo-

dellierung der Expositionsquelle, dem Körpermodell (Form, Abmessungen), dem Gewebe und den Materialeigenschaften. Beispielsweise kann die fehlende Berücksichtigung eines Bodenprofils oder die Wahl eines zu groben Rastermaßes für die Berechnung zu Abweichungen der Ergebnisse gegenüber der realen Situation führen. Diese Schwächen in der Modellierung sind oft schwer zu quantifizieren. Bei Berechnungen sollte das verwendete Modell dokumentiert sein, sodass Abweichungen von der realen Expositionssituation nachvollzogen werden können. Am Markt verfügbare Programme erreichen Werte bezüglich der Unsicherheit der Numerik in der Größenordnung von kleiner als 2 %. Eine von der Realität abweichende Modellierung ist hier nicht mitberücksichtigt.

Werden Messergebnisse im Rahmen der Bewertung mit Berechnungsverfahren weiterverarbeitet, z. B. mit der Methode der gewichteten Spitzenwerte oder der Zeitbereichs-Bewertungsmethode, müssen die bei der Anwendung der Berechnungsverfahren individuell auftretenden Berechnungsunsicherheiten quantifiziert werden.

Wird in einem Programm zur Berechnung oder Simulation eine gemessene Größe verwendet und wurde diese mit einer Unsicherheit größer Null bestimmt, so muss diese auch zusätzlich zur Messunsicherheit des Programms berücksichtigt werden. Macht der Hersteller der Software keine Aussage, wie sich eine Unsicherheit einer Eingangsgröße auf das Messergebnis auswirkt, soll im Sinne der Fehlerfortpflanzung die gemessene Größe plus oder minus der Unsicherheit als Eingangsgröße für das Programm verwendet werden. Ob die Unsicherheit addiert oder abgezogen werden muss, hängt davon ab, ob das Ergebnis damit konservativer bestimmt wird. Es ist der konservativere Weg zu wählen, bei dem von einer höheren Sicherheit auszugehen ist.

A4.4 Berechnung der Gesamtunsicherheit

Gehen verschiedene Messergebnisse in das Gesamtergebnis ein, so kann die Gesamtmessunsicherheit bei einfachen mathematischen Operationen anhand der nachfolgend aufgeführten Schritte bestimmt werden:

1. Das Ergebnis y einer Berechnung ist durch die Modellfunktion f gegeben. Diese Funktion hängt von den Messgrößen x_i ab:

$$y = f(x_1, \dots, x_i, \dots) \quad \text{Gl. A4.4}$$

2. Zu jeder Messgröße gibt es eine Standardmessunsicherheit: u_i
3. Zur Berechnung der Gesamtmessunsicherheit werden die partiellen Ableitungen der Funktion nach den einzelnen Messgrößen benötigt:

$$c_i = \frac{\partial f(\dots, x_i, \dots)}{\partial x_i} \quad \text{Gl. A4.5}$$

4. Für jede Messgröße ergibt sich zu dem Ergebnis der Messung y ein Unsicherheitsbeitrag:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad \text{Gl. A4.6}$$

5. Die kombinierte Unsicherheit $u(y)$ ergibt sich dann aus:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad \text{Gl. A4.7}$$

Beispiel: Addition zweier Größen:

$$f(x_1, x_2) = 3x_1 + 4x_2, \quad \text{Gl. A4.8}$$

mit Gl. A4.5 folgt $c_1 = 3$ und $c_2 = 4$

$$u^2(y) = 9u_1^2 + 16u_2^2 \quad \text{Gl. A4.9}$$

$$u(y) = \sqrt{9u_1^2 + 16u_2^2} \quad \text{Gl. A4.10}$$

Beispiel: Multiplikation zweier Größen

$$f(x_1, x_2) = 3x_1 x_2, \quad \text{Gl. A4.11}$$

mit Gl. A4.5 folgt $c_1 = 3x_2$ und $c_2 = 3x_1$

$$u^2(y) = 9x_2^2 u_1^2 + 9x_1^2 u_2^2 \quad \text{Gl. A4.12}$$

$$u(y) = \sqrt{9x_2^2 u_1^2 + 9x_1^2 u_2^2} \quad \text{Gl. A4.13}$$

Bei komplexen Berechnungen gilt das beschriebene Vorgehen zwar auch, jedoch können die dafür benötigten partiellen Ableitungen meist nur numerisch bestimmt werden. Voraussetzung ist ein lineares oder linearbasiertes Modell für nicht korrelierte Eingangsgrößen.

Anhang 5: Ergänzungen zu Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Expositionsgrenzwerte

Die hier aufgeführten Ergänzungen zu Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der EGW enthalten keine Vermutungswirkung im Sinne von § 21 Absatz 6 Nummer 1 BetrSichV.

A5.1 Angaben für einen Nachweis zur Einhaltung der EGW

In der Regel wird vor der Erbringung eines Nachweises zur Einhaltung der EGW eine Messung der EMF durchgeführt. Das Ergebnis der Messung wird in einem Messbericht dokumentiert. Die Angaben aus dem Messbericht müssen in diesen Nachweis mit einfließen, wenn Messdaten zur Durchführung einer analytischen oder Simulations-Berechnung genutzt werden. Die folgenden Angaben sind in einem Nachweis zur Einhaltung enthalten:

1. Unternehmen, Betreiber, Standort,
2. Ort, Datum,
3. Ziel der Nachweisführung,
4. Bewertungsgrundlagen:
 - a) (Beschäftigte oder Allgemeinbevölkerung),
 - b) besonders schutzbedürftige Beschäftigte (z. B. Träger aktiver Implantate),
 - c) weitere Dokumente (Produktnormen, Hinweis aus dem Benutzerhandbuch),
5. Spezifikation der Feldquelle (emittierende Anlage bzw. Gerät):
 - a) Art der Anlage (Beschreibung der Anlage),
 - b) Bilder, Skizzen zur Feldquelle,
 - c) Seriennummer,
 - d) Baujahr,
 - e) Beschreibungen und Erläuterungen zur Feldquelle, insbesondere zur Arbeits- oder Verfahrensweise, Einbausituation/Einbaulage,
 - f) Angaben zu verschiedenen Betriebszuständen,
 - g) Software- und Firmware-Versionen, durch die die Erfüllung der grundlegenden Anforderungen beeinflusst wird,
 - h) ggf. Auflistung von Einzelkomponenten, falls diese in der Feldquelle variieren können,
 - i) Informationen zum Leistungsregler, Nutzerinformationen und Installationshinweise,
 - j) Frequenz unter Beachtung der Betriebszustände,
 - k) Frequenzangaben zu den erzeugten Arbeitsfrequenzen und Oberwellen,
 - l) zeitliche Signalverläufe,
 - m) maximales Leistungsvermögen der Feldquelle,
 - n) Worst-Case-Szenarien angeben,
 - o) Exposition bei bestimmungsgemäßem und vorhersehbarem Gebrauch,
 - p) Bewertung zugrundeliegender Betriebsbedingungen,
6. Expositionssituation am Arbeitsplatz:
 - a) tatsächliche Arbeitssituation realistisch beschreiben,
 - b) geometrische Beschreibung der Aufenthaltsorte der exponierten Personen (Betrachtung der vorhersehbaren Aufenthaltsorte mit minimalen Abständen zur Feldquelle in Abhängigkeit der Betriebszustände),
 - c) Zugangsbeschränkungen,
 - d) Bezugsmessgröße an der Anlage definieren und benennen (Ort und Feldgröße, Strom) zur Verifikation, ob dieser Nachweis zur physischen Anlage anwendbar ist,

7. Methode des Nachweises:
 - a) Erläuterung der Methodik (Messung, analytisch, Simulation),
 - b) verwendete Softwareanwendung (Hersteller, Solver, Version),
 - c) verwendete Körpermodelle (Name, Hersteller, Version, Auflösung des Modells, Gewebeparameter),
 - d) technische Beschreibung des Quellenmodells,
 - e) geometrische Beschreibung (räumliche Auflösung der Berechnung),
 - f) feldrelevante Parameter (Windungszahl, Stromstärke, Erdung),
 - g) Verifikation der Modellrechnung durch einen Abgleich der Feldverteilung im Modell zu der realen Feldquelle (Angaben über eine Bezugsmessgröße mit genauen Ortsangaben),
 - h) Abweichungen und Übereinstimmungen sollten beschrieben werden,
 - i) Darstellungen der Arbeitspositionen des Körpermodells zur Feldquelle im Modell,
 - j) Darstellung der Berechnungsergebnisse (Darstellung der internen Gewebefeldstärken im Körpermodell),
 - k) Beschreibung der Auswertemethodik (Voxel, Perzentile, Umgang mit Artefakten),
 - l) maximale interne elektrische Feldstärke und Ort des Auftretens,
 - m) Ergebnisse müssen mit den Bewertungsgrundlagen bewertet werden (die Beurteilung muss sämtliche vernünftigerweise vorhersehbare Betriebsbedingungen berücksichtigen),
 - n) dem Prüfprotokoll muss entnommen werden können, ob und ggf. wo die ALS bei Exposition am Arbeitsplatz des Beschäftigten beim bestimmungsgemäßen Gebrauch überschritten wird,
 - o) wenn Anlagen im öffentlichen Bereich stehen, sind auch diese Expositionen zu berücksichtigen,
8. Bewertung und Maßnahmen:
 - a) Unsicherheit,
 - b) Zusammenfassung und Erläuterung der Ergebnisse,
 - c) Erläuterungen zu erforderlichen Maßnahmen,
 - d) Fristen für die regelmäßige Überprüfung der Bezugsmessgröße an der Anlage,
 - e) Fristen für die regelmäßige Überprüfung, ob die betrachteten Arbeitspositionen gültig sind.

A5.2 Beispiel: Nachweis zur Einhaltung der EGW bei Anwendungen der Energieversorgung

In unmittelbarer Nähe von Leiterseilen von Höchstspannungs-Freileitungen treten starke elektrische Felder auf. Beim Besteigen eines Mastes bewegen sich Beschäftigte teils in Abständen von wenigen Metern (theoretisches Minimum: Schutzabstand beispielsweise nach DGUV V 3) zu Höchstspannungen von bis zu 420 kV (bei 50 Hz). In solchen Situationen kann es zur Exposition oberhalb der ALS für das elektrische Feld kommen. Daraus folgt nicht unbedingt eine unzulässige Situation, da der EGW für die interne elektrische Feldstärke E_i dennoch eingehalten sein kann.

Die Exposition der Beschäftigten ist maßgeblich abhängig von der Höhe der Spannung und der Entfernung zum Leiterseilbündel. Da die Feldverteilung des elektrischen Feldes stark durch leitfähige Elemente beeinflusst wird, ist deren Anordnung ebenfalls von Interesse. Dabei muss berücksichtigt werden, ob solche Elemente an ein festes Potential (beispielsweise Erdpotential) gebunden sind oder nicht.

Aufgrund der stark erschwerten Bedingungen für Messungen ist eine Berechnung der Situation vorzuziehen. Da die Expositionssituationen für jeden Hochspannungsmast sehr ähnlich bzw. vergleichbar sind, kann hier sehr gut standardisiert werden und über die Berechnung eines konservativen Falles (hohe Spannung, geringer Abstand) eine allgemeine Aussage getroffen werden.

A5.3 Beispiel: Nachweis zur Einhaltung der EGW an Widerstandsschweißanlagen

Aufgrund starker elektrischer Ströme beim Schweißprozess von bis zu 1 000 kA und Frequenzanteilen bis ca. 50 kHz können Magnetfelder am Arbeitsplatz von Widerstandsschweißanlagen (WSA) im Bereich oder über den ALS entstehen. Wenn die ALS bezüglich der Magnetflussdichte an Arbeitsplätzen überschritten sind, folgt daraus nicht zwangsläufig eine Unzulässigkeit der Expositionssituation, da die relevanten Werte der elektrischen Feldstärke in den Körpergeweben noch unter den dafür geltenden EGW liegen können.

Die Exposition des Beschäftigten an diesen WSA ist vorrangig abhängig von:

1. der Stärke des Schweißstroms,
2. dem zeitlichen Verlauf des Schweißstroms,
3. der Geometrie des Strompfades und
4. dessen Orientierung und Entfernung zum Benutzer.

Um Magnetfeldmessungen an WSA durchzuführen, sind unter anderem folgende Mindestanforderungen zu erfüllen:

1. Verwendung einer isotropen Feldsonde,
2. Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs des Magnetfelds (Zeitsignal),
3. eine ausreichende Datenrate des zeitlichen Verlaufs des Magnetfelds, um den höchsten relevanten Frequenzanteil aufzulösen (für WSA mit Invertern kann hier beispielsweise das zwanzigfache der Inverterfrequenz angenommen werden) und
4. Messsonden mit Sensorflächen von 100 cm² (sofern möglich) und kleineren Sensorflächen für Messungen direkt an stromführenden Leitungen zur Reduzierung von Unterbewertungen.

Aufgrund der zeitintensiven räumlichen Vermessung des Magnetfelds zur Bestimmung von Sicherheitsabständen können auch analytische Ansätze zur Berechnung des Magnetfelds anhand einer Schweißstrommessung gültig sein. Mithilfe der geometrischen Abmessungen des Schweißstromkreises und des Biot-Savart-Gesetzes lässt sich beispielsweise die Magnetfeldverteilung um das Schweißfenster und am Arbeitsplatz eines Beschäftigten berechnen. Sicherheitsabstände können anhand der ALS bestimmt werden. Für einen solchen Ansatz und die Messung des Stromsignals am WSA-Arbeitsplatz sind unter anderem folgende Anforderungen zu erfüllen:

1. Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs (Zeitsignal) des Schweißstroms, beispielsweise mit einer Rogowskispule,
2. eine ausreichende Datenrate, um den höchsten Frequenzanteil des zeitlichen Verlaufs des Magnetfelds aufzulösen (für WSA mit Invertern kann hier beispielsweise das Zehn- fache der Inverterfrequenz angenommen werden) und
3. geometrische Vermessung des Stromkreises (Mitte des Leiters).

Eine Bewertung des Arbeitsplatzes ist auch durch Nachweis der Einhaltung der EGW möglich. Die Anforderungen an das Körpermodell und die numerischen Methoden zur Feldberechnung sind in Abschnitt 9 definiert. Eine numerische Simulation ist im Nieder- und Mittelfrequenzbereich beispielsweise mit der FEM-Methode (siehe Anhang 3 Abschnitt A3.2) durchführbar, jedoch nur bei statischen Frequenzen. Um eine geeignete Frequenz und Amplitude zu bestimmen, ist das gemessene Zeitsignal des Schweißstroms auszuwerten. Mithilfe der weighted peak method time domain (siehe Teil „Allgemeines“ Abschnitt 4.45) kann ein Expositionsindex des Zeitsignals ermittelt und die numerische Simulation durch Anpassung der Amplitude und Frequenz mit einem identischen Expositionsindex durchgeführt werden.

A5.4 Beispiel: Nachweis zur Einhaltung der EGW an elektronischen Artikelsicherungssystemen

Elektronische Artikelsicherungsanlagen (EAS-Anlagen) sind im Handel zum Diebstahlschutz weit verbreitet. EAS-Anlagen bestehen aus einem Antennensystem im Eingangsbereich, Deaktivierungseinrichtungen an der Kasse sowie dem Sicherungsmittel, das am Produkt befestigt ist. Das Funktionsprinzip basiert auf der Nutzung von EMF. Im Wesentlichen unterscheidet man bei den EAS-Systemen die Hochfrequenzsysteme, zu denen die radiofrequenten Verfahren zählen und die Niederfrequenzsysteme, die auf dem elektromagnetischen Verfahren oder dem akustomagnetischen Verfahren basieren. Insbesondere am Kassenserviceplatz können Deaktivatoren, die das akustomagnetische Verfahren nutzen, Magnetfelder erzeugen, die die ALS für Ganzkörperexposition und Teilkörperexposition überschreiten. Diese Deaktivatoren weisen zwei Betriebszustände auf: die Detektion – Erkennung des Sicherungsmittels und die Deaktivierung – die Entmagnetisierung des Sicherungsmittels. Die beschriebene Überschreitung tritt ausschließlich beim Deaktivieren auf, das mit einer geringeren Frequenz (z. B. 500 Hz) jedoch höherer magnetischer Feldstärke als die Detektion (58 kHz) erfolgt. Auch bei den Antennensystemen sind Überschreitungen der ALS in der nahen Umgebung möglich.

In Fällen, in denen die Messwerte die ALS überschreiten, kann dennoch die EAS-Anlage weiter betrieben werden, wenn der Nachweis erbracht wird, dass die EGW gemäß Abschnitt 9 eingehalten werden. Der Nachweis zur Einhaltung der EGW entbindet jedoch nicht davon, dass sicheres Arbeiten unter allen sinnvoll anzunehmenden Umständen gewährleistet sein muss. Das kann bedingen, dass die EGW nur bei Berücksichtigung von Mindestabständen eingehalten werden können. Es gilt die Maßnahmenhierarchie entsprechend dem STOP-Prinzip (siehe Teil „Allgemeines“ Abschnitt 4.39).

Hinweis: Für den Bevölkerungsschutz kann die EU-Ratsempfehlung zu EMF 1999/519/EG herangezogen werden. Dieser Nachweis kann unter Berücksichtigung der Expositionssituation auch als Bewertungsgrundlage für Beschäftigte dienen.