

Technische Regeln zur Arbeitsschutz- verordnung zu elektromagnetischen Feldern	TREMF Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz	Teil 2: Messen, Berechnen und Bewerten von Expositio- nen gegenüber elektro- magnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz
---	---	---

Die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz (TREMF HF) 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 HF Teil 2 „Messen, Berechnen und Bewerten von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz“ 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

Anhang 6	Berechnungsbeispiele für die Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe
Anhang 7	Ergänzungen zur Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe

1 Anwendungsbereich

- (1) Der Teil 2 „Messen, Berechnen und Bewerten von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz“ der TREMF HF 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 HF gilt für elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz. Sie gilt nach § 1 Absätze 2 und 3 EMFV nur für Kurzzeitwirkungen und nicht für vermutete Langzeitwirkungen.
- (3) Unabhängig von den in dieser TREMF HF 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 elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz“ der TREMF HF werden Begriffe so verwendet, wie sie im Teil „Allgemeines“ der TREMF HF 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 (leistungsbezogene 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 leistungsbezogener Summation) oder
 - b) die niedrigste ALS im betrachteten Frequenzspektrum zugrunde zu legen.
- Hinweis: Im HF-Bereich erfolgt die Summation leistungsbezogen, d. h. quadratisch. Im NF-Bereich hingegen linear.
- (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 und bei Bedarf getragen wird.

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

4.1.2 Messgeräte

- (1) Im Hochfrequenzbereich existieren zwei grundlegende Messverfahren:

1. Die breitbandige Erfassung und leistungsbezogene Summation aller vorhandenen Felder über einen definierten Frequenzbereich, wobei (je nach Messgerätetyp) zusätzlich vor der Summation eine Bewertung mit dem für die jeweilige Frequenz relevanten Grenzwert erfolgen kann.
2. Die frequenz aufgelöste (auch als frequenzselektiv bezeichnete) Erfassung der Feldstärken aller Einzelimmissionen, sodass eine Bewertung mit den individuellen Grenzwerten im Rahmen einer weitergehenden Auswertung möglich wird.

Im Mobilfunkbereich existiert noch die „codeselektive“ Erfassung von Feldern von UMTS-, LTE- und 5-G-Basisstationen (als Erweiterung der frequenzselektiven Messtechnik), da hier eine frequenzselektive Messung im Allgemeinen nicht ausreichend ist.

- (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 Leistungsdichte S , Frequenz f , Kontaktströme I_K oder den in Gliedmaßen induzierten Strom I_G zu messen und
5. ausreichend hohe Sensitivität und einen ausreichend großen Messbereich umfassen, sodass eine Entscheidung über die Einhaltung oder Überschreitung von ALS und einzelnen EGW möglich ist.

Hinweis: Für weitere Anforderungen an Messgeräte siehe DIN EN 50413.

- (3) Eine räumliche Mittelung über das gesamte vom Körper von Beschäftigten eingenommene Raumvolumen oder den gesamten von Beschäftigten eingenommenen Arbeitsbereich ist nicht zulässig, wenn hierdurch räumliche Maxima in inhomogenen Feldern unterbewertet werden können.
- (4) Bei inhomogenen EMF dürfen die räumlichen Maximalwerte nicht die ALS bzw. EGW nach Anhängen 2 und 3 EMFV überschreiten.
- (5) Im Frequenzbereich mit $f > 6$ GHz sind gemessene Leistungsdichten über eine Fläche von 20 cm^2 zu mitteln. Die maximale örtliche Leistungsdichte, gemittelt über 1 cm^2 , darf hierbei 1 kW/m^2 nicht überschreiten.

- (6) Das Messgerät wird entsprechend Art, Dauer und Ausmaß des EMF (auch Pulse und nicht sinusförmige Signalverläufe) sowie den technischen Bedingungen der EMF-Quelle ausgewählt.
- (7) Gegebenenfalls ist es zweckmäßig, mehrere, sich im Messbereich ergänzende Messverfahren bzw. -geräte einzusetzen.
- (8) 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.
- (9) Die Messung von Kontaktströmen oder den in Gliedmaßen induzierten Strömen 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, von der Leistungsdichte, von Kontaktströmen und von dem in den Gliedmaßen induzierten Strom 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.
- (5) Hinweis: Es sind ggf. verschiedene Messpunkte an einem Messort notwendig, um die EMF-Exposition repräsentativ zu ermitteln. In Abhängigkeit von den Arbeitspositionen empfiehlt sich, Messpunkte in Relation zu Kopf-, Brust-, Becken- und/oder Beinhöhen bzw. der Position der Hände festzulegen.
- (6) Die räumliche Lage des Messortes wird eindeutig und nachvollziehbar angegeben.
- (7) 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.

- (8) Sicherheitsvorschriften und/oder -abstände sind bei Messungen einzuhalten.
 - (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 oder Leistungsdichte 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 Gesamt-mess- 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 §§ 15 – 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 EMF-Quelle mit unterschiedlichen Frequenzen

- (1) Zur Ermittlung der Gesamtexposition sind bei einer EMF-Quelle 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 (siehe TREMF NF Teil 2 Abschnitt 7), für die thermischen Wirkungen der Frequenzbereich mit $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$.
- (2) Im Sinne einer konservativen Abschätzung ist es möglich, alle durch die EMF-Quelle hervorgerufenen elektrischen und magnetischen Feldstärken, Leistungsdichten oder spezifischen Absorptionsraten 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 Gleichung 7.1). Die einzelnen EQ werden dann zu einem Gesamtexpositionsquotienten (TEQ) aufaddiert (siehe Gleichungen 7.1 bis 7.7). Ist der Gesamtexpositionsquotient $\text{TEQ} \leq 1$, wird die geprüfte Auslöschschwelle 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).

$$\text{TEQ} = \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{\text{ALS},i}} \right)^2 \leq 1, \text{ mit } \text{EQ} = \frac{E_i}{E_{\text{ALS},i}} \quad \text{Gl. 7.1}$$

$$\text{TEQ} = \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_i}{H_{\text{ALS},i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.2}$$

$$\text{TEQ} = \sum_{i>10 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_i}{S_{\text{ALS},i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.3}$$

$$\text{TEQ} = \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_{\text{EGW}}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.4}$$

$$\text{TEQ} = \sum_{i>6 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_i}{S_{\text{EGW}}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.5}$$

$$\text{TEQ} = \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_{\text{EGW}}} + \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{\text{ALS},i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.6}$$

$$\text{TEQ} = \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_{\text{EGW}}} + \sum_{i>100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_i}{H_{\text{ALS},i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.7}$$

mit

E_i	Effektivwert (thermische Wirkungen) der elektrischen Feldstärke von Quelle Q bei der Frequenz i
$E_{\text{ALS},i}$	die obere oder untere ALS für das elektrische Feld bei Frequenz i
H_i	Effektivwert (thermische Wirkungen) der magnetischen Feldstärke von Quelle Q bei der Frequenz i
$H_{\text{ALS},i}$	die ALS für das magnetische Feld bei Frequenz i
S_i	(Mittel-)Wert der Leistungsdichte von Quelle Q bei der Frequenz i (thermische Wirkungen)
$S_{\text{ALS},i}$	die ALS für die Leistungsdichte bei Frequenz i
SAR_i	Wert der spezifischen Absorptionsrate von Quelle Q (thermische Wirkungen)
SAR_{EGW}	der EGW für die spezifische Absorptionsrate
S_{EGW}	der EGW für die Leistungsdichte

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 7.8 bis 7.13). 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 werden 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.

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \left(\frac{E_{i,Qx}}{E_{ALS,i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.8}$$

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \left(\frac{H_{i,Qx}}{H_{ALS,i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.9}$$

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \frac{S_{i,Qx}}{S_{ALS,i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.10}$$

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \frac{SAR_{Qx}}{SAR_{EGW}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.11}$$

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n EQ_{Qx} = \sum_{Qx=1}^n \frac{S_{i,Qx}}{S_{EGW}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.12}$$

$$TEQ = \sum_{Qx=1}^n \frac{SAR_{Qx}}{SAR_{EGW}} + \sum_{Qx=1}^n \frac{S_{i,Qx}}{S_{ALS,i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.13}$$

mit

TEQ Gesamtexpositionsquotient

EQ_{Qx} Expositionsquotient von Quelle Qx

$E_{i,Qx}$ Effektivwert (thermische Wirkungen) der elektrischen Feldstärke von Quelle Qx bei der Frequenz i

$E_{ALS,i}$ die ALS für thermische Wirkungen für das elektrische Feld bei Frequenz i

$H_{i,Qx}$ Effektivwert (thermische Wirkungen) der magnetischen Feldstärke von Quelle Qx bei der Frequenz i

$H_{ALS,i}$ die ALS für thermische Wirkungen für das magnetische Feld bei Frequenz i

$S_{i,Qx}$	(Mittel-)Wert der Leistungsdichte von Quelle Qx bei der Frequenz i (thermische Wirkungen)
$S_{ALS,i}$	die ALS für die Leistungsdichte bei Frequenz i
SAR_{Qx}	Wert der spezifischen Absorptionsrate von Quelle Qx (thermische Wirkungen)
SAR_{EGW}	der EGW für die spezifische Absorptionsrate
S_{EGW}	der EGW für die Leistungsdichte

7.4 Mehrere EMF-Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen

- (1) Zur Ermittlung der Gesamtexposition müssen bei mehreren EMF-Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen sämtliche relevanten Frequenzen berücksichtigt werden. Für die nichtthermischen Wirkungen wird dabei der Frequenzbereich mit $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ betrachtet (siehe TREMF NF Teil 2 Abschnitt 7), für die thermischen Wirkungen der Frequenzbereich mit $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$, siehe Gleichungen 7.14 bis 7.19.
- (2) Im Sinne einer konservativen Abschätzung ist es möglich, alle durch die Quellen hervorgerufenen elektrischen und magnetischen Feldstärken, Leistungsdichten oder spezifischen Absorptionsraten innerhalb dieser Frequenz unter Berücksichtigung der Mess- und/oder Berechnungsunsicherheit zunächst auf die zu prüfende ALS oder EGW zu beziehen.

Hinweis: Dies erfolgt z. B. mittels Expositionsquotient EQ. Die einzelnen EQ werden dann zu einem Gesamtexpositionsquotienten (TEQ) aufaddiert (siehe Gleichungen 7.14 bis 7.19). Ist der $TEQ \leq 1$, so wird die der Prüfung zugrunde gelegte ALS oder der EGW eingehalten. Andernfalls kommt § 3 Absatz 3 EMFV zur Geltung, d. h., es muss eine detaillierte Expositions-bewertung durchgeführt werden und ggf. müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden (siehe Teil 3).

$$\sum_{Qx=1}^n \sum_{i>100\text{kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_{i,Qx}}{E_{ALS,i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.14}$$

$$\sum_{Qx=1}^n \sum_{i>100\text{kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_{i,Qx}}{H_{ALS,i}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{Gl. 7.15}$$

$$\sum_{Qx=1}^n \sum_{i>10\text{MHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_{i,Qx}}{S_{ALS,i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.16}$$

$$\sum_{Qx=1}^n \sum_{i>100\text{kHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{SAR_{Qx}}{SAR_{EGW}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.17}$$

$$\sum_{Qx=1}^n \sum_{i>6 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_{i,Qx}}{S_{EGW}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.18}$$

$$\sum_{Qx=1}^n \sum_{i>100\text{kHz}}^{6 \text{ GHz}} \frac{SAR_{Qx}}{SAR_{EGW}} + \sum_{Qx=1}^n \sum_{i>10 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_{i,Qx}}{S_{ALS,i}} \leq 1 \quad \text{Gl. 7.19}$$

mit	
$E_{i,Qx}$	Effektivwert (thermische Wirkungen) der elektrischen Feldstärke von Quelle Qx bei der Frequenz i
$E_{ALS,i}$	die ALS für thermische Wirkungen für das elektrische Feld bei Frequenz i
$H_{i,Qx}$	Effektivwert (thermische Wirkungen) der magnetischen Feldstärke von Quelle Qx bei der Frequenz i
$H_{ALS,i}$	die ALS für das magnetische Feld bei Frequenz i
$S_{i,Qx}$	(Mittel-)Wert der Leistungsdichte von Quelle Qx bei der Frequenz i (thermische Wirkungen)
$S_{ALS,i}$	die ALS für die Leistungsdichte bei Frequenz i
SAR_{Qx}	Wert der spezifischen Absorptionsrate von Quelle Qx (thermische Wirkungen)
SAR_{EGW}	der EGW für die spezifische Absorptionsrate
S_{EGW}	der EGW für die Leistungsdichte

8 Verfahren für die Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe

- (1) Zur Bewertung von EMF mit nicht konstanter Leistungsabgabe gibt es je nach Frequenzbereich und Art des Feldes unterschiedliche Methoden. Im Bereich der nichtthermischen Wirkungen bis $f \leq 10$ MHz werden Verfahren im Zeitbereich verwendet (siehe TREMF NF Teil 2 Abschnitt 8).
- (2) Für den Frequenzbereich $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ sind die zur Bewertung der thermischen Wirkungen zugehörigen ALS und EGW in Anhang 3 EMFV aufgeführt. Die Exposition ist über ein repräsentatives Zeitintervall leistungsbezogen zu mitteln:
 1. für $f < 10 \text{ GHz}$ über ein repräsentatives Sechs-Minuten-Intervall,
 2. für $f \geq 10 \text{ GHz}$ über ein repräsentatives Zeitintervall von $\frac{68}{f^{1,05}[\text{GHz}]}$ Minuten.

Für Rechenbeispiele siehe Anhang 6.

Hinweis: Hintergrund für dieses Zeitintervall ist, dass der menschliche Körper in der Lage ist, kurzzeitige Erwärmungen mittels Thermoregulation auszugleichen. Für Zeiten mit $t < 6 \text{ min}$ ist es somit auch möglich, Expositionen zuzulassen, die bei kontinuierlicher Exposition die ALS nach Anhang 1 Tabelle A1.21 oder EGW nach Anhang 1 Tabellen A1.18 und A1.19 überschreiten würden. Für die Praxis bedeutet das eine Zerlegung des EMF mit nicht konstanter Leistungsabgabe in Zeitintervalle t_i , in denen das EMF als konstant angesehen werden kann.

Die Feldstärken E_i und H_i bzw. die Leistungsdichte S_i werden gemäß folgender Gleichungen für jedes einzelne Zeitintervall t_i summiert:

$$\sum E_{i,\text{eff}}^2 \cdot t_i \quad \text{Gl. 8.1}$$

$$\sum H_{i,\text{eff}}^2 \cdot t_i \quad \text{Gl. 8.2}$$

$$\sum S_{i,\text{eff}} \cdot t_i \quad \text{Gl. 8.3}$$

- (3) Eine Exposition ist zulässig, wenn:

1. der über das frequenzabhängige Zeitintervall ermittelte Mittelwert zzgl. der Unsicherheit die ALS nach Anhang 1 Tabelle A1.23 unterschreitet und

2. die ermittelten Werte der elektrischen Feldstärke E zzgl. der Unsicherheit die Spitzenwerte nach Anhang 1 Tabelle A1.24 unterschreiten.

Hinweis 1: Es erfolgt eine doppeltlogarithmische Interpolation zwischen dem Faktor 1,5 und 32 nach Anhang 1 Tabelle A1.21 Anmerkung 4 für:

- a) $f = 100 \text{ kHz}$ mit $E_{\max} = 1,5 \cdot E_{\text{eff}}$,
b) $100 \text{ kHz} < f < 10 \text{ MHz}$ mit $E_{\max} = f^{0,665} \text{ Hz} / 1409,3 \cdot E_{\text{eff}}$ und
c) $f = 10 \text{ MHz}$ mit $E_{\max} = 32 \cdot E_{\text{eff}}$.

Hinweis 2: Eine Exposition ist zulässig, wenn die ermittelten Werte der magnetischen Feldstärke H zuzüglich der Unsicherheit die Spitzenwerte nach Anhang 1 Tabelle A1.24 unterschreiten.

Die Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke H im Frequenzbereich $100 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$ wurden in Tabelle A1.24 ergänzt.

- (4) Bei Überschreitung der ALS nach Anhang 1 Tabelle A1.21 können die in § 15 EMFV beschriebenen besonderen Festlegungen angewendet werden (siehe Teil 3).
- (5) Ist eine Einhaltung der EGW oder ALS bei EMF mit nicht konstanter Leistungsabgabe nur auf Basis einer Aufenthaltsdauer der Beschäftigten mit $t \leq 6 \text{ min}$ möglich, so muss gewährleistet sein, dass sie den betreffenden Expositionsbereich wieder rechtzeitig verlassen oder die unzulässige Exposition auf andere Weise unterbunden wird. Hierbei müssen verschiedene Arbeitsabläufe und Unfallsituationen berücksichtigt werden.

Hinweis: Es muss sichergestellt sein, dass im Falle eines Unfalls (z. B. Hängenbleiben an einer Leiter) die maximal zulässige Aufenthaltsdauer in dem Bereich durch geeignete Maßnahmen, wie z. B. Abschaltung der Sendeanlage durch eine zweite Person, in jedem Fall gewährleistet ist. Hierfür kann eine Vorbereitung organisatorischer Maßnahmen erforderlich sein. Geeignete Maßnahmen sind in der Gefährdungsbeurteilung zu ermitteln.

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

Hinweis: Für Informationen zur Bewertung der Anwendungsfälle Radar und OFDM wird auf Anhang 7 verwiesen.

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. Expositionsgrenzwert der Leistungsdichte S für gesundheitliche Wirkungen bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich $6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ (nach Anhang 1 Tabelle A1.19),
 2. Expositionsgrenzwert der lokalen spezifischen Energieabsorption SA für sensorische Wirkungen von gepulsten EMF im Frequenzbereich $0,3 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$ (Mikrowellenhören) (nach Anhang 1 Tabelle A1.20).
- (2) Es gelten die Anforderungen an die Durchführung von Messungen (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.

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 Körpernachbildungen (z. B. sphäroidische Modelle) vorhanden, wird empfohlen, diese einfachen Körpernachbildungen 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 MR	Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – Magnetresonanzverfahren
TREMF NF	Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – Statische und zeitveränderliche elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich bis 10 MHz

11.2 Normen und Leitfäden

DIN EN 50360	Produktnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von schnurlosen Kommunikationsgeräten mit den Basisgrenzwerten und Expositionsgrenzwerten für die Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 300 MHz bis 6 GHz: Geräte, die in enger Nachbarschaft zum Ohr benutzt werden; Deutsche Fassung EN 50360:2017
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 62209-1	Messverfahren für die Beurteilung der spezifischen Absorptionsrate bei der Exposition von Personen gegenüber hochfrequenten Feldern von handgehaltenen und am Körper getragenen schnurlosen Kommunikationsgeräten – Teil 1: Geräte, die in enger Nachbarschaft zum Ohr benutzt werden (Frequenzbereich von 300 MHz bis 6 GHz) (IEC 62209-1:2016); Deutsche Fassung EN 62209-1:2016

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
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

11.3 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 Signalförmigkeiten 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.

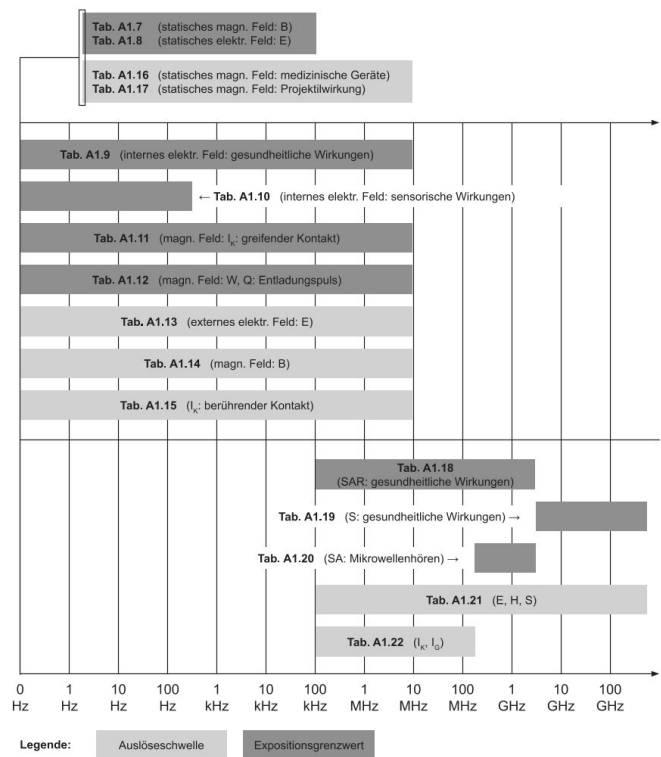


Abb. A1.1 Übersicht über die Gültigkeitsbereiche der Auslöseschwellen und Expositionsgrenzwerte in Abhängigkeit von der Frequenz

A1.2 Expositionszonen

A1.2.1 Expositionszonen für statische Felder

Tab. A1.1 Expositionszonen für statische elektrische Felder

Frequenzbereich	Spitzenwert der externen elektrischen Feldstärke $\hat{E}_e \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right)$
	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 $\hat{E}_e$ ($\frac{V}{m}$)		
	Expositionszone 0	Expositionszone 1	Expositionszone 2
0 Hz < f ≤ 15,9 Hz	$2,82 \cdot 10^4$	n. a.	n. a.
15,9 Hz < f < 25 Hz	$4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$2,82 \cdot 10^4$	n. a.
25 Hz ≤ f < 50 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 Hz ≤ f < 1 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 kHz ≤ f < 1,2534 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 kHz ≤ f < 1,635 kHz	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	$1,41 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
1,635 kHz ≤ f < 3 kHz	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	862
3 kHz ≤ f ≤ 1,007 MHz	236	n. a.	862
1,007 MHz < f ≤ 3,68 MHz	236	n. a.	$868 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
3,68 MHz < f ≤ 10 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 $\hat{B}$ (T)			
	Expositionszone 0	Expositionszone 1	Expositionszone 2	Expositionszone 3
$0 \text{ Hz} < f < 0,0175 \text{ Hz}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	2	2	8
$0,0175 \text{ Hz} \leq f < 0,1575 \text{ Hz}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	2	8
$0,1575 \text{ Hz} \leq f < 0,21 \text{ Hz}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	2	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$0,21 \text{ Hz} \leq f \leq 9,97 \text{ Hz}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$9,97 \text{ Hz} < f < 25 \text{ Hz}$	$7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$300 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$	$7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{f}$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$1 \text{ kHz} < f < 3 \text{ kHz}$	$7 \cdot 10^{-9} \cdot f$	$0,42 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	$1,26 \cdot \frac{1}{f}$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 20,7 \text{ kHz}$	$21 \cdot 10^{-6}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	n. a.	$0,42 \cdot 10^{-3}$
$20,7 \text{ kHz} < f \leq 48,769 \text{ kHz}$	$21 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	n. a.
$48,769 \text{ kHz} < f \leq 138,095 \text{ kHz}$	$21 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.	n. a.
$138,095 \text{ kHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$2,9 \cdot \frac{1}{f}$	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

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

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 $\hat{E}_e \left(\frac{V}{m} \right)$	
	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 $68 \cdot \frac{1}{f_{\text{LOS}}}$ -Minuten gemittelt (wobei f die Frequenz in GHz ist).

Anmerkung 3: 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 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 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.

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

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

Frequenzbereich	Effektivwert der magnetischen Feldstärke $H_{\text{eff}} \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$	
	Expositionszone 0	Expositionszone 1
$100 \text{ kHz} < f \leq 138,095 \text{ kHz}$	11,8	$1,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
$138,095 \text{ kHz} < f < 10 \text{ MHz}$	$1,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$	n. a.
$10 \text{ MHz} \leq f < 400 \text{ MHz}$	0,163	n. a.
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	$8,14 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{f}$	n. a.
$2 \text{ GHz} \leq f < 6 \text{ GHz}$	0,364	n. a.
$6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	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 $68 \cdot \frac{1}{f_{\text{LOF}}}$ -Minuten gemittelt (wo- bei 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 Spit- zenwerte 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 Abschnitt 8).

Anmerkung 5: Zur Vereinfachung der im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 3 EMF durchzuführenden Be- wertung 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 Magnetfel- dern, entspricht Tabelle A2.1 EMFV

Maximalwert der magnetischen Flussdichte $\bar{B}$ (T)		
Sensorische Wirkungen (normale Arbeitsbedingungen)	Sensorische Wirkungen (lokale Exposition von Glied- maßen)	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 ins- besondere 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 Frequenz- bereich 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 Gliedmaßen 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 $\hat{E}_e$ $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$
$2,82 \cdot 10^4$

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 $\hat{E}_i$ $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$
$0 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$	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 $\hat{E}_i$ $\left(\frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$
$0 \text{ Hz} < f < 25 \text{ Hz}$	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 kHz ≤ f < 45 kHz	$\frac{f}{600}$
45 kHz ≤ f < 100 kHz	75
100 kHz ≤ f ≤ 10 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 $\hat{E}_e$ ($\frac{V}{m}$)	
	Untere Auslöseschwelle	Obere Auslöseschwelle
0 Hz ≤ f < 25 Hz	$2,82 \cdot 10^4$	$2,82 \cdot 10^4$
25 Hz ≤ f < 50 Hz	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$2,82 \cdot 10^4$
50 Hz ≤ f < 1,635 kHz	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$1,41 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f}$
1,635 kHz ≤ f < 3 kHz	$7,07 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$	$8,62 \cdot 10^2$
3 kHz ≤ f ≤ 10 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 $\hat{B}$ (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 $\hat{B}$ (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 ($> 100 \text{ mT}$), entspricht Tabelle A2.11 EMFV

Spitzenwert der magnetischen Flussdichte $\hat{B}$ (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 $\left(\frac{\text{W}}{\text{kg}}\right)$
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 $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$
$6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	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 $68 \cdot \frac{1}{f_{\text{MHz}}}$ 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 $\left(\frac{\text{mJ}}{\text{kg}}\right)$
$0,3 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	10

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

Anmerkung 2: Die sensorische Wirkung des Mikrowellenhörens kann nur bei Pulsbreiten kleiner als $30 \mu\text{s}$ 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 $\bar{S} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	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 Tabelle A1.24 sowie 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 und I 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 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 $\sum \bar{S}_i \cdot t_i$ 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	$18 \cdot 10^3$
$10 \text{ GHz} \leq f < 300 \text{ GHz}$	$68 \cdot \frac{1}{f^{1,05}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}$, 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; $\bar{S}_i$ ist der Mittelwert der Leistungsdichte während des i -ten Intervalls; t_i ist die 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 (nach Anmerkung 4 Tabelle A3.4 EMFV)

Frequenzbereich	Spitzenwert der elektrischen Feldstärke $E_{\max} \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right)$	Spitzenwert der magnetischen Feldstärke $H_{\max} \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$	Spitzenwert der über die Impulsbreite gemittelten Leistungsdichte $S_{\text{eq}} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$ $\bar{S}_{\text{eq,max}}$
$f = 100 \text{ kHz}$	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 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 3: Die Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke im Frequenzbereich 100 kHz ≤ f < 10 MHz wurden zur Aussage in Tabelle A3.4 Anmerkung 4 EMFV ergänzt (siehe 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 $\hat{E}_e \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right)$
$0 \text{ Hz} < f \leq 15,9 \text{ Hz}$	28200
$15,9 \text{ Hz} < f \leq 1000 \text{ Hz}$	$4,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{f}$
$1000 \text{ Hz} < f \leq 3000 \text{ Hz}$	$0,45 \cdot f$
$3 \text{ kHz} < f \leq 25 \text{ kHz}$	1350
$25 \text{ kHz} < f \leq 167 \text{ kHz}$	$0,055 \cdot f$
$167 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ kHz}$	9185
$300 \text{ kHz} < f \leq 1 \text{ MHz}$	$2,77 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{f}$
$1 \text{ MHz} < f \leq 5,33 \text{ MHz}$	2770
$5,33 \text{ MHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$6,16 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{(f \cdot 10^{-6})^{1,85}}$
$10 \text{ MHz} < f \leq 16,9 \text{ MHz}$	$6,16 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{(f \cdot 10^{-6})^{2,85}}$
$16,9 \text{ MHz} < f \leq 200 \text{ MHz}$	195
$200 \text{ MHz} < f \leq 400 \text{ MHz}$	$3,36 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{(f \cdot 10^{-6})^{2,94}}$
$400 \text{ MHz} < f \leq 1,5 \text{ GHz}$	1500
$1,5 \text{ GHz} < f \leq 2,5 \text{ GHz}$	$446 \cdot 10^{-27} \cdot f^3$

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	$5,03 \cdot 10^{-6}$
$1,5 \text{ GHz} < f \leq 2,5 \text{ GHz}$	$1,18 \cdot 10^{-27} \cdot f^3$	$1,48 \cdot 10^{-33} \cdot f^3$

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

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

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 $f > 100$ kHz beschrieben:

1. Für die Beurteilung der Exposition ist zu unterscheiden, ob Nah- oder Fernfeldbedingungen vorliegen.
2. Das Fernfeld einer Strahlungsquelle ist dadurch gekennzeichnet, dass dort die Vektoren der elektrischen und magnetischen Feldstärke senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen und keine Phasendifferenzen zwischen beiden Vektoren vorliegen. Die elektrische und die magnetische Feldstärke sind über den Feldwellenwiderstand Z_0 verknüpft:

$$Z_0 = \frac{E_{\max}}{H_{\max}} = 377 \Omega \quad \text{Gl. A2.1}$$

3. Unter Fernfeldbedingungen genügt die Messung einer Größe (elektrische oder magnetische Feldstärke). Die andere Größe kann aus dem Messwert berechnet werden.
4. Im Nahfeld gelten diese Bedingungen nicht mehr. Das Verhältnis der Beträge aus elektrischer und magnetischer Feldstärke ist in dieser Zone um die Strahlungsquelle nicht mehr konstant. Aus dem Messwert der einen Feldgröße kann somit nicht mehr auf den Wert der anderen Größe geschlossen werden. Eine einfache Umrechnung zwischen den Feldgrößen ist nicht möglich. Im Nahfeld müssen daher die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. die magnetische Flussdichte einzeln ermittelt und bewertet werden.
5. In der Praxis kann aufgrund der teilweise komplexen Struktur der Strahlungsquellen und durch Umgebungseinflüsse häufig keine zuverlässige Entscheidung getroffen werden, ob am Messort Nah- oder Fernfeldbedingungen vorliegen. Deshalb sollten in diesen Fällen im Frequenzbereich mit $f < 1$ GHz die elektrische und die magnetische Feldstärkekomponente getrennt mit einem dafür geeigneten Messwertaufnehmer ermittelt werden.
6. Im Frequenzbereich von $30 \text{ MHz} < f < 1 \text{ GHz}$ ist es auch möglich, aus der Messung von $E_{\max}$, das durch Reflexionen entstehen kann, $H_{\max}$ über Gleichung A2.1 zu berechnen.
7. Oberhalb von 1 GHz ist es oft ausreichend, die elektrische Feldstärke bzw. die Leistungsdichte zu betrachten.
8. Dem Einfluss auf die Anzeige des Messgerätes durch Sendart (Modulationsart) und Vorhandensein mehrerer Frequenzen muss Rechnung getragen werden.
9. Effektivwerte können von breitbandigen Messgeräten mit Effektivwertanzeige (z. B. durch Verwendung von Thermokoppler-Feldsonden) auch bei Vorhandensein mehrerer unterschiedlicher Frequenzen direkt gemessen werden. Bei selektiven Messungen müssen die Einzeleffektivwerte für die jeweiligen Frequenzen zur Ermittlung des Gesamteffektivwertes quadratisch addiert werden.
10. Die elektrische Feldstärke in einer Raumrichtung kann mit einem Monopol oder Dipol gemessen werden, der kurz im Verhältnis zur Wellenlänge sein sollte.

11. Die magnetische Feldstärke in einer Raumrichtung kann mit einer Rahmenantenne gemessen werden, deren Abmessungen klein im Verhältnis zur Wellenlänge sein sollten.
12. Aus den Feldstärkekomponenten der drei zueinander senkrechten Raumrichtungen ergibt sich für jede Frequenz der Betrag der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke durch geometrische Addition. Eine direkte Messung ist möglich, indem die Fußpunktspannungen von drei senkrecht zueinander angeordneten Messantennen zusammengefasst und angezeigt werden.
13. Für Teilkörperexposition im Nahfeld, z. B. bei Mobiltelefonen, Handsprechfunkgeräten etc., ist sinnvollerweise ein Vergleich mit den EGW nach den Abschnitten A1.18 und A1.19 vorzunehmen. Die Festlegungen der EMFV sind beim Betrieb solcher Geräte erfüllt, bei denen der Hersteller bzw. Händler den Nachweis erbracht hat, dass die zulässigen Werte nach den Abschnitten A1.18 und A1.19 eingehalten sind. Die europäischen Normen DIN EN 50360 und DIN EN 62209-1 sowie die deutsche Norm DIN EN 50413 beschreiben Mess- und Berechnungsverfahren für Telekommunikationsgeräte, mit denen die erforderliche Beurteilung vorgenommen werden kann.
14. Die Messung der Exposition im Strahlungsbereich einer Radaranlage kann beispielsweise folgendermaßen erfolgen:
 - a) die Rotations- oder Schwenkautomatik der Radarantenne wird außer Betrieb gesetzt und die Antenne nacheinander so auf jeden der zu untersuchenden Messorte gerichtet, dass sich dieser im Strahlungsmaximum befindet,
 - b) bei umschaltbarer Antennen- und Modulationscharakteristik ist diejenige mit der höchsten Leistungsdichte am jeweiligen Messort zu wählen,
 - c) Spektrumanalysator in zero-span Modus (in einem Wasserfalldiagramm werden die Pulse nur richtig dargestellt, wenn der Span so klein gewählt wird, dass die Messbandbreite nicht aus Teilbereichen zusammengesetzt wird), anderenfalls wird nicht immer der gesamte dargestellte Bereich zeitlich durchgängig erfasst und
 - d) wenn keine dafür geeigneten Messgeräte zur Verfügung stehen, können zur Kontrolle der Einhaltung der Maximalwerte diese aus den Messwerten der mittleren Leistungsdichte und den Parametern Impulsbreite und Pulsfolgefrequenz errechnet werden.
- (2) Für Festlegungen zur Durchführung von Expositionsmessungen im Frequenzbereich mit $f \leq 100$ kHz siehe TREMF NF Teil 2.
- (3) Feldsonden mit isotroper Empfangscharakteristik, die durch eine orthogonale Anordnung von drei Messwertaufnehmern im Sondenkopf erzielt wird, liefern einen von Einfallrichtung und Polarisation des zu messenden Feldes weitgehend unabhängigen Messwert. Das Zusammenführen der Einzelsignale nach der Summenformel führt zu einer Summen-Feldstärke, 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. Wenn möglich, ist ein Mindestabstand von 50 cm zu leitfähigen Objekten einzuhalten. Sicherheitsvorschriften und/oder -abstände sind bei Messungen einzuhalten.

- (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).

Bei Verwendung geeigneter Hochfrequenz-Breitbandsonden (d. h., der im Datenblatt des Herstellers angegebene „True-RMS-Bereich“ der Sonde ist nicht kleiner als die Größe des zu messenden Feldes) liefert das Breitbandmessgerät den Effektivwert des Feldes. Werden jedoch Feldstärkewerte gemessen, die oberhalb des „True-RMS-Bereichs“ des Sensors liegen, liefert die Anzeige des Messgeräts einen Wert, der im Allgemeinen weder dem Effektiv- noch dem Spitzenwert des Feldes entspricht. Insbesondere bei Messung kurzer Hochfrequenzimpulse (z. B. Radar) ist dies besonders zu beachten.

Bei frequenzselektiven Hochfrequenzfeldstärkemessgeräten, die auf einem Spektrumanalysator basieren, ist meistens sowohl der Effektivwert des Feldes ablesbar, als auch ein „Peak-Wert“. Wobei beim „Peak-Wert“ des Spektrumanalysators allerdings beachtet werden muss, dass in der Hochfrequenzmesstechnik darunter nicht der größte Momentanwert des Signals (also der „Spitzenwert“), sondern der Effektivwert des Signals zum Zeitpunkt der größten Momentanleistung verstanden wird. Bei modulierten Signalen der Funkkommunikation tritt dieser Wert dann auf,

wenn die Hüllkurve des Signals maximal groß ist. Der „Peak-Wert“ ist dann der zum Zeitpunkt der maximalen Hüllkurve auftretende Effektivwert des Trägersignals. 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/o-der Foto),
 - e) mögliche minimale Annäherung an die Feldquelle/Erreichbarkeit von Teilen der Feld-quelle 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. Richtcharakteris-tik (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 (Maximumsuche 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 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
 - 1. untere/obere ALS,
 - 2. EGW,
 - 3. 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.

Der Raum um die abstrahlende Feldquelle wird 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.

So können bei hohen Frequenzen, wenn die Abmessungen der interessierenden Strukturen groß gegenüber der Freiraumwellenlänge sind, optische Näherungsmethoden eingesetzt werden. Bei diesen gehen neben den Maxwell-Gleichungen auch Elemente der klassischen geometrischen Optik ein.

Bekannte Methoden sind z. B.:

1. die geometrische Beugungstheorie (Geometrical Theory of Diffraction (GTD)),
2. die verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie (Uniform Geometrical Theory of Diffraction (UTD)) oder
3. die physikalische Beugungstheorie (Physical Theory of Diffraction (PTD)).

Für den Fall großräumiger Feldverteilungen (z. B. Funknetzplanung in der Mobilfunkplanung) können diese Methoden sehr vorteilhaft eingesetzt werden, da hier aus Gründen des PC-Arbeitsspeicherbedarfs nicht mehr auf feldtheoretische Methoden wie z. B. MoM, FEM oder FDTD zurückgegriffen werden kann.

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 Körperrnachbildung 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:

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

Gl. A4.2

bzw.

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

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. Messort,
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 DIN EN 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 Modellierung 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. im Frequenzbereich von $100 \text{ kHz} < f < 10 \text{ MHz}$ mit der Methode der gewichteten Spitzenwerte oder der Zeitbereichsmethode, 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

$$f(x_1, x_2) = 3x_1x_2, \quad \text{Gl. A4.11}$$

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

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

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

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 entfalten 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 Simulationsberechnung 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 Betriebszustände,
 - 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 Arbeitssituationen 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 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.

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.

Anhang 6: Berechnungsbeispiele für die Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe

Die hier aufgeführten Berechnungsbeispiele für die Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe entfalten keine Vermutungswirkung im Sinne von § 21 Absatz 6 Nummer 1 BetrSichV.

Zur Veranschaulichung der leistungsbezogenen Mittelung werden zwei beispielhafte Bewertungen durchgeführt.

A6.1 HF-Schweißanlage

Eine HF-Schweißanlage arbeitet mit einer Frequenz von $f = 27,12$ MHz, Schweißzeit $t_{\text{Schweiß}} = 1$ s und anschließenden Pausenzeit von $t_{\text{Pause}} = 10$ s. Am Arbeitsplatz wurde eine elektrische Feldstärke von $E_{\text{eff}} = 184$ V/m gemessen. Ist diese elektrische Feldstärke zulässig?

Lösung:

Für $f = 27,12$ MHz beträgt die einzuhaltende ALS nach Anhang 1 Tabelle A1.21 $E_{\text{eff}} = 61,4$ V/m (Effektivwert der elektrischen Feldstärke). Es gelten Anmerkung 2 Bedingung 1 ($T_{\text{Mittelung}} = 6$ min) und Anmerkung 4 Bedingung 2.

Ein Schweißzyklus dauert $T_{\text{Schweiß}} = 11$ s.

Bei einer Mittelungszeit von $T_{\text{Mittelung}} = 6$ min = 360 s entspricht das einer Häufigkeit von $n = 360$ s / 11 s = 32,7 $\approx$ 33 Schweißzyklen, da die nächste Schweißzeit noch vollständig in die Mittelungszeit fällt.

Mit einer Schweißzeit von $t_{\text{Schweiß}} = 1$ s ergibt sich eine Expositionszeit von $T_{\text{exp}} = 33$ s.

Die leistungsbezogene Mittelung ergibt mittels

$$\hat{E}_{\text{Mittel}} = \sqrt{\frac{T_{\text{exp}}}{T_{\text{Mittelung}}}} E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{33 \text{ s}}{6 \cdot 60 \text{ s}}} \cdot 184^2 \frac{\text{V}^2}{\text{m}^2} = 55,7 \frac{\text{V}}{\text{m}} \leq 61,4 \text{ V/m}.$$

Überprüfung der Einhaltung von Anmerkung 4 Bedingung 2:

Aus $E_{\text{eff}} = 184$ V/m und

$$E_{\text{eff}} \leq 32 \cdot \text{ALS} = 32 \cdot 61,4 = 1965 \text{ V/m folgt } 184 \text{ V/m} \leq 1965 \text{ V/m ist wahr.}$$

Eine $E_{\text{eff}} = 184$ V/m ist zulässig, da beide Bedingungen eingehalten werden.

Hinweis: Für eine umfassende Bewertung der Zulässigkeit der Exposition im Nahfeld der HF-Schweißanlage im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung nach EMFV sind zusätzlich die magnetische Feldstärke (oder alternativ zur separaten Betrachtung von E und H die Leistungsdichte S) und die in den Gliedmaßen induzierten Ströme zu bewerten.

A6.2 Wetterradar

Auf dem Dach eines Hochhauses befindet sich ein Wetterradar, dass folgende technische Spezifikationen aufweist.

Frequenz	12 GHz
max. Pulsleistung	300 kW
Mittlere Sendeleistung	150 W
Pulswiederholfrequenz (PRF)	250 Hz
Pulsdauer (PW)	2 µs
Öffnungswinkel der Antenne φ	4,03°
Umdrehungsgeschwindigkeit der Antenne	3 Umdrehungen pro Minute (d. h. $t_{\text{rot}} = 20 \text{ sec}$ und $f_{\text{rot}} = 0,05 \text{ Hz}$)

Im Bereich der Hauptstrahlrichtung befindet sich im Abstand von 50 m ein Arbeitsbereich, der für die Durchführung von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an Installationen auf dem Dach betreten werden muss.

Während eines Umlaufes der Antenne beträgt die Verweildauer des Arbeitsplatzes im Hauptstrahl des Radarsystems

$$t_{\text{verweil}} = \frac{\varphi}{360^\circ} \cdot t_{\text{rot}} = 223 \text{ ms.}$$

Während dieser Zeit wurde am Arbeitsplatz eine über das Puls-Pausenverhältnis gemittelte Leistungsdichte von $S_{\text{Mittel}} = 2 \text{ µs}/4 \text{ ms} = 80 \text{ W/m}^2$ gemessen.

Da die Betriebsfrequenz $f > 10 \text{ GHz}$ ist, darf die durch das Puls-Pausenverhältnis gemittelte Leistungsdichte über eine Zeitdauer von $T_{\text{Mittelung}} = 68 / f^{1,05} = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$ gemittelt werden, wobei in der Formel f in GHz einzusetzen ist.

Innerhalb von 5 Minuten erfolgen 15 Umdrehungen des Radars, mit einer Gesamtexpositionszeit von $t_{\text{expo,gesamt}} = \text{Umdrehungen} \cdot t_{\text{verweil}} = 15 \cdot 223 \text{ ms} = 3,345 \text{ s}$.

Somit ist folgender Vergleich anzustellen:

$$\bar{S} = \frac{T_{\text{exp}}}{T_{\text{Mittelung}}} S_{\text{Mittel}} = \frac{3,345 \text{ s}}{300 \text{ s}} \cdot 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 892 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \ll 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (\text{Anhang 1 Tabelle A1.21})$$

Bei alleiniger Betrachtung der mittleren Immission (gemittelte Leistungsdichte) wäre die Exposition als zulässig anzunehmen.

Hinweis: Diese zweite Mittelung über fünf Minuten ist jedoch grundsätzlich nur dann zulässig, wenn bei der immissionsverursachenden Radaranlage sichergestellt ist, dass bei Ausfall des Antennenantriebs (d. h., der Arbeitsplatz verbleibt im Extremfall permanent im Hauptstrahl der Antenne) automatisch auch der Sender abgeschaltet wird und damit eine Befeldung des Arbeitsplatzes über längere Zeiträume, als oben im Mittel über fünf Minuten angenommen, unterbunden wird.

Nach Anmerkung 4 zu Anhang 1 Tabelle A1.21 ist aber auch die über einen Radarimpuls (Impulsbreite, Dauer 2 µs) gemittelte Leistungsdichte S_{max} zu überprüfen. Diese darf für den vorliegenden Fall den tausendfachen Wert der anzuwendenden ALS ($= 1\,000 \cdot 50 \text{ W/m}^2 = 50 \text{ kW/m}^2$) nicht überschreiten.

Unter Berücksichtigung der technischen Daten des Radars folgt für $S_{\max}$

$$S_{\max} = \frac{S_{\text{Mittel}}}{PW \cdot PRF} = 160 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} > 50 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}.$$

Aufgrund dieses zweiten Kriteriums muss die Exposition als unzulässig angesehen werden.

Anhang 7: Ergänzungen zur Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe

Die hier aufgeführten Ergänzungen zur Bewertung von Radaranlagen entfalten keine Vermutungswirkung im Sinne von § 21 Absatz 6 Nummer 1 BetrSichV.

A7.1 Radaranlagen

A7.1.1 Allgemeines

Mit „RADAR“ (RADio Detection And Ranging) werden Verfahren der Funkortung bezeichnet, bei denen elektromagnetische Signale vom Radarsender ausgestrahlt und ihre Reflexionen an Objekten vom Radarempfänger wieder empfangen werden. Aus diesen Reflexionen kann dann beispielsweise auf die Lage (Entfernung, Richtung, Höhe), die Beschaffenheit oder die Bewegung der Objekte geschlossen werden. Bei Erzeugung des RADAR-Signals kann auch Röntgenstrahlung entstehen. Diese ist nicht Gegenstand der TREMF HF.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Radartechnik sind zu Land, zu Wasser und in der Luft sehr vielfältig. Die Radartechnik wird beispielsweise angewendet, um den Luftverkehr zu kontrollieren und zu sichern. Radarsysteme finden sich auch an Wasserstraßen und auf Schiffen, vermehrt werden sie auch in Kraftfahrzeugen eingesetzt (Hinderniswarnung, Adaptive Cruise Control).

Aus dem Betrachtungswinkel der Arbeitssicherheit besonders relevant sind Radarsysteme der zivilen und militärischen Flugsicherung, der militärischen Flugabwehr, auf Schiffen sowie die Wasserstraßenradare an Küsten und Flüssen, da diese Anlagen häufig besonders große Leistungen absenden bzw. Personen den Antennen sehr nahekommen können. Radaranwendungen im Kfz-Bereich sind aufgrund ihrer geringen abgestrahlten Leistung für die Arbeitssicherheit im Vergleich dazu eher von untergeordneter Bedeutung, es sei denn, am Arbeitsplatz kumulieren sich die Felder einer größeren Anzahl derartiger Kleinleistungs-Radarmodule.

Je nach Aufgabe verwenden Radaranlagen sehr unterschiedliche Sendefrequenzen (typisch: $f > 1 \text{ GHz}$), Signalformen, Antennentypen und Raumabtastungsverfahren. Daher stellt die korrekte Bestimmung der HF-Exposition von Personen in der Umgebung von Radaranlagen häufig eine vergleichsweise große Herausforderung dar. Eine erschöpfende Darstellung der korrekten Expositionsanalyse bei allen klassischen Typen von Radaranlagen würde den Umfang dieser technischen Regeln sprengen. Im Folgenden werden daher nur einige wichtige Anmerkungen für die Bewertung der Exposition gegenüber Radarsignalen gegeben, die für die Expositionsbestimmung besonders wichtig sind, da deren Nichtbeachtung zu einer signifikanten Unterbewertung der Exposition führen kann.

Grundsätzlich gilt bei der Bewertung von Radaranlagen, dass eine korrekte Immissionsermittlung nur in enger Zusammenarbeit mit dem Anlagenbetreiber möglich ist, da sehr viele Parameter der Anlage bekannt sein müssen und z. B. bei Messungen die Anlagen unter Umständen in einen

besonderen definierten Betriebszustand gebracht werden müssen, der eine Worst-Case-Bewertung ermöglicht.

Bei der Messung pulsmodulierter Felder mit Frequenzen von $f > 300$ MHz mit Thermokoppler-Feldsonden, insbesondere an Radaranlagen, sollte 1/10 des maximalen Messbereichs nicht überschritten werden, da die Impuls-Spitzenleistung den Detektor zerstören kann (Warnhinweis des Herstellers beachten!). Das gilt auch für Messungen mit Kombinationen aus Höchsthäufigkeits-Leistungsmessern und angepassten Antennen, sofern nicht zum Schutz des Leistungsmesskopfes und zur Messbereichserweiterung zwischen Antenne und Leistungsmesskopf Dämpfungsglieder geschaltet wurden.

A7.1.2 Art der Leistungsabstrahlung

Je nach Aufgabenstellung werden entweder Dauerstrich-(CW) oder Pulsradaranlagen eingesetzt. Bei Pulsradaranlagen ist es zulässig, über das Tastverhältnis T_t mit ($T_t = T_{\text{Puls}} / T_{\text{Periode}}$) der Abstrahlung den Sechsmal-Mittelwert der Immission zu ermitteln (siehe Abschnitt 8). Dieser ist bei vielen Pulsradaranlagen deutlich kleiner als die über die Dauer des Impulses gemittelte Immission.

A7.1.3 Art der Raumabtastung

Es existieren in der Radartechnik eine Vielzahl von möglichen Raumabtastungsverfahren, in horizontaler Ebene beginnend bei einer fest ausgerichteten Antenne (d. h., die horizontale Hauptsenderichtung ändert sich zeitlich nicht; Beispiel: Geschwindigkeitsüberwachungsgerät), über einen Sektorscan, hin zu der besonders häufig anzutreffenden 360°-Azimutabtastung (z. B. bei Radaranlagen der Flugsicherung). Vertikal existieren ebenfalls die feste Antennenausrichtung und der Sektorscan, aber auch die allmähliche Änderung des Elevationswinkels der Abstrahlung während eines Zeitraums von mehreren 360°-Antennenumdrehungen (z. B. bei Wetterradarsystemen). Besonders flexibel wird die Raumabtastung bei Einsatz von Antennen mit elektronischer Strahlschwenkung („Phased Array Antennen“). Die Raumabtastung kann hier sehr flexibel eingestellt werden, was insbesondere die korrekte Erfassung des Worst-Case-Szenarios erschweren kann.

Die Art der Raumabtastung führt gegebenenfalls zu einer zusätzlichen Mittelung der Exposition. Grundsätzlich ist dies für Orte in der Nähe von Antennen mit zeitlich ändernder Hauptsenderichtung gegeben, da Personen dann nicht permanent den Radarsignalen ausgesetzt sind. Allerdings ist dies nur dann gegeben, wenn sichergestellt ist, dass die Sendeleistungsabstrahlung bei Abschaltung der Raumabtastung ebenfalls zuverlässig unterbrochen wird, sodass keine dauerhafte Exposition von Personen möglich ist. In diesem Fall kann die mittlere Immission über den prozentualen Anteil der Zeit, in der die Person während der Mittelungszeit ($t = 6$ min) vom Radarsignal exponiert wird, bestimmt werden.

Zur Bestimmung des Mittelungsfaktors werden oft die horizontalen bzw. vertikalen Keulenbreiten der Radarantenne benötigt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass innerhalb des Nahfeldes der Antenne die in den Betriebsdaten typisch angegebenen Strahlbreiten (3-dB-Öffnungswinkel) noch nicht ausgebildet sind, sondern wesentlich größere Öffnungswinkel vorliegen. Da sich die für die Arbeitssicherheit relevanten Aufenthaltsbereiche um Radarantennen jedoch meist im Nahfeld der Antenne befinden, kann eine Mittelwertbildung unter Verwendung der Fernfeldantennenparameter zu einer erheblichen Unterbewertung der Immission führen.

Messtechnisch können für die Bestimmung der Felder sowohl Breitband- als auch Selektivmessgeräte (Spektrumanalysatoren mit kalibrierter Messantenne) verwendet werden. Beide Messgerätetypen haben Vor- und Nachteile. Einfacher zu bedienen sind gewöhnlich die Breitbandmessgeräte.

Die Messung von CW-Radarsignalen ist hierbei im Vergleich zur korrekten Erfassung von Pulsradarsignalen deutlich unproblematischer. Bei der Messung der Immissionen von Pulsradarsystem sind hingegen insbesondere folgende Punkte zu beachten:

1. Bei Breitbandmessgeräten ist sicherzustellen, dass die kurzen hohen Pulsleistungen die empfindlichen Detektordioden bzw. Thermoelemente in den Sensoren nicht zerstören. Die Hinweise im Datenblatt des Herstellers sind zu beachten. Zerstörte oder beschädigte Sensoren führen meist nicht dazu, dass das Messgerät den Wert Null anzeigt (dies würde deutlich auf das Problem beim Sensor aufmerksam machen), sondern es wird ein zu kleiner Messwert angezeigt, sodass es zu einer nicht bemerkten Unterbewertung der Exposition kommen kann.
2. Zusätzlich ist bei Breitbandmessgeräten mit gleichgerichteten Sonden abzuklären, welche Art von Messergebnis vom Gerät angezeigt wird: Bei nicht zu großen Feldstärken (abhängig vom Sensor) liefert der Sensor direkt den zeitgemittelten Immissionswert (d. h., die Mittelung über das Tastverhältnis wird vom Sensor automatisch korrekt durchgeführt). Eine Anzeige der Pulsfeldstärke ist hier nicht möglich. Bei größeren Feldstärkewerten ist der Sensor nicht mehr in der Lage, die Mittelwertbildung korrekt durchzuführen, die Anzeige nähert sich mehr und mehr der Pulsfeldstärke an, erreicht jedoch nicht unbedingt exakt diesen Wert. Die Hersteller der Messgeräte können oft Informationen bezüglich des genauen Verhaltens ihrer Sonden liefern (z. B. den Feldstärkebereich in dem die korrekte RMS-Mittelung zuverlässig gegeben ist).
3. Im Gegensatz dazu liefern Thermokoppler-Feldsonden unabhängig von der Signalform und der Feldstärke zuverlässig den korrekten leistungsbezogenen Mittelwert der Immission (RMS-Wert).
4. Bei Messungen an scannenden oder rotierenden Antennen ist darauf zu achten, dass das zu messende Radarsignal ausreichend lang von der Sonde erfasst wird. Die mindestens notwendige Integrationszeit des Messgeräts ist dem Handbuch zu entnehmen. Ein Erfassungszeitraum kleiner als die notwendige Integrationszeit führt zu einer Unterbewertung der Immission.
5. Selektivmessgeräte (Spektrumanalysator, Messempfänger) eignen sich gut zur Bestimmung der Pulsfeldstärke und der Analyse des Signals im Zeitbereich („Zero Span“), z. B. zur messtechnischen Bestimmung des Tastverhältnisses. Eine Messung des Radarsignals in der für Spektrumanalysatoren üblichen frequenz aufgelösten Betriebsart („Filter Sweep“) ist nur bei Messungen an Radarantennen ohne weiteres möglich, die keine Rotations- oder Scanbewegungen durchführen.
6. Bei Messungen im Nahbereich der Antennen von Pulsradarsystemen z. B. der Flugsicherung mit Tastverhältnissen in der Größenordnung von 1:1 000 können Pulsfeldstärken im kV/m-Bereich auftreten, ohne dass die mittlere Immission die Vorgaben der EMFV überschreitet. Es muss bei derartigen Messungen daher unbedingt darauf geachtet werden, dass die Messantennen und der Analyzer für den Einsatz in derart starken Feldern spezifiziert sind. Unbedingt zu schützen ist der Eingang des Analysators durch die Verwendung von ausreichend großen

Dämpfungsgliedern. Weiterhin ist sicherzustellen, dass keine Falschbewertung der Immission durch eine nicht ausreichende Kabelschirmung erfolgt (Direkteinstrahlung des Radarsignals in das Kabel oder sogar in das Messgerät).

7. Bei Messungen an scannenden oder rotierenden Radarantennen mit Messwertaufnehmern, die mit drei isotropen Dipolen ausgestattet sind und damit sehr einfach eine nahezu isotrope Felderfassung ermöglichen, ist darauf zu achten, dass das zu messende Radarsignal ausreichend lange erfasst wird (die drei Antennen des Sensors werden nacheinander mit dem Analysator verbunden, die Zeit für die komplette Erfassung aller drei Antennensignale liegt bei typisch mindestens 100 ms). Ist aufgrund der Abtastbewegung (z. B. der Rotationsgeschwindigkeit der Radarantenne in Verbindung mit ihrem Öffnungswinkel) eine Erfassungszeit von weniger als 100 ms zu erwarten, sind derartige Antennen nicht für die Messung geeignet. Zudem befinden sich in diesen Antennen meist aktive Komponenten (z. B. elektrisch gesteuerte Halbleiterschalter), die nur vergleichsweise kleine Feldstärkewerte im Bereich von einigen hundert V/m zulassen. In vielen Fällen ist daher die Verwendung einer einachsigen dipolähnlichen Antenne die bessere Wahl.
8. Die Messung des Radarsignals mit einem Spektrumanalysator oder Messempfänger hat unbedingt mit einer ausreichend großen Messbandbreite zu erfolgen. Ansonsten erfolgt eine deutliche Unterbewertung der Immission. Als einfache Faustregel gilt, dass die Messbandbreite mindestens das Zweifache des Kehrwerts der Pulsdauer des Radarsignals sein sollte.
9. Bereits diese wenigen elementaren Hinweise zur Immissionsermittlung bei Radaranlagen geben einen guten Eindruck in die mögliche Komplexität dieser Aufgabenstellung. Da insbesondere bei Radaranlagen großer Leistung die Tätigkeiten in der unmittelbaren Umgebung der Antenne durchaus kritisch zu betrachten sind, sollten Untersuchungen an derartigen Systemen nur von besonders erfahrener Personal in enger Zusammenarbeit mit dem Betreiber vorgenommen werden.

A7.2 OFDM

Im digitalen Rundfunk (DAB, DVB-T2) und Mobilfunk (LTE, 5G, WLAN) wird ein sogenanntes Vielträgerverfahren verwendet (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex). Hierbei werden die Daten auf einer Vielzahl von dicht benachbarten Trägerfrequenzen übertragen. Jede einzelne Trägerfrequenz wird dabei mit einer Quadraturamplitudenmodulation (QAM) moduliert. Bei diesen Signalen ist ein starker Unterschied zwischen zeitlich konstanter mittlerer Leistung und kurzfristigen Leistungsspitzen (Informationskodierung) im Signal zu beobachten. Der sog. „Crest-Faktor“ beträgt größenordnungsmäßig 10 – 12 dB (maximal das 4-Fache der mittleren Feldstärke). Bei Rundfunksendern muss darüber hinaus beachtet werden, dass üblicherweise mehrere Sender-Signale mit vergleichbarer Leistung auf eine Antenne geschaltet werden. Im abgestrahlten Summensignal ist der Crestfaktor dann durch die Überlagerung der einzelnen Signale nochmals größer. Bei zwei Signalen erhöht er sich um 3 dB, bei vier Signalen sind es 6 dB. Zulässig ist nach Tabelle A3.4 Anmerkung 4 EMFV ein Unterschiedsfaktor zwischen kurzfristiger Spitzenleistung und mittlerer Leistung von 1 000, was 30 dB entspricht. Dieser Wert wird jedoch auch bei Einbeziehung der Summation einzelner Rundfunksignale nicht erreicht. In der Praxis treten Crestfaktoren in der Größenordnung von 10 – 20 dB auf. Sehr wichtig ist die Berücksichtigung des Crestfaktors allerdings bei der Bestimmung der Spitzenwerte des Signals für die Bewertung der Beeinflussung von Implantaten.