

Technische Regeln zur Arbeitsschutz- verordnung zu elektromagnetischen Feldern	TREMF Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz	Teil Allgemeines
--	---	---------------------

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 „Allgemeines“ konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs 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 Verantwortung
 - 3 Anwendung und Gliederung der TREMF
 - 4 Begriffsbestimmungen und Erläuterungen
 - 5 Physikalische Größen
 - 6 Schutzkonzept - Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen
 - 7 Expositionszonenkonzept
 - 8 Literaturhinweise
- Anhang Direkte und indirekte Wirkungen elektromagnetischer Felder

1 Anwendungsbereich

- (1) Diese Technische Regel mit ihren Teilen (siehe Absatz 4) dient dem Schutz vor direkten und indirekten Wirkungen durch elektromagnetische Felder (EMF) am Arbeitsplatz.
- (2) Die TREMF HF gilt für EMF im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz. Sie gilt nach § 1 Absätzen 2 und 3 EMFV nur für Kurzzeitwirkungen und nicht für vermutete Langzeitwirkungen.

- (3) Der Teil „Allgemeines“ dieser TREMF erläutert den Anwendungsbereich der EMFV und enthält die wesentlichen Begriffe, die bei der Umsetzung der EMFV relevant sind, sowie Angaben zu tatsächlichen und möglichen Gefährdungen der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten durch EMF.
- (4) Gegenstand dieser TREMF sind:
 - 1. die wesentlichen Begriffe, die bei der Umsetzung der EMFV hinsichtlich elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz relevant sind (Teil „Allgemeines“),
 - 2. die Beurteilung der Gefährdungen der Gesundheit und Sicherheit von Beschäftigten und besonders schutzbedürftigen Beschäftigten durch diese EMF (Teil 1),
 - 3. wie diese EMF gemessen oder berechnet und bewertet werden (Teil 2),
 - 4. die Maßnahmen zur Vermeidung und Verringerung der Gefährdungen von Beschäftigten durch EMF (Teil 3).

2 Verantwortung

- (1) Für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung ist der Arbeitgeber verantwortlich. Sofern er nicht selbst über die erforderlichen Kenntnisse verfügt, muss er sich durch fachkundige Personen nach § 2 Absatz 8 EMFV beraten lassen. Dies kann in Abhängigkeit der Art und des Umfangs der Gefährdungsbeurteilung z. B. eine Fachkraft für Arbeitssicherheit sein.
- (2) Hinsichtlich der Beteiligungsrechte der betrieblichen Interessenvertretung gelten die Bestimmungen des Betriebsverfassungsgesetzes bzw. der jeweiligen Personalvertretungsgesetze.
- (3) Unabhängig von den in dieser TREMF beschriebenen Vorgehensweisen sind vom Arbeitgeber die Beschäftigten oder ihre Interessenvertretung, sofern diese vorhanden ist, aufgrund der einschlägigen Vorschriften zu beteiligen.

3 Anwendung und Gliederung der TREMF

- (1) Die in der TREMF HF angegebenen Werte basieren auf sinusförmigen Signalformen mit einer Frequenz. Daher erfolgt eine Umrechnung von Effektiv- in Spitzenwert nach Gleichung 4.2 mit einem Scheitelfaktor von $\sqrt{2}$.
- (2) Vektoren physikalischer Größen werden in der Schriftlage fett und kursiv dargestellt, z. B. ***B***, ***E***, ***H***.
- (3) Die in dieser TREMF verwendeten Normen sind mit dem zum Zeitpunkt der Erstellung der TREMF aktuellen Ausgabedatum referenziert.
- (4) Verweise ohne vollständige Referenzierung (Quellenangabe wie „EMFV“) beziehen sich auf die aktuelle Fassung des verwiesenen Dokuments.
- (5) Die EMFV enthält in Anhang 2 und Anhang 3 Tabellen mit Expositionsgrenzwerten und Auslöseschwellen. Der Forschungsbericht FB 451 des BMAS enthält die Tabellen 6.3 bis 6.6 mit Schwellenwerten zur Beeinflussung von aktiven kardialen und passiven Implantaten. Diese Tabellen sind auch in Teil 2 Anhang 1 zu finden. Um Doppelnennungen von Tabellenverweisen zu vermeiden und die Lesbarkeit zu unterstützen, sind in Tabelle 3.1 die entsprechenden Zuordnungen aufgeführt.

Tab. 3.1 Entsprechungstabelle für Tabellennummerierung zwischen EMFV, Forschungsbericht FB 451 und TREMF

TREMF (Teil 2 Anhang 1)	EMFV und FB 451
	Anhang 2 EMFV
A1.7	A2.1
A1.8	A2.2
A1.9	A2.3
A1.10	A2.4
A1.11	A2.5
A1.12	A2.6
A1.13	A2.7
A1.14	A2.8
A1.15	A2.9
A1.16	A2.10
A1.17	A2.11
	Anhang 3 EMFV
A1.18	A3.1
A1.19	A3.2
A1.20	A3.3
A1.21	A3.4
A1.22	A3.5
A1.23	Anmerkung 2 zu Tabelle A3.4
A1.24	Anmerkung 4 zu Tabelle A3.4
	FB 451
A1.25	6.3
A1.26	6.4
A1.27	6.5
A1.28	6.6

3.1 Anwendung der TREMF

- (1) Arbeitsbereiche mit EMF-Exposition unterliegen der EMFV. Für diese Arbeitsbereiche und die dort tätigen Beschäftigten wird unterschieden (siehe auch Abbildung 3.1):
 1. vereinfachte Gefährdungsbeurteilung (siehe Teil 1 Abschnitt 6.4),
 2. Gefährdungsbeurteilung (siehe Teile 1, 2 und 3),
 3. Gefährdungsbeurteilung für besonders schutzbedürftige Beschäftigte (siehe Teil 1 Abschnitt 6.9).
- (2) Der Arbeitgeber stellt sicher, dass die Gefährdungsbeurteilung fachkundig geplant und durchgeführt wird. Ist der Arbeitgeber dazu nicht selbst in der Lage, kann eine Fachkraft für Arbeitssicherheit den Arbeitgeber hinsichtlich der Durchführung einer vereinfachten Gefährdungsbeurteilung nach EMFV unterstützen. Bei der Gefährdungsbeurteilung bzw. der Gefährdungsbeurteilung für besonders schutzbedürftige Beschäftigte können fachkundige Personen nach § 4 EMFV in Verbindung mit § 2 Absatz 8 EMFV den Arbeitgeber beraten.

Hinweis 1: Die Anforderungen der 26. BImSchV müssen für öffentlich zugängliche Bereiche eingehalten werden. Eine für diese Bereiche durchzuführende Gefährdungsbeurteilung kann die Ergebnisse der für diese Bereiche bereits durchgeführten Expositionsbewertungen ggf. berücksichtigen (siehe § 3 Absatz 1 Satz 7 EMFV). Werden für diese Bereiche Maßnahmen abgeleitet, ist § 6 Absatz 3 Nummer 2 EMFV zu berücksichtigen.

Hinweis 2: Werden die Werte aus den Anhängen 2 und 3 der EU-Ratsempfehlung zu EMF 1999/519/EG eingehalten, sind auch für besonders schutzbedürftige Beschäftigte (siehe Abschnitt 4.4) keine Maßnahmen erforderlich. Besteht hingegen ein großer Unterschied zwischen Effektiv- und Spitzenwert, insbesondere bei EMF mit nicht konstanter Leistungsabgabe, ist die Einhaltung der Schwellenwerte nach Teil 2 Anhang 1 Tabellen A1.25 bis A1.28 zu prüfen.

Unterstützung des Arbeitgebers bei der Durchführung der Gefährdungsbeurteilung durch:

Fachkraft für Arbeitssicherheit

vereinfachte Gefährdungsbeurteilung (siehe Teil 1 Abschnitt 6.4)

Anwendungsbereich:
EMF-Quellen, bei denen von keiner Gefährdung für Beschäftigte* auszugehen ist.

Bewertungsgrundlage:
Teil 1 Anhang 1 Tabelle A1.1 und ggf. Teil 1 Anhang 2 Tabelle A2.1 zur allgemeinen Bewertung der Exposition von Beschäftigten oder Einhaltung der Grenzwerte nach 26. BImSchV oder EU-Ratsempfehlung zu EMF 1999/519/EG

Bei Anwendung von Teil 1 Anhang 1 Tabelle A1.1 und ggf. Teil 1 Anhang 2 Tabelle A2.1 ist von einer EMF-Exposition unterhalb der Auslöseschwellen auszugehen.

Keine zusätzlichen Berechnungen, Messungen oder Schutzmaßnahmen bzgl. möglicher Gefährdungen durch EMF notwendig.

Dokumentierte Gefährdungsbeurteilung des vereinfachten Verfahrens ist erforderlich.

Fachkundige Person nach § 2 Absatz 8 EMFV

Gefährdungsbeurteilung (siehe Teile 1, 2, 3) Anwendungsbereich: EMF-Quellen, bei denen eine Gefährdung für Beschäftigte* nicht auszuschließen ist. Bewertungsgrundlage: Auslöseschwellen und Expositionsgrenzwerte nach Teil 2 Anhang 1 Beurteilung der Gefährdung nach: • allgemeinen Hinweisen zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung (siehe Teil 1), • vorliegenden Informationen oder Messung, Berechnung, Simulation (siehe Teil 2), • ggf. Ableitung von Schutzmaßnahmen (siehe Teil 3). Dokumentierte Gefährdungsbeurteilung ist erforderlich.	Gefährdungsbeurteilung für besonders schutzbedürftige Beschäftigte (siehe Teil 1 Abschnitt 6.9) Anwendungsbereich: EMF-Quellen, bei denen eine mögliche Gefährdung durch EMF von besonders schutzbedürftigen Beschäftigten nach § 2 Absatz 7 EMFV nicht auszuschließen ist. Bewertungsgrundlage: Auslöseschwellen und Expositionsgrenzwerte u. a. Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.16 und A1.17 sowie Teil 1 Anhang 2 Tabelle A2.1 und Teil 2 Anhang 1 Abschnitt A1.7 Es gilt u. a. zu beachten: • Vereinfachte Gefährdungsbeurteilung ist zu prüfen und ggf. erneut durchzuführen, • Teil 1 Abschnitt 6.9.2 ist zusätzlich zur Bewertung der Gefährdung und • Teil 1 Abschnitt 6.9.3 bei der Ableitung von Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen. Dokumentierte Gefährdungsbeurteilung ist erforderlich.
---	---

Fachkenntnisse nach rechts zunehmend

Abb. 3.1 Arten der Gefährdungsbeurteilung bei EMF-Exposition von Beschäftigten | * Ausgenommen besonders schutzbedürftige Beschäftigte (siehe rechte Spalte)

3.2 Gliederung der TREMF

Abbildung 3.2 gibt einen Überblick über die Gliederung der TREMF:

Arbeitsschutzverordnung zu EMF

TREMf NF

Statische u. niederfrequente EMF

TREMf HF

Hochfrequente EMF

TREMf MR

Magnetresonanzverfahren

Teil „Allgemeines“

(Anwendungsbereich, Verantwortung, Anwendung und Gliederung der TREMF, Begriffsbestimmungen, physikalische Größen, Schutzkonzept und Expositionszonen)

Anhang Direkte und indirekte Wirkungen von EMF

Abschnitt 1–4

Verantwortung, Anwendung, Gliederung, Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Teil 1

„Beurteilung der Gefährdungen durch NF/HF“

Anhang 1 Bewertung verschiedener Expositionssituationen für Beschäftigte

Anhang 2 Bewertung verschiedener Expositionssituationen für besonders schutzbedürftige Beschäftigte

Anhang 3 Empfehlungen zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung

Anhang 4 Empfehlungen zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung

Teil 2

„Messen, Berechnen, Bewerten von Expositionen gegenüber NF/HF“

Anhang 1 Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen, Expositionszonen

Anhang 2 Ergänzungen zur Expositionsermittlung

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 (HF) Berechnungsbeispiele für die Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe

Anhang 7 (HF) Ergänzungen zur Bewertung von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe

Teil 3

„Maßnahmen zur Vermeidung und Verringerung von Gefährdungen durch NF/HF“

Anhang 1 Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung

Anhang 2 Betriebsanweisung

Abschnitt 5

Gefährdungsbeurteilung

Abschnitt 6

Fachkundige Personen

Abschnitt 7

Schutzmaßnahmen

Abschnitt 8

Unterweisung

Abschnitt 9

Arbeitsmedizinische Vorsorge

Abschnitt 10

Besondere Festlegungen

nach § 18 EMFV

Abschnitt 11

Expositionen durch weitere Belastungsfaktoren

Abschnitt 12

Literaturhinweise

Anhang 1: Physikalische Grundlagen der Magnetresonanz

Anhang 2: Anwendungen von Magnetresonanz-Verfahren

Anhang 3: Hilfestellungen zur Selbstüberprüfung bei Inanspruchnahme der besonderen Festlegungen

Anhang 4: Hilfestellung zur Selbstüberprüfung der Organisation

Abb. 3.2 Gliederung der TREMF

4 Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Es gelten die in § 2 EMFV festgelegten Begriffe.

4.1 Arbeitsplatz

Ein Arbeitsplatz im Sinne dieser TREMF ist ein Bereich, in dem der Beschäftigte im Rahmen seiner Arbeit tätig ist.

4.2 Auslöseschwellen (ALS)

- (1) Auslöseschwellen sind nach § 2 Absatz 6 EMFV festgelegte Werte von direkt messbaren physikalischen Größen.
- (2) Folgende ALS werden unterschieden:
 1. bei Frequenzen von $0 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$:
 - a) für elektrische Felder zwischen unteren und oberen ALS (Vermeidung direkter und indirekter Wirkungen),
 - b) für magnetische Felder zwischen unteren ALS (Vermeidung sensorischer Wirkungen) und oberen ALS (Vermeidung gesundheitlicher Wirkungen) und
 2. bei Frequenzen von $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ die ALS für elektromagnetische Felder (Vermeidung thermischer Wirkungen).

4.3 Beschäftigte

Dem Anwendungsbereich der EMFV unterliegen nach § 2 Absatz 10 EMFV folgende Personen, sofern sie bei ihren Tätigkeiten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sein können:

1. Beschäftigte nach § 2 Absatz 2 ArbSchG und
2. den Beschäftigten gleichgestellte Personen:
 - a) Schülerinnen und Schüler,
 - b) Studierende, Praktikantinnen und Praktikanten sowie
 - c) sonstige, insbesondere an wissenschaftlichen Einrichtungen tätige Personen, z. B. Gastwissenschaftler.

Hinweis: Zum Schutz von Beschäftigten und denen gleichgestellten Personen unter 18 Jahren sind auch die entsprechenden Forderungen des Jugendarbeitsschutzgesetzes (JArbSchG) einzuhalten.

4.4 Besonders schutzbedürftige Beschäftigte

Zu besonders schutzbedürftigen Beschäftigten zählen nach § 2 Absatz 7 EMFV insbesondere Beschäftigte mit:

1. aktiven medizinischen Implantaten, insbesondere Herzschrittmachern,
2. passiven medizinischen Implantaten, bei denen eine Beeinflussung durch EMF möglich ist (z. B. durch Erwärmung oder Kraftwirkung),

3. medizinischen Geräten, die am Körper getragen werden, insbesondere Insulinpumpen,
4. sonstigen durch elektromagnetische Felder beeinflussbaren Fremdkörpern im Körper oder
5. eingeschränkter Thermoregulation, z. B. infolge von Medikamenteneinnahme.

Hinweis: Der Begriff „Körperhilfsmittel“ wird synonym für Implantate oder medizinische Geräte, die am Körper getragen werden, verwendet.

4.5 Betriebszustände

Die Betriebszustände der EMF-Quellen werden für die Gefährdungsbeurteilung genau definiert. In dieser TREMF wird zwischen dem Normalbetrieb und den von diesem abweichenden Betriebsarten unterschieden, wie z. B. Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten oder Einrichtungsvorgänge. In der Regel sind die vom Normalbetrieb abweichenden Betriebsarten mit einer erhöhten Gefährdung verbunden. Definierte Betriebsbedingungen sind eindeutig beschreibbare Betriebsweisen, wie z. B. Lastfälle.

4.5.1 Normalbetrieb

Normalbetrieb ist der Betrieb einer EMF-Quelle im gesamten Funktionsbereich, ohne z. B. Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten oder Einrichtungsvorgänge.

4.5.2 Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten, Einrichtungsvorgänge

Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten oder Einrichtungsvorgänge werden nach den vom Hersteller der EMF-Quelle mitgelieferten Informationen durchgeführt. Mit Tätigkeiten in diesen Betriebszuständen wird die vorgesehene Funktion der EMF-Quelle im Normalbetrieb sichergestellt.

4.6 Direkte Wirkungen

Direkte Wirkungen sind nach § 2 Absatz 3 EMFV die im menschlichen Körper durch dessen Anwesenheit in einem elektromagnetischen Feld unmittelbar hervorgerufenen Wirkungen. Dazu zählen:

1. thermische Wirkungen aufgrund von Energieabsorption aus elektromagnetischen Feldern im menschlichen Gewebe oder durch induzierte Körperströme in Extremitäten und
2. nichtthermische Wirkungen durch die Stimulation von Muskeln, Nerven oder Sinnesorganen. Diese Wirkungen können kognitive Funktionen oder die körperliche Gesundheit exponierter Beschäftigter nachteilig beeinflussen, durch die Stimulation von Sinnesorganen zu vorübergehenden Symptomen wie Schwindelgefühl oder Magnetophosphenen führen sowie das Wahrnehmungsvermögen oder andere Hirn- oder Muskelfunktionen beeinflussen und damit das sichere Arbeiten von Beschäftigten gefährden.

4.7 Eindringtiefe

Die Eindringtiefe bezeichnet die Weglänge im menschlichen Körpergewebe, nach der die betrachtete physikalische Feldgröße auf $\frac{1}{e} \sim 0,37 = 37\%$ ihres Ausgangswertes abgenommen hat.

Hinweis: Allein aus der Eindringtiefe kann nicht gefolgert werden, dass tiefer im Gewebe keine Wirkung mehr auftritt.

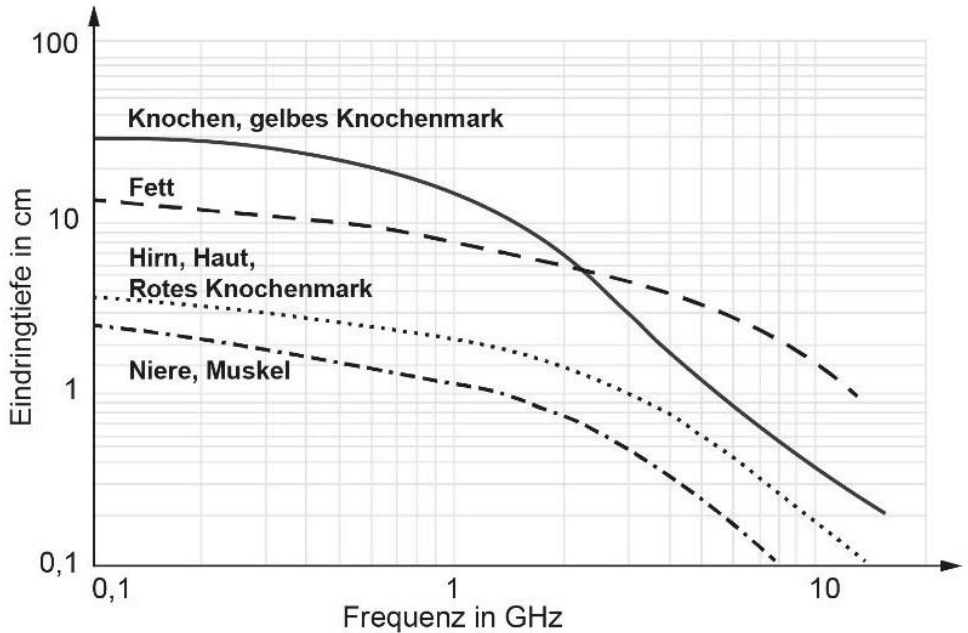


Abb. 4.1 Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Frequenz und verschiedenen Gewebetypen (www.emf-portal.org)

4.8 Effektivwerte von Feldgrößen

- (1) Der Effektivwert (G_{eff}) ist der quadratische zeitliche Mittelwert einer zeitveränderlichen Feldgröße (G):

$$G_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} G^2(t) dt}, \quad \text{Gl. 4.1}$$

$$G_{\text{peak}} = k_s \cdot G_{\text{eff}}, \quad \text{Gl. 4.2}$$

mit

T_1 Integrationszeit,

$G(t)$ Zeitfunktion von G ,

G_{peak} als Spitzenwert der Feldgröße und

k_s als Scheitelfaktor (Crest-Faktor).

Bei sinusförmigen Signalverläufen einer Frequenz beträgt $k_s = \sqrt{2}$.

- (2) Effektivwerte finden im Sinne der EMFV Anwendung zur Bestimmung der Auslöseschwelle im Frequenzbereich von $100\text{ kHz} \leq f \leq 300\text{ GHz}$ und betreffen folgende Feldgrößen: elektrische Feldstärke E , magnetische Feldstärke H , stationärer zeitveränderlicher Kontaktstrom I_K , induzierter Strom durch beliebige Gliedmaßen I_G .

4.9 Elektromagnetische Felder und mögliche Wirkungen

4.9.1 Elektromagnetische Felder (EMF)

Elektromagnetische Felder sind statische elektrische, statische magnetische oder zeitveränderliche elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder mit Frequenzen von $0\text{ Hz} \leq f \leq 300\text{ GHz}$ (siehe Abbildung 4.2). An Arbeitsplätzen können sich EMF hinsichtlich Anzahl der Quellen, Frequenzbereichen und Signalverläufen einzelner Quellen unterscheiden. Beispiele für Expositionen gegenüber EMF finden sich in Teil 1 Anhänge 3 und 4.

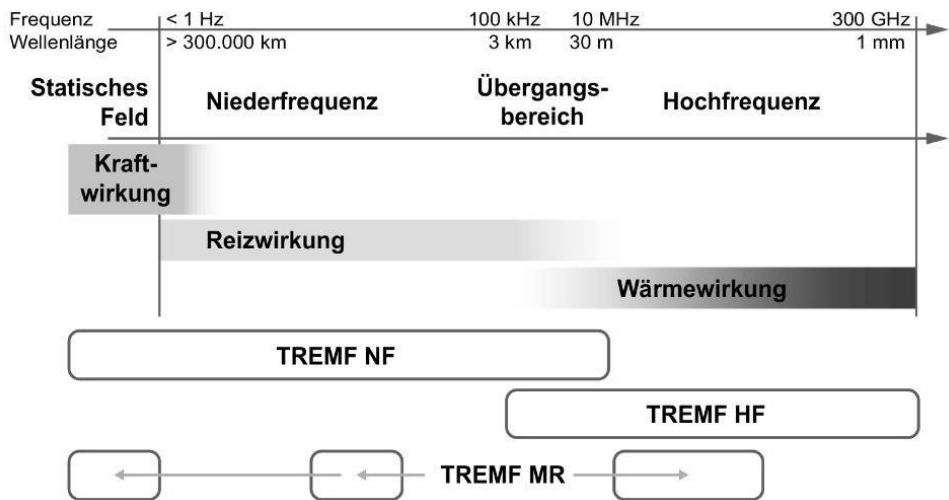


Abb. 4.2 Frequenzbereiche und Wirkungen elektromagnetischer Felder, Anwendungsbereiche der TREMF

4.9.2 Mögliche Wirkungen von EMF

Abbildung 4.3 gibt einen Überblick über mögliche Wirkungen von EMF auf den Menschen:

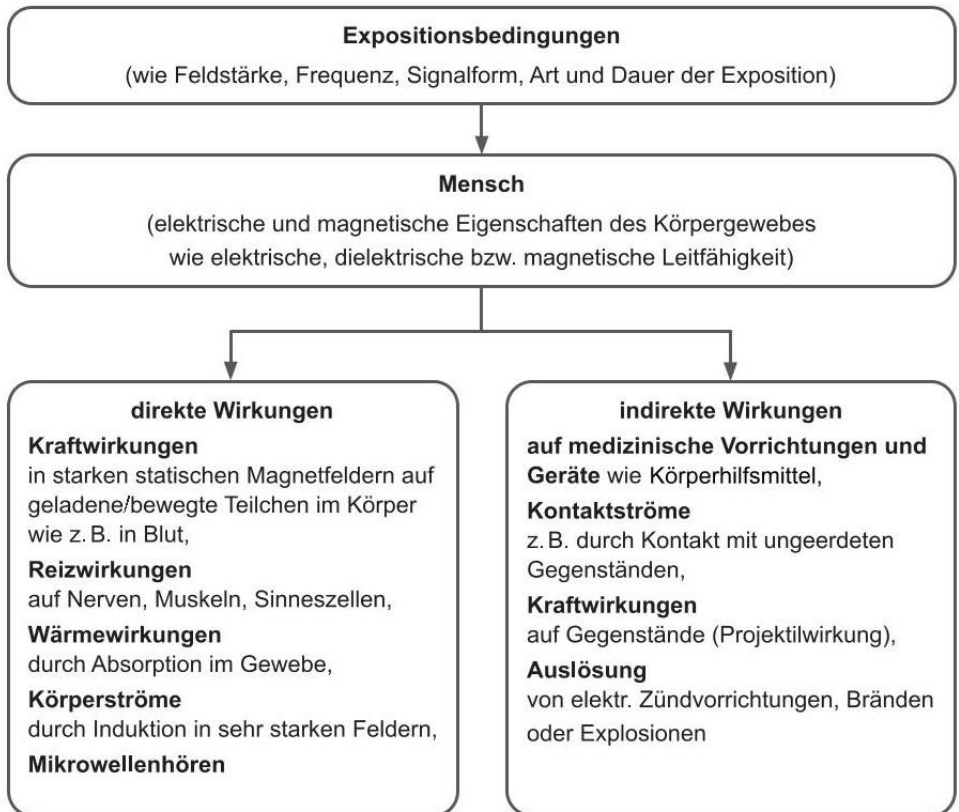


Abb. 4.3 Mögliche Wirkungen von EMF auf den Menschen

4.10 Emission

Emissionen im Sinne der EMFV sind die von einer EMF-Quelle ausgehenden EMF (siehe Abbildung 4.4).

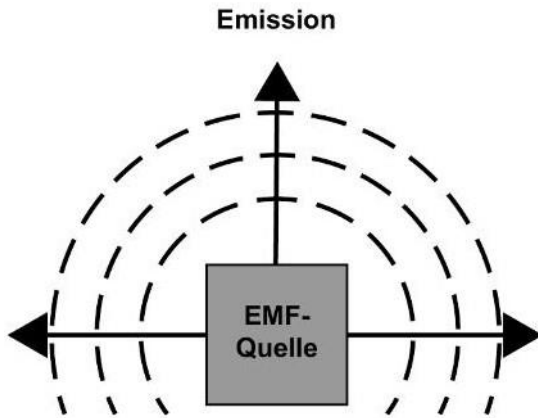


Abb. 4.4 Grafische Darstellung von Emission

4.11 EMF-Quelle

- (1) EMF-Quellen im Sinne dieser TREMF sind alle Anlagen, Systeme, Geräte und Gegenstände, die EMF im Frequenzbereich von $0 \text{ Hz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ erzeugen, verstärken bzw. übertragen.
- (2) Es ist möglich, EMF-Quellen hinsichtlich ihrer Mobilität zu unterscheiden:

Ortsfeste EMF-Quellen sind stationäre EMF-Quellen und stationär betriebene EMF-Quellen:

1. Stationäre EMF-Quellen sind alle ortsunveränderlichen EMF-Quellen.
2. Stationär betriebene EMF-Quellen sind alle EMF-Quellen, die während ihres bestimmungsgemäßen Betriebes keine Ortsveränderung erfahren, aber grundsätzlich ortsveränderlich sind.
3. Als mobile EMF-Quelle gelten alle EMF-Quellen, die sich bei bestimmungsgemäßigem Gebrauch in Bewegung befinden und in der Lage sind, währenddessen EMF zu erzeugen.

Hinweis: Für den Schutz von Beschäftigten, die sich mit mobilen EMF-Quellen fortbewegen, gelten sinngemäß die Anforderungen für stationäre EMF-Quellen, da sich die EMF-Quelle in Bezug zu den Beschäftigten in Ruhe befindet.

4.12 Erdung

Als Erdung wird eine elektrische Verbindung zwischen leitenden Komponenten (z. B. Einhausung) und dem leitfähigen Erdreich bezeichnet, die einen Potentialausgleich (siehe Abschnitt 4.33) sicherstellt. Im Sinne dieser TREMF wird sie zum Schutz vor Gefährdungen durch Entladungen oder Kontaktströme angewendet.

4.13 Exposition (Art, Ausmaß und Dauer)

- (1) Exposition im Sinne dieser TREMF bedeutet, dass Beschäftigte an ihrem Arbeitsplatz EMF ausgesetzt sind (siehe Abbildung 4.5, links). Die Exposition umfasst die Einwirkung auf den menschlichen Körper als auch auf medizinische Vorrichtungen oder Geräte einschließlich Herzschrittmachern sowie anderer aktiver oder passiver Implantate, am Körper getragener medizinischer Geräte oder sonstiger durch EMF beeinflussbarer Fremdkörper oder Materialien im Körper.

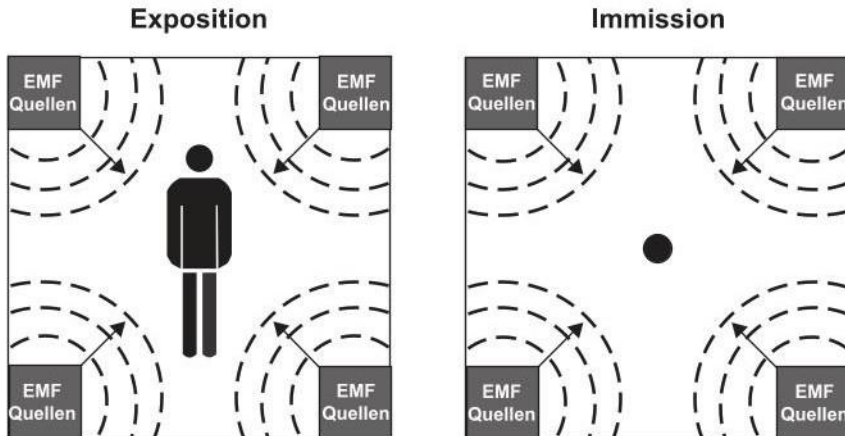


Abb. 4.5 Grafische Darstellung von Exposition (links) und Immission (rechts)

Hinweis 1: Unter Immission versteht man im Allgemeinen das Einwirken von EMF an einem Punkt (siehe Abbildung 4.5, rechts). Die Beurteilung der Exposition der Allgemeinbevölkerung (Immission von EMF) erfolgt nach der 26. BImSchV.

Hinweis 2: In dieser TREMF wird Expositionsmessung und Messung von Feldstärken bzw. Leistungsdichten synonym verwendet.

- (2) Die Art der Exposition beschreibt das für die Beurteilung entscheidende Feld, z. B. ein statisches elektrisches, statisches magnetisches oder zeitveränderliches elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld, einschließlich dessen räumlicher Verteilung am Arbeitsplatz und über den Körper der Beschäftigten (Ganz- oder Teilkörperexposition).
- (3) Unter dem Ausmaß ist die Höhe der Exposition gegenüber EMF zu verstehen. Je nach Frequenzbereich und zu vermeidender Wirkung (Schutzziel) wird das Ausmaß durch die physikalischen Größen interne sowie externe elektrische Feldstärke, elektrische Ladung, stationärer zeitveränderlicher Kontaktstrom und dessen Entladungspuls, Leistungsdichte, magnetische Feldstärke, magnetische Flussdichte, spezifische Absorptionsrate, lokale spezifische Energieabsorption oder induzierter Strom durch eine Gliedmaße ausgedrückt.
- (4) Die Dauer der Exposition ist – im Unterschied zur täglichen Arbeitszeit – die tatsächliche Dauer der Einwirkung von EMF auf Beschäftigte während der Arbeitszeit.

- (5) Expositionsrelevante EMF sind solche EMF, die über eine vereinfachte Gefährdungsbeurteilung hinaus für eine Expositionsbewertung eines Arbeitsbereichs herangezogen werden müssen. Expositionsrelevant sind EMF dann, wenn aufgrund der Art, des Ausmaßes und der Dauer der Exposition tatsächliche und mögliche Gefährdungen (siehe Abschnitt 4.41) zu erwarten sind. Hierbei umfasst der Arbeitsbereich auch die Verkehrswege zum Arbeitsbereich und die möglichen Flucht- und Rettungswege.

4.14 Expositionsgrenzwert (EGW)

- (1) Expositionsgrenzwerte nach § 2 Absatz 5 EMFV sind maximal zulässige Werte, die aufgrund von wissenschaftlich nachgewiesenen Wirkungen auf den menschlichen Körper festgelegt wurden und deren Einhaltung im Allgemeinen nicht direkt durch Messungen am Arbeitsplatz überprüfbar ist.
- (2) Es werden EGW für gesundheitliche und sensorische Wirkungen unterschieden.

Hinweis: Die EGW sind in Teil 2 Anhang 1 Abschnitte A1.3 und A1.5 aufgeführt.

4.14.1 Expositionsgrenzwert für gesundheitliche Wirkungen

EGW für gesundheitliche Wirkungen sind nach § 2 Absatz 5 Nummer 1 EMFV diejenigen Grenzwerte, bei deren Überschreitung gesundheitsschädliche Gewebeerwärmung oder Stimulation von Nerven- oder Muskelgewebe möglich sind.

4.14.2 Expositionsgrenzwert für sensorische Wirkungen

EGW für sensorische Wirkungen sind nach § 2 Absatz 5 Nummer 2 EMFV diejenigen Grenzwerte, bei deren Überschreitung reversible Stimulationen von Sinneszellen des Kopfes (insbesondere Augen, vestibuläres Organ, Zunge) oder geringfügige Veränderungen von Hirnfunktionen möglich sind (Magnetophosphene, Schwindel, Übelkeit, metallischer Geschmack, Mikrowellenhören).

4.15 Expositionszonen

- (1) In dieser TREMF werden unterschiedliche Expositionszonen definiert. Je nach Expositionszone ergeben sich verschiedene Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Gefährdungen von Beschäftigten durch EMF. In der betrieblichen Praxis ist es z. B. möglich, dass Bereiche, in denen Arbeitstätigkeiten ausgeführt werden, Verkehrswege oder Aufenthaltsbereiche jeweils getrennt bewertet und der jeweiligen Expositionszone zugeordnet werden.
- (2) Expositionszonen sind eine Handlungshilfe zur Umsetzung der Festlegungen der EMFV. In der betrieblichen Praxis kann mittels Expositionszonen ein Bezug zwischen der Höhe der Exposition gegenüber EMF am Arbeitsplatz, den einzuhaltenden ALS und den erforderlichen Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten hergestellt werden.

4.16 Fachkundige Personen

Eine fachkundige Person nach § 2 Absatz 8 EMFV ist, wer über die erforderlichen Fachkenntnisse zur Ausübung einer in der EMFV bestimmten Aufgabe verfügt. Zu den Anforderungen zählen eine entsprechende Berufsausbildung oder Berufserfahrung jeweils in Verbindung mit einer zeitnah

ausgeübten einschlägigen beruflichen Tätigkeit sowie die Teilnahme an spezifischen Fortbildungsmaßnahmen. Für eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen an die Fachkunde siehe Teil 1 Abschnitt 3.4.

4.17 Fernfeld

Im Fernfeld einer EMF-Quelle besteht eine feste phasen- und betragsmäßige Beziehung zwischen elektrischer Feldstärke E und magnetischer Feldstärke H . Im Fernfeld stehen diese Vektoren senkrecht aufeinander. Im Fernfeld ist folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{|E|}{|H|} = 120 \pi \Omega \approx 377 \Omega \quad \text{Gl. 4.3}$$

(Unterschied zum Nahfeld siehe Abschnitt 4.30.)

4.18 Gewebefeldstärke

Siehe Abschnitt 5.2 Absatz 2 „Interne elektrische Feldstärke E_i “.

4.19 Hochfrequenzbereich

Im Hochfrequenzbereich werden EMF mit Frequenzen von $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$ zusammengefasst (siehe Abbildung 4.2).

Hinweis: Zu diesem Frequenzbereich gehört auch der Übergangsbereich (siehe Abschnitt 4.44).

4.20 Indirekte Wirkungen

Indirekte Wirkungen sind in Anlehnung an § 2 Absatz 4 EMFV die von EMF ausgelösten Wirkungen auf Gegenstände, welche die Gesundheit und die Sicherheit von Beschäftigten am Arbeitsplatz gefährden können. Dies betrifft insbesondere Gefährdungen durch

1. Einwirkungen auf medizinische Vorrichtungen oder Geräte einschließlich Herzschrittmachern sowie anderer aktiver oder passiver Implantate oder am Körper getragener medizinischer Geräte,
2. Einwirkungen auf metallischen Körperschmuck und verschiedene bei Tätowierungen bzw. Permanentmakeup verwendete Farbpigmente,
3. sonstige durch EMF beeinflussbare Fremdkörper im Körper,
4. Projektilwirkung ferromagnetischer Gegenstände in statischen Magnetfeldern,
5. Auslösung von elektrischen Zündvorrichtungen (Detonatoren),
6. Brände oder Explosionen durch die Entzündung von brennbaren Materialien aufgrund von Funkenbildung sowie
7. Entladungen und Kontaktströme.

4.21 Kognitive Funktionen

Kognitive Funktionen in Zusammenhang mit EMF umfassen die Informationsaufnahme aus der Umwelt und deren Verarbeitung, wie z. B. das Wahrnehmen, Erkennen oder Urteilen.

4.22 Kontakt

- (1) Beim Kontakt zwischen einem Beschäftigten und dem in einem EMF befindlichen Gegenstand werden im Sinne der EMFV bei der Exposition gegenüber EMF zwei Kontaktarten unterschieden:
 1. berührender Kontakt und
 2. greifender Kontakt.
- (2) Der greifende Kontakt (als bewusste Handlung) führt im Vergleich zum berührenden Kontakt (als unbeabsichtigte Handlung) zu einer größeren Kontaktfläche. Die Schwellen der Wahrnehmung und des Schmerzempfindens sind bei greifendem Kontakt im Vergleich zu berührendem Kontakt höher. Deshalb gibt es einen EGW für greifenden Kontakt und eine ALS für berührenden Kontakt (siehe auch Abschnitt 5.6).
- (3) Beim Kontaktstrom werden zwei Mechanismen unterschieden:
 1. Funkenentladung beim Entladungsstromimpuls (Dauer $T < 1$ ms) und
 2. Dauer-Kontaktstrom.
- (4) Die Frequenz des Dauer-Kontaktstroms hängt von der Frequenz des verursachenden elektrischen Feldes ab. Bei statischer Aufladung (z. B. bei Gleichstromfreileitungen, Folienbearbeitung) ist der Kontaktstrom ein kurzer Stromimpuls.

4.23 4Kontrollierte Arbeitsbedingungen

Unter kontrollierten Arbeitsbedingungen bei statischen Magnetfeldern versteht man im Sinne der EMFV, dass:

1. der Zugang auf speziell unterwiesene und geschulte Beschäftigte beschränkt ist und
2. spezielle Arbeitspraktiken und Maßnahmen, insbesondere kontrollierte Bewegungen in Bereichen mit hohen räumlichen Magnetfeldgradienten, angewendet werden.

Hinweis: Bei magnetischen Flussdichten von $B > 2$ T können Schwindel, Übelkeit und Magneto-phosphene auftreten. Wenn die Gefährdungsbeurteilung zeigt, dass Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten ausgeschlossen und sicheres Arbeiten gewährleistet ist, sind magnetische Flussdichten B bis 8 T zulässig.

4.24 Kurzzeitwirkungen

Als Kurzzeitwirkungen im Sinne der EMFV gelten wissenschaftlich nachgewiesene unmittelbar auftretende (akute) Wirkungen aufgrund der Exposition gegenüber EMF. Kurzzeitwirkungen umfassen direkte Wirkungen (thermische und nichtthermische Wirkungen) auf den Beschäftigten und indirekte Wirkungen, z. B. auf medizinische Geräte, chemische Stoffe oder Gegenstände.

4.25 Maßgebliche Veränderungen der Arbeitsbedingungen

Maßgebliche Veränderungen der Arbeitsbedingungen bzw. wesentliche Änderungen der Tätigkeit oder des Arbeitsplatzes können im Sinne der EMFV durch folgende Anlässe hervorgerufen werden:

1. feldrelevante Änderungen von Feldquellen,
2. den Einsatz neuer oder zusätzlicher Anlagen (Feldquellen) oder anderer Arbeitsmittel oder
3. die Änderung von Tätigkeiten, Arbeitsverfahren, Arbeitsumgebung oder Schutzmaßnahmen.

4.26 Maximalwert, räumlicher

Im Sinne der TREMF wird der räumliche Maximalwert als der im Körper des Beschäftigten (für EGW) oder am Arbeitsplatz (für ALS) auftretende betragsmäßig größte Wert der physikalischen Größe (z. B. Feldstärke) bezeichnet.

4.27 Medizinische Vorrichtungen und Geräte, Implantate

- (1) Medizinische Vorrichtungen und Geräte umfassen im Sinne der EMFV aktive und passive medizinische Implantate oder am Körper getragene medizinische Geräte.
- (2) Aktive medizinische Geräte und Implantate verfügen über eine Energiequelle und überwachen, unterstützen und/oder ersetzen Körperfunktionen. Hierzu zählen unter anderem Herzschrittmacher, Defibrillatoren, Cochlea- oder Brainstem-Implantate, Retina-Encoder, Neurostimulatoren, Insulinpumpen sowie Implantate zur Steuerung elektromechanischer Prothesen.
- (3) Passive medizinische Geräte und Implantate werden eingesetzt, um zerstörte oder beschädigte Körperteile ganz oder teilweise zu ersetzen und die betroffene mechanische Funktion weitestgehend wiederherzustellen. Dazu zählen unter anderem Endoprothesen, Schienen und Stabilisatoren, Nägel und Schrauben, Stabilisatoren für Blutgefäße (Stents), Gefäßklammern (Clips), Herzklappen sowie Schädelplatten.

4.28 Mess- und Berechnungsunsicherheit

Die Mess- und Berechnungsunsicherheit ist ein dem Mess- oder Berechnungsergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Mess- oder Berechnungsgröße kennzeichnet. Für eine detaillierte Erläuterung siehe Teil 2 Anhang 4.

4.29 Mittelung, definierte räumliche

Als definierte räumliche Mittelung nach dem Stand der Technik (z. B. in Anmerkung 3 zu Teil 2 Anhang 1 Tabellen A1.13 und A1.14) wird ein Mittelungsverfahren auf Basis eines definierten Flächenelements verstanden. Größe und Form werden in TREMF NF Teil 2 Abschnitt 4.1.2 Absatz 3 beschrieben. Eine räumliche Mittelung über das gesamte vom Körper des Beschäftigten

eingenommene Raumvolumen oder den gesamten vom Beschäftigten eingenommenen Arbeitsbereich ist nicht zulässig, wenn hierdurch eine Unterbewertung räumlicher Maxima in inhomogenen Feldern möglich ist.

4.30 Nahfeld

Im Nahfeld besteht kein fester phasen- und betragsmäßiger Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke **E** und magnetischer Feldstärke **H**. Beide Komponenten müssen getrennt voneinander ermittelt werden (Unterschied zum Fernfeld siehe Abschnitt 4.17).

4.31 Nichtthermische Wirkungen

Nichtthermische Wirkungen oder Stimulationswirkungen sind Stimulationen von Muskeln, Nerven oder Sinnesorganen (siehe Abschnitt 4.6 Nummer 2).

4.32 Niederfrequenzbereich

Im Niederfrequenzbereich werden EMF mit Frequenzen von $0 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ zusammengefasst (siehe Abbildung 4.2).

Hinweis: Zu diesem Frequenzbereich gehört auch der Übergangsbereich (siehe Abschnitt 4.44).

4.33 Potentialausgleich

Der Potentialausgleich dient der Minimierung der Differenz zwischen unterschiedlichen elektrischen Potentialen und wird mittels elektrischer Verbindung zwischen (leitfähigen) Objekten hergestellt.

4.34 Projektilwirkung

Unter Projektilwirkung wird die Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf ferro- und paramagnetische Gegenstände außerhalb des menschlichen Körpers verstanden (indirekte Wirkung). Im statischen magnetischen Feld einer EMF-Quelle kann es bei Objekten mit ferromagnetischen Inhaltsstoffen (Eisen, Nickel, Kobalt) oder paramagnetischen Eigenschaften nach Überwindung der Reibungskraft zu einer Beschleunigung in Richtung des stärkeren Feldes kommen. Es treten neben der Translationsbewegung (Wirkung der anziehenden Kraft) auch Drehbewegungen zur Ausrichtung der magnetischen Achse des Objektes entlang der Feldlinien auf (Wirkung eines Drehmoments).

Hinweis: Wenn ein Werkstück Quelle eines statischen magnetischen Feldes ist, so ist es ebenfalls als EMF-Quelle zu werten.

4.35 Reizwirkungen

Reizwirkungen sind gleichbedeutend mit Stimulationswirkungen und werden im Rahmen der nichtthermischen Wirkungen betrachtet (siehe Abschnitt 4.6 Nummer 2).

4.36 Spitzenwert, zeitlicher

Im Sinne der TREMF betragsmäßig größter Wert einer zeitabhängigen physikalischen Größe (z. B. Feld- oder Stromstärke) innerhalb eines zeitlich begrenzten Beobachtungsintervalls.

4.37 Statische Felder

- (1) Als statische Felder werden EMF mit einer Frequenz von $f = 0$ Hz bezeichnet (siehe Abbildung 4.2).
- (2) Für die Bewertung der physiologischen Wirkung auf Beschäftigte, die sich in einem statischen Magnetfeld bewegen, wird eine Ersatzfrequenz von ca. 10 Hz angenommen. Man spricht von einem quasistatischen Feld.

4.38 Stand der Technik

- (1) Der Stand der Technik nach § 2 Absatz 9 EMFV ist der aktuelle Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten gesichert erscheinen lässt.
- (2) Bei der Bestimmung des Standes der Technik in Anlehnung an § 2 Absatz 9 EMFV sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind. Gleiches gilt für die Anforderungen an die Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene.

Hinweis: Für weitere Informationen zur Ermittlung des Standes der Technik wird auf Abschnitt 3.2 EmpfBS 1114 verwiesen.

4.39 STOP-Prinzip

Mit dem STOP-Prinzip werden die Maßnahmen für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit hierarchisch geordnet:

1. Vermeidung oder Minimierung von Gefährdungen durch EMF an Arbeitsplätzen durch andere geeignete Arbeitsverfahren, Arbeitsmittel oder Anlagen (Substitutionsprüfung),
2. Technische Maßnahmen (z. B. Einhausung, Abschirmung, Interlocks),
3. Organisatorische Maßnahmen (z. B. Zutrittsbeschränkungen),
4. Personenbezogene Maßnahmen (z. B. Persönliche Schutzausrüstung (PSA) oder verhaltensbasierte Maßnahmen).

Hinweis 1: Grundsätzlich ist es zweckmäßig, den Stand der Technik zur Vermeidung von Gefährdungen bereits bei der Einrichtung der Arbeitsstätte bzw. von Arbeitsplätzen zu berücksichtigen, siehe Teil 3 Abschnitt 10.

Hinweis 2: Zur Zeit der Drucklegung und Veröffentlichung dieser TREMF war am Markt keine PSA zum Schutz vor Gefährdungen durch EMF verfügbar.

4.40 Streufeld von Anlagen mit hohem statischen Magnetfeld ($B > 100$ mT)

Das Streufeld von Anlagen mit einem hohen statischen Magnetfeld ($B > 100$ mT) ist im Sinne der EMFV ein magnetisches Kraftlinienfeld in der Umgebung eines statischen Magneten, das außerhalb der Anlage (Feldquelle) auftritt und möglicherweise zu einer Projektilwirkung führt.

4.41 Tatsächliche und mögliche Gefährdungen

- (1) Tatsächliche Gefährdungen nach § 1 Absatz 1 EMFV liegen vor, wenn bei beruflicher Exposition durch EMF EGW überschritten sind oder ein sicheres Arbeiten nicht möglich ist, z. B. aufgrund indirekter Wirkungen.
- (2) Mögliche Gefährdungen nach § 1 Absatz 1 EMFV liegen vor, wenn bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz die EGW überschritten werden können oder nicht ausgeschlossen werden kann, dass aufgrund der EMF am Arbeitsplatz Beschäftigte gefährdet werden können.

4.42 Thermische Wirkungen

Thermische Wirkungen sind gleichbedeutend mit Wärmewirkungen (siehe Abschnitt 4.6 Nummer 1).

4.43 Thermoregulation

Thermoregulation umfasst Vorgänge im menschlichen Körper zur Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur von ca. 37 °C unabhängig von der Umgebung. Die Thermoregulation erfolgt einerseits durch Wärmebildung, z. B. Erhöhung der Durchblutung, oder andererseits durch Wärmeabgabe, z. B. Schweißbildung.

Die Thermoregulation kann z. B. durch Medikamenteneinnahme eingeschränkt sein oder aufgrund von Umweltbedingungen (Lufttemperatur/-feuchte) in ihrer Wirkung vermindert sein.

4.44 Übergangsbereich

Im Übergangsbereich werden EMF mit Frequenzen von $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ zusammengefasst (siehe Abbildung 4.2). Dieser Frequenzbereich gehört sowohl zum Niederfrequenzbereich (siehe Abschnitt 4.32) als auch zum Hochfrequenzbereich (siehe Abschnitt 4.19). Als physiologische Wirkungen sind im Übergangsbereich sowohl Reizwirkungen als auch Wärmewirkungen bekannt, d. h., im Übergangsbereich müssen die EGW für thermische und nichtthermische Wirkungen gleichzeitig eingehalten werden.

4.45 Verfahren zur Bewertung im Zeitbereich

- (1) Als Verfahren zur Bewertung im Zeitbereich nach dem Stand der Technik können z. B. die Methode der gewichteten Spitzenwerte (weighted peak method time domain, WPM-z) und die Zeitbereichs-Bewertungsmethode (ZBM) verwendet werden. Beides sind Verfahren zur Bewertung beliebiger nicht sinusförmiger Signalformen, auch als gepulste Felder bezeichnet, im Zeitbereich. Sie werden für die Beurteilung von nichtthermischen Wirkungen für Frequenzen von $0 < f \leq 10 \text{ MHz}$ angewendet.
- (2) Die WPM-z berücksichtigt die Amplituden und die relative Phasenlage der verschiedenen Frequenzkomponenten.
- (3) Die ZBM ermöglicht eine Bewertung durch Annäherung des zeitlichen Verlaufs eines Signals an sinus-, trapez-, dreieckförmige oder exponentielle Verläufe.

4.46 Wärmewirkungen

Wärmewirkungen sind gleichbedeutend mit thermischen Wirkungen (siehe Abschnitt 4.6 Nummer 1).

4.47 Wesentliche Änderungen der Tätigkeit oder des Arbeitsplatzes

Wesentliche Änderungen der Tätigkeit oder des Arbeitsplatzes sind gleichbedeutend mit maßgeblichen Veränderungen der Arbeitsbedingungen (siehe Abschnitt 4.25).

4.48 Zündvorrichtungen, elektrische (Detonatoren)

Im Sinne der TREMF Zündanlagen, die durch EMF beeinflusst werden können. Zündanlagen umfassen nach Nummer 2.23 SprengTR 310 alle Komponenten, die zur planmäßigen Zündung von Sprengungen erforderlich sind (z. B. Zünder, Zündgeräte, Verzögerer).

Hinweis: Für weitere Informationen siehe SprengG, GefStoffV und SprengTR 310.

5 Physikalische Größen

5.1 Berührungsspannung U

Die Berührungsspannung U ist im Sinne dieser TREMF eine durch EMF induzierte oder beeinflusste Spannung zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese von einem Menschen berührt werden können. Sie wird angegeben in Volt (V).

5.2 Elektrische Feldstärke E (externe E_e, interne E_i)

- (1) Die elektrische Feldstärke E ist eine Vektorgröße, welche die Fähigkeit beschreibt, eine Kraft auf ein geladenes Teilchen ungeachtet seiner Bewegung im Raum auszuüben. Sie wird angegeben in Volt pro Meter (V/m).
- (2) Es wird zwischen der externen elektrischen Feldstärke E_e eines in der Umgebung auftretenden elektrischen Feldes und der internen elektrischen Feldstärke E_i, wie sie im Körper (in situ, Gewebefeldstärke) infolge einer Exposition gegenüber der Umgebungsfeldstärke auftritt, unterschieden. Es gilt:

$$E_i = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot 2\pi \cdot f}{\kappa} \cdot E_e$$

Gl. 5.1

mit

k Feldverzerrungsfaktor,

ϵ_0 Dielektrizitätskonstante (im Vakuum), mit $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$,

f Frequenz des Feldes in Hertz (Hz) und

κ mittlere elektrische Leitfähigkeit der/des Körpergewebe(s)
in Siemens pro Meter (S/m).

5.3 Elektrische Ladung Q

Die elektrische Ladung Q ist die physikalische Größe, die zur Beschreibung von transienten Kontaktströmen verwendet und in Coulomb (C) angegeben wird.

5.4 Entladungspuls

Der Entladungspuls beschreibt den transienten, zeitabhängigen Energieübergang in Form eines Kontaktstroms I_K .

5.5 Entladungsenergie W

Die Entladungsenergie W ist die bei einem Entladungspuls eines Kontaktstroms I_K übertragene Energie. Sie wird in Joule (J) angegeben.

5.6 Kontaktstrom I_K

- (1) Der Kontaktstrom I_K bezeichnet einen Strom, der beim Kontakt zwischen einem Beschäftigten und einem Gegenstand in einem EMF fließt. Er wird in Ampere (A) angegeben. Der Kontaktstrom I_K entsteht hierbei nicht aufgrund galvanischer Kopplung mit stromführenden Leitern oder unter Spannung stehender Teile. Er wird hervorgerufen aufgrund der Ableitung des externen EMF durch den Beschäftigten bzw. durch im EMF befindliche Gegenstände (induktive oder kapazitive Kopplung).
- (2) Beim Kontakt kann es zu einem transienten (vorübergehenden) oder einem stationären (dauerhaften) Kontaktstrom kommen.

5.7 Körperstrom I

Der Körperstrom I ist im Sinne dieser TREMF ein durch den Körper fließender Strom, der durch zeitveränderliche magnetische (Induktion) oder elektrische Felder (kapazitive Einkopplung, Influenz) hervorgerufen wird. Er wird in Ampere (A) angegeben.

5.8 Leistungsdichte S und S_{eq}

- (1) Die Leistungsdichte S nach Anhang 1 EMFV ist der Betrag des Kreuzprodukts der elektrischen Feldstärke E (V/m) und magnetischen Feldstärke H (A/m). Sie wird angegeben in Watt pro Quadratmeter (W/m²).
- (2) Die Leistungsdichte S_{eq} ist die über die Impulsbreite gemittelte Leistungsdichte.

5.9 Magnetische Feldstärke H

Die magnetische Feldstärke H ist eine Vektorgröße, die neben der magnetischen Flussdichte B zur Beschreibung des magnetischen Feldes in jedem Raumpunkt dient. Sie wird angegeben in Ampere pro Meter (A/m).

Hinweis: Die magnetische Flussdichte B und die magnetische Feldstärke H stehen gemäß Gleichung 5.2 im Zusammenhang:

$$H = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot B \quad \text{Gl. 5.2}$$

mit

μ_0 magnetische Feldkonstante, mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}\cdot\text{m}}$ und

μ_r Permeabilitätszahl (für Luft, Wasser, biologisches Gewebe $\mu_r \approx 1$)

5.10 Magnetische Flussdichte B

Die magnetische Flussdichte B ist eine Vektorgröße, aus der sich eine Kraft auf bewegte Ladungen ergibt. Sie wird in Tesla (T) angegeben (siehe Hinweis unter Abschnitt 5.9).

5.11 Spezifische Absorptionsrate SAR, lokale und Ganzkörper-SAR

- (1) Die spezifische Absorptionsrate SAR ist nach Anhang 1 EMFV die über den ganzen Körper oder Teile gemittelte Rate, mit der Leistung je Masseneinheit des Körpergewebes absorbiert wird. Sie wird in Watt pro Kilogramm (W/kg) angegeben.
- (2) Die Ganzkörper-SAR ist die physikalische Größe, um Wärmewirkungen zu einer Exposition von EMF in Beziehung zu setzen. Neben der Ganzkörper-SAR sind lokale SAR-Werte notwendig, um übermäßige Energiekonzentrationen in kleinen Körperbereichen infolge lokaler Exposition zu bewerten und zu begrenzen.

5.12 Spezifische Absorption SA

Die spezifische Absorption SA ist nach Anhang 1 EMFV die je Masseneinheit biologischen Gewebes absorbierte Energie. Sie wird angegeben in Joule pro Kilogramm (J/kg). In der EMFV wird sie zur Festlegung von Grenzen für Wirkungen gepulster elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich von $0,3 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$ (z. B. Mikrowellenhören) benutzt.

5.13 Strom durch die Gliedmaßen I_G

Wenn Beschäftigte EMF im Frequenzbereich von $10 \text{ MHz} \leq f \leq 110 \text{ MHz}$ ausgesetzt sind und mit einem Gegenstand in diesem EMF in Kontakt kommen, so besteht die Möglichkeit, dass ein Strom I_G durch die Gliedmaßen fließt. Solch ein Strom I_G kann auch kapazitiv in den Körper eingekoppelt werden. Er wird in Ampere (A) angegeben.

6 Schutzkonzept – Expositionsgrenzwerte und Auslöseschwellen

Dieser Abschnitt beschreibt das der EMFV zugrundeliegende Schutzkonzept aus Expositionsgrenzwerten (EGW) und Auslöseschwellen (ALS) und damit verknüpften Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Gefährdungen von Beschäftigten durch elektromagnetische Felder.

Zum Schutz der Beschäftigten vor EMF wird in der EMFV ein mehrstufiges Schutzkonzept eingeführt. Es umfasst EGW und ALS (siehe Abbildung 6.1).

EGW sind maximal zulässige Werte und beziehen sich auf die Wirkungen von EMF auf den Körper. EGW liegen aufgrund der Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren unterhalb der Schwellen für nachgewiesene sensorische oder gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen. Die Einhaltung der EGW ist in der Regel nicht direkt am Arbeitsplatz nachweisbar und lässt sich nur durch aufwändige Messungen an Körperphantomen oder Modellrechnungen nachweisen.

Um die Gefährdungen am Arbeitsplatz anhand messbarer physikalischer Größen zu bewerten, werden aus den EGW ALS konservativ abgeleitet. Das heißt, werden die ALS eingehalten, so werden die EGW auch bei ungünstigsten Expositionsbedingungen nicht überschritten. Um die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung zu vereinfachen, wurden mit dem Schutzkonzept obere und untere ALS für direkte nichtthermische Wirkungen eingeführt (siehe Abbildung 6.1). Mit

Einhaltung der unteren ALS werden direkte und indirekte Wirkungen von EMF, außer auf Implantate, ausgeschlossen. Im Frequenzbereich, in dem thermische Wirkungen auftreten, wird nur eine ALS verwendet.

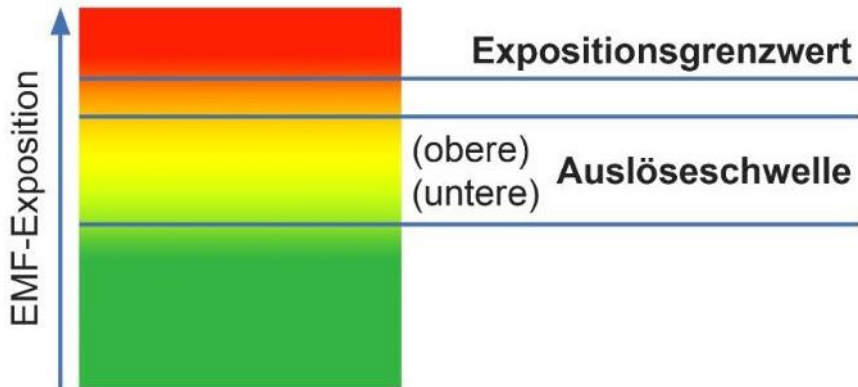


Abb. 6.1 Allgemeine Übersicht über das Schutzkonzept der EMFV (überwiegende Zahl der Arbeitsplätze mit Expositionen gegenüber EMF liegt unterhalb der unteren Auslöseschwelle)

Mittels EGW und ALS wird der Schutz vor direkten Wirkungen (nichtthermischen und thermischen Wirkungen) und indirekten Wirkungen (z. B. Kontaktströmen) gewährleistet. Nach dem gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisstand sind Beschäftigte bei Einhaltung der Festlegungen der EMFV vor den gesundheitsschädlichen Wirkungen von EMF geschützt.

7 Expositionszonenkonzept

- (1) Zur vereinfachten Anwendung in der betrieblichen Praxis können aus den Anforderungen der EMFV Bereiche zum Schutz der Beschäftigten abgeleitet werden. Diese Bereiche werden als Expositionszonen bezeichnet. Expositionszonen stellen eine Handlungshilfe zur Umsetzung des Schutzkonzepts der EMFV dar. Mittels Expositionszonen wird der Bezug zwischen der Höhe der EMF-Exposition und der möglichen Wirkung auf die Beschäftigten (siehe Anhang 1), den einzuhaltenden ALS und den erforderlichen Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten (siehe Teil 3) hergestellt. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der ALS sind manche Expositionszonen nur in bestimmten Frequenzbereichen vorhanden (siehe Abbildung 7.1 für elektrische Felder und Abbildung 7.2 für magnetische Felder). Die in den einzelnen Expositionszonen durchzuführenden Maßnahmen bauen aufeinander auf. Das Expositionszonenkonzept gilt nur für direkte Wirkungen von EMF und Wirkungen auf Implantate im Sinne des Forschungsberichts FB 451. Andere indirekte Wirkungen werden nicht berücksichtigt.

Hinweis 1: Technische Normen und weitere Veröffentlichungen enthalten möglicherweise auf anderen Rechtsnormen basierende Zonenbezeichnungen oder Zonenkonzepte, wie z. B. bei der Anwendung von Magnetresonananzverfahren oder Zonen explosionsgefährdeter Bereiche.

Hinweis 2: Wird das Expositionszonenkonzept auf die Bewertung nichtthermischer Wirkungen von magnetischen Feldern im Frequenzbereich mit $20 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ angewendet, können die abgeleiteten Maßnahmen ggf. nicht verhältnismäßig sein. In diesem Fall wird empfohlen, eine fachkundige Bewertung gegen die oberen ALS bzw. ALS für die Exposition von Gliedmaßen durchzuführen.

- (2) Die folgenden Unterabschnitte geben eine allgemeine Übersicht über die Expositionszonen. Die detaillierte Beschreibung der Expositionszonen und der Gefahrenzone erfolgt in Teil 1 Abschnitt 4.
- (3) Insgesamt sind vier Expositionszonen sowie die Gefahrenzone vorgesehen. Hierbei hat Expositionszone 0 die geringste Exposition. Die Grundlage für die Ableitung der Expositionszonen bilden die ALS der EMFV. Die Bewertung der Sicherheit von besonders schutzbedürftigen Beschäftigten, insbesondere der möglichen Gefährdungen für Implantatträger, erfolgt nach Teil 2 Anhang 1 Abschnitt A1.7.
- (4) Das Expositionszonenkonzept kann auch auf Dritte, wie Beschäftigte von Fremdfirmen oder die Allgemeinbevölkerung (z. B. Besucher), angewendet werden. Hierbei sind z. B. die Regelungen der 26. BImSchV oder zur Geräte- und Anlagensicherheit auf Anwendbarkeit zu prüfen und ggf. anzuwenden (siehe Hinweise in Abschnitt 7.1).
- (5) Werden alternativ EGW zur Bewertung der Exposition herangezogen oder EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe bewertet, ist die hier vorgestellte vereinfachte Herangehensweise nicht anwendbar. Für die Bewertung:
 1. der Exposition mittels EGW siehe Teil 1 Abschnitt 6.5 und Teil 2 Abschnitt 9,
 2. von EMF-Quellen mit nicht konstanter Leistungsabgabe siehe Teil 2 Abschnitt 8 sowie Teil 2 Anhang 2 Abschnitt A2.2.

Hinweis: Im Frequenzbereich von $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ ist eine Bewertung von nicht thermischen Wirkungen nach TREMF NF und von thermischen Wirkungen nach dieser Technischen Regel zu prüfen und ggf. durchzuführen.

7.1 Expositionszone 0

Die zu bewertende Exposition liegt in Abhängigkeit von der Frequenz unterhalb der Schwellenwerte nach Teil 2 Anhang 1 Abschnitt A1.7 zur Gewährleistung der Sicherheit von Beschäftigten mit Implantaten im Sinne des Forschungsberichts FB 451 und der unteren ALS¹ bzw. der ALS für thermische Wirkungen². Bei Einhaltung dieser Schwellen liegt eine vergleichsweise geringe Exposition vor. In der Expositionszone 0 sind weder für Beschäftigte mit Implantaten gemäß Forschungsbericht FB 451 noch für besonders schutzbedürftige Beschäftigte technische Schutzmaßnahmen erforderlich. Die Pflicht zur Unterweisung nach § 19 EMFV bleibt hiervon unberührt.

Hinweis 1: Muss der Arbeitgeber aus betrieblichen Gründen (siehe Abschnitt 3.1) z. B. die Grenzwerte nach Anhängen 1 bis 3 26. BImSchV oder nach Anhängen 2 und 3 EU- Ratsempfehlung zu EMF 1999/519/EG einhalten, so kann er die Expositionszone 0 um eine Unter-Expositionszone erweitern, z. B. Expositionszone 0Allgemeinbevölkerung.

Hinweis 2: Die verschiedenen Bewertungsgrundlagen (Schwellenwerte, verschiedene ALS) für Expositionszone 0 sind in Abbildung 7.1 (für elektrische Felder) und Abbildung 7.2 (für magnetische Felder) durch unterschiedliche Linienarten gekennzeichnet (siehe korrespondierende Legenden).

1 Elektrische Felder: Schnittpunkt von Schwellenwert nach Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.25 und unterer ALS nach Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.13 bei $f \approx 1,253 \text{ kHz}$

2 Magnetische Felder: Schnittpunkt von Schwellenwert nach Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.26 und ALS für thermische Wirkungen nach Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.21 bei $f \approx 138,095 \text{ kHz}$

Hinweis 3: Andere indirekte Gefährdungen durch EMF und andere Gefährdungsfaktoren, mit Ausnahme der Beeinflussung von Implantaten gemäß Forschungsbericht FB 451, werden im Expositionszonenkonzept nicht berücksichtigt und müssen gesondert betrachtet werden, z. B. Brand und Explosion durch elektrischen Überschlag.

7.2 Expositionszone 1

- (1) Werden die Schwellenwerte nach Teil 2 Anhang 1 Tabellen A1.25 und A1.26 sowie die uALS (untere Auslöseschwelle) für statische Magnetfelder nach Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.16 überschritten, aber die ALS nach Teil 2 Anhang 1 Tabellen A1.13 und A1.14 eingehalten, wird der Bereich in Abhängigkeit von der Frequenz der Expositionszone 1 zugeordnet. Möglicherweise beeinflusst die zu erwartende Exposition Implantate im Sinne des Forschungsberichts FB 451 unzulässig, weswegen Schutzmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Im Fokus der Schutzmaßnahmen stehen besonders schutzbedürftige Beschäftigte, insbesondere Träger von aktiven Implantaten im Sinne des Forschungsberichts FB 451. Eine individuelle Bewertung der Störbeeinflussung aktiver Implantate kann erforderlich sein (siehe Teil 1 Abschnitt 6.9 sowie § 9 EMFV).
- (2) Treten elektrische Felder auf, werden zudem die Gefährdungen durch Entladungen und Kontaktströme berücksichtigt.
- (3) Bei statischen magnetischen Feldern mit $B > 100 \text{ mT}$ werden die Gefährdungen durch Projektilwirkung bewertet (siehe Teil 2 Anhang 1 Tabelle A1.17).

7.3 Expositionszone 2 (nur für sensorische Wirkungen)

Bereiche werden in Abhängigkeit von der Frequenz als Expositionszone 2 klassifiziert, wenn die untere ALS überschritten, aber die obere ALS bzw. die ALS für thermische Wirkungen eingehalten wird. Im Vordergrund stehen Schutzmaßnahmen, um sensorische Wirkungen (siehe Abschnitt 4.14.2) zu vermeiden. Maßnahmen zum Schutz sind für alle Beschäftigten durchzuführen und bauen auf denen der Expositionszone 1 auf. Das heißt, es sind zusätzlich zu den Schutzmaßnahmen aus Expositionszone 1 weitere Schutzmaßnahmen aufgrund der Überschreitung der unteren ALS durchzuführen.

7.4 Expositionszone 3 (nur für nichtthermische Wirkungen)

Die Expositionszone 3 tritt nur bei niederfrequenten magnetischen Feldern auf. Bei Überschreitung der oberen ALS und Einhaltung der ALS für die Exposition von Gliedmaßen wird der Bereich als Expositionszone 3 klassifiziert. Sie gilt nur für die lokale Exposition von Gliedmaßen.

Im Vordergrund stehen hier Maßnahmen, um die Exposition auf die Gliedmaßen zu beschränken. Die durchzuführenden Maßnahmen zum Schutz aller Beschäftigten bauen auf denen der Expositionszone 2 auf.

7.5 Gefahrenzone

Wird das Expositionszonenkonzept angewendet und lässt sich die Exposition nicht den Expositionszonen 0 bis 3 zuordnen, stellt dies eine nach dem Expositionszonenkonzept unzulässige Exposition dar. Aufgrund der zu erwartenden Expositionshöhe ist der Aufenthalt von Beschäftigten (Ganzkörper oder Gliedmaßen) in diesen Bereichen nach diesem Zonenkonzept nicht zulässig.

Hinweis: Der Aufenthalt von Beschäftigten in der Gefahrenzone ist möglicherweise zulässig, wenn ein Nachweis der Einhaltung der EGW für gesundheitliche Wirkungen (siehe Teil 1 Abschnitt 6.5) erbracht wurde.

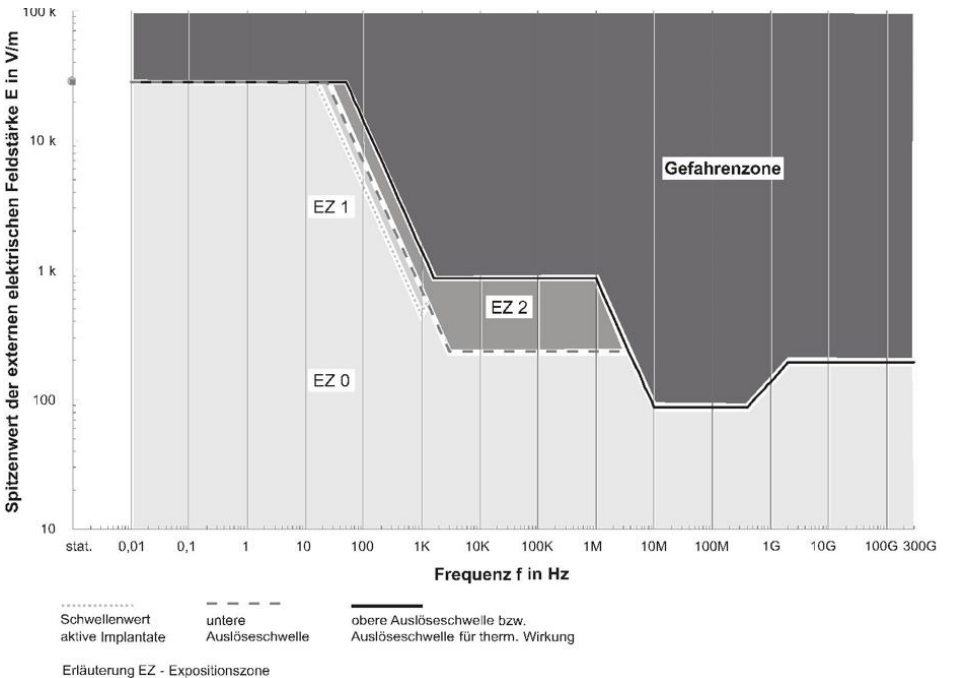


Abb. 7.1 Expositionszonen für elektrische Felder (beispielhafte Abbildung gilt nur für direkte Wirkungen und für EMF mit rein sinusförmigen Zeitverläufen)

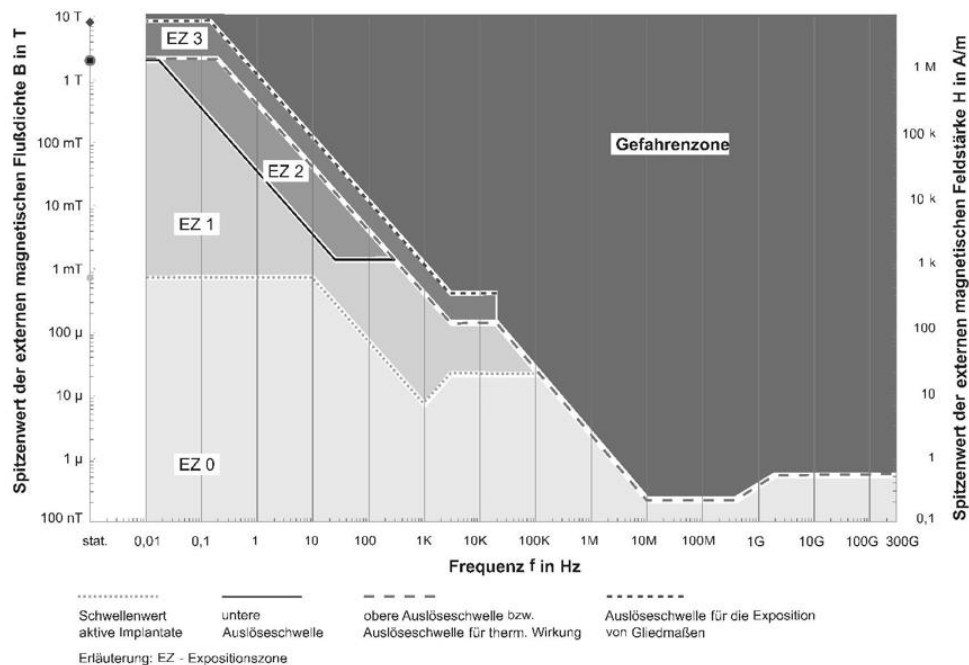


Abb. 7.2 Expositionszonen für magnetische Felder (beispielhafte Abbildung gilt nur für direkte Wirkungen und für EMF mit rein sinusförmigen Zeitverläufen)

8 Literaturhinweise

8.1 Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln

Europäisches Regelwerk

- | | |
|-------------|---|
| 1999/519/EG | Empfehlung des Rates zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz–300 GHz) |
| 2013/35/EU | Richtlinie 2013/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (20. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) und zur Aufhebung der Richtlinie 2004/40/EG |

Nationales Regelwerk

- | | |
|----------|---|
| ArbSchG | Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) |
| JArbSchG | Gesetz zum Schutze der arbeitenden Jugend (Jugendarbeitsschutzgesetz – JArbSchG) |

SprengG	Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz –SprengG)
26. BImSchV	Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV)
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)
GefStoffV	Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV)
SprengTR 310	Technische Regel zum Sprengstoffrecht – Sprengarbeiten (SprengTR 310 – Sprengarbeiten)
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

8.2 DGUV-Publikationen

DGUV-I 203-038	DGUV Information 203-038 „Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen“ von Oktober 2006
----------------	---

8.3 Forschungsberichte

FB 400	Forschungsbericht „Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz“, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, November 2011
FB 451	Forschungsbericht „Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz – Sicherheit von Beschäftigten mit aktiven und passiven Körperhilfsmitteln bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern“, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Februar 2015

8.4 Sonstiges

EmpfBS 1114	Empfehlungen zur Betriebssicherheit „Anpassung an den Stand der Technik bei der Verwendung von Arbeitsmitteln“ des Ausschusses für Betriebssicherheit
Lapicque 1926	„L'excitabilité en fonction du temps: La chronaxie, sa signification et sa mesure“, Les presses universitaires de France, ASIN: B01MS4E0MG (Lapicque'sches Gesetz/Weiss'sche Gleichung)

Anhang: Direkte und indirekte Wirkungen elektromagnetischer Felder

A1 Einleitung

Die Wirkungen von EMF auf den Menschen sind abhängig von der Frequenz und der Feldstärke sowie der zeitlichen Änderung der Feldstärke. Hinzu kommen individuelle Faktoren wie Körpergröße, Wassergehalt und Blutversorgung des Körpergewebes sowie physikalische Randbedingungen wie Dauer der Einwirkung, räumliche Ausdehnung der Felder, Abstand von der Feldquelle, Orientierung des Körpers zum Feld, Dielektrizitätskonstanten, Erdung und Feuchtigkeit von Haut und Kleidung.

EMF gehören zur nichtionisierenden Strahlung, das bedeutet, dass ihre Energie nicht groß genug ist, um Materie zu ionisieren.

Im Frequenzbereich der EMFV hat der Mensch keine Sinnesorgane für elektromagnetische Felder, sondern kann nur die Auswirkungen wahrnehmen (z. B. Reize oder Erwärmung).

Nicht jede biologische Wirkung von EMF führt auch zu einer Gefährdung. In der EMFV werden bekannte, nachgewiesene und gut erforschte direkte biophysikalische Kurzzeitwirkungen mit anerkannten Mechanismen sowie indirekte Auswirkungen durch EMF berücksichtigt, vgl. auch EMF-Richtlinie 2013/35/EU über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass mögliche Langzeitwirkungen von EMF wie die Bildung von Karzinomen nicht nachgewiesen sind – es ist auch kein Wirkungsmechanismus bekannt. Deshalb sind Langzeitwirkungen nicht Gegenstand der EMFV (und der zugrundeliegenden EMF-Richtlinie 2013/35/EU).

Eine wesentliche Ursache für biologische Wirkungen von EMF ist, dass im menschlichen Körper elektrisch geladene Teilchen existieren. Auch ohne äußere Felder sind bereits natürliche schwache Körperströme vorhanden. So werden Nervenreize als Impulse elektrisch übertragen und können z. B. mittels eines Elektroenzephalogramms (EEG) dargestellt werden. Alle Muskelbewegungen, auch die des Herzmuskels, werden durch elektrische Signale gesteuert.

Diese sind mittels Elektromyogramms (EMG) oder Elektrokardiogramms (EKG) erfassbar. Der menschliche Körper ist u. a. wegen seines hohen Wasser- und Elektrolytanteils ein relativ guter elektrischer Leiter.

In der EMFV wird zwischen direkten und indirekten Wirkungen unterschieden. Dabei gelten direkte Wirkungen als Einflüsse, die als unmittelbare Wirkung im menschlichen Körper infolge der Exposition in einem elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feld auftreten (Stimulation von Muskeln, Nerven, Sinnesorganen, Gewebeerwärmung) (siehe Abschnitt 4.6).

Demgegenüber werden Wechselwirkungen zwischen EMF und Objekten, die nicht Teil des menschlichen Körpergewebes sind, als indirekte Wirkungen bezeichnet (wie Projektilwirkung, Störungen von Implantaten) (siehe Abschnitt 4.20).

Nachgewiesene Wirkungen von EMF auf den Menschen, die bis hin zu gesundheitliche Auswirkungen führen können, sind in der folgenden Auflistung kurz zusammengefasst:

1. Kraftwirkungen von statischen Feldern ($f = 0 \text{ Hz}$),
2. Kurzzeitwirkungen wie Reizwirkungen auf Sinnesorgane,
3. Reizwirkungen statischer und niederfrequenter Felder ($0 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$) auf Nerven und Muskeln (nichtthermische Wirkungen) und

4. Wirkungen hochfrequenter Felder ($100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$) durch Absorption der Strahlungsleistung im Körpergewebe (thermische Wirkungen).

Im Übergangsbereich ($100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$) zwischen Nieder- und Hochfrequenzbereich gehen nichtthermische (Reiz-)Wirkungen in thermische Wirkungen über (siehe Abschnitt 4.42).

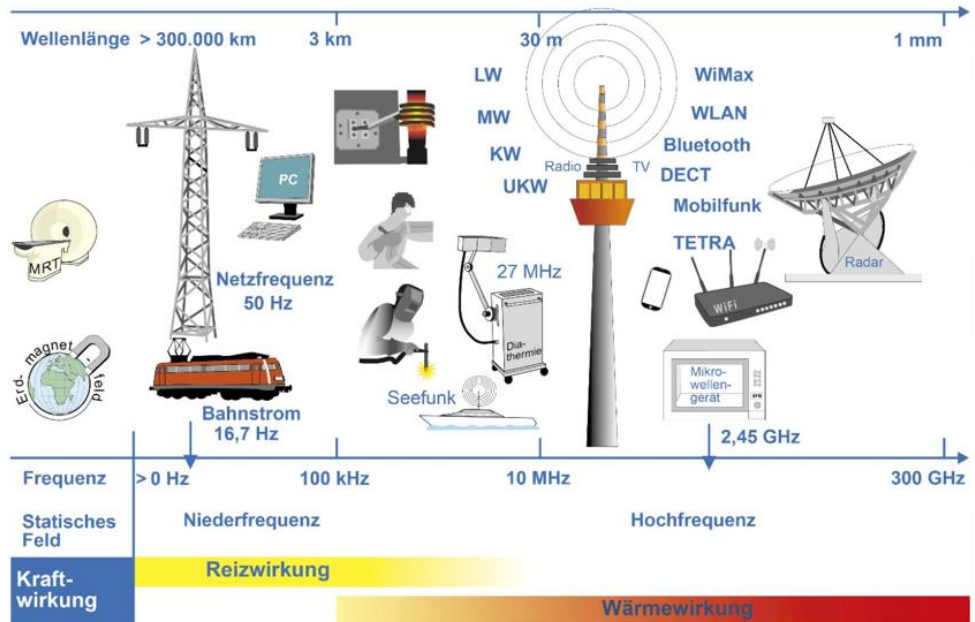


Abb. A1 Exemplarische Darstellung der Wellenlängen, Frequenzen, Anwendungen und Wirkungen elektromagnetischer Felder von 0 Hz bis 300 GHz

Abbildung A1 zeigt den Frequenzbereich der EMFV, Beispiele der vielfältigen Nutzung von EMF und die unterschiedlichen Wirkungen auf den Menschen im Bereich statischer, niederfrequenter und hochfrequenter Felder. Die Wirkungen sind im unteren Teil der Abbildung als farbige Streifen in Abhängigkeit von der Feldfrequenz dargestellt.

Im unteren Teil der Grafik kennzeichnet die Farbüberlagerung der Streifen im Übergang vom Nieder- zum Hochfrequenzbereich (Übergangsbereich, von gelb zu rot) die Überlappung der beiden typischen Wirkungen: die nichtthermischen (Kraft- und Reiz-)Wirkungen (siehe Abschnitt A4.3) nehmen im Niederfrequenzbereich mit höheren Frequenzen ab, die thermischen (Wärme-) Wirkungen (siehe Abschnitt A6.1) nehmen zu und sind schließlich im Hochfrequenzbereich für die Wirkung entscheidend.

A2 Übersicht zu direkten Wirkungen

Direkte Wirkungen sind thermische und nichtthermische Wirkungen. Auf Basis wissenschaftlicher Untersuchungen wurden fundierte und bestätigte Schwellenwerte ermittelt. Unterhalb dieser Schwellenwerte treten gemäß dem derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand keine Gesundheitsgefährdungen auf. Dies gilt auch bei wiederholten Expositionen unterhalb der Schwellenwerte. Diese Schwellenwerte sind nicht zu verwechseln mit den in der EMFV definierten, deutlich niedrigeren Auslöseschwellen.

Beim Schutz vor direkten Wirkungen infolge einer EMF-Exposition wird zwischen sensorischen Wirkungen und gesundheitlichen Wirkungen unterschieden. Dabei werden die gesundheitlichen Wirkungen als schwerwiegender angesehen, weil sensorische Wirkungen durch EMF kurzzeitig auftreten und vorübergehend sind, d. h. bei langsamen Bewegungen im statischen Feld z. B. bei der Magnetresonanztomographie (MRT) bzw. durch Reduktion des verursachenden Feldes verschwinden. Abbildung A2 gibt einen Überblick über die biologischen Wirkungen, die bei Exposition gegenüber EMF auftreten können.

Direkte Wirkungen in statischen ($f = 0$ Hz) und quasistatischen Feldern ($f \leq 10$ Hz)

Nichtthermische Wirkungen auf Sinnes- und Nervenzellen:

- als metallischer Geschmack (maximale Empfindlichkeit bei $f < 1$ Hz)
- durch schnelle Bewegungen in statischen Feldern hervorgerufener Schwindel und/oder Übelkeit durch induzierte Körperströme (maximale Empfindlichkeit bei $0,1 \text{ Hz} \leq f \leq 2 \text{ Hz}$)

Direkte Wirkungen im Frequenzbereich $0 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ MHz}$

Nichtthermische Wirkungen auf Sinnesorgane, periphere Nerven und Muskeln:

- Magnetophosphene (Lichtblitze), als Wirkung auf die Netzhaut des Auges (maximale Empfindlichkeit bei $f \approx 20 \text{ Hz}$)
- Stimulation von peripheren Nerven und von Muskeln, Störung der autonomen Herzaktion sind nur in außerordentlich starken Feldern möglich, z. B. in statischen magnetischen Feldern mit $B > 8 \text{ T}$ (maximale Empfindlichkeit bei $f \approx 50 \text{ Hz}$)

Direkte Wirkungen im Frequenzbereich $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$

Nichtthermische Wirkungen auf das Sinnesorgan Ohr (als thermoelastischer Effekt):

- sehr selten unter bestimmten Bedingungen auftretende Wirkungen in Form von Mikrowellenhören mit Geräuschen wie Summen oder Klicken (Auftreten bei $0,3 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$, $T_{\text{Puls}} < 30 \mu\text{s}$)

Thermische Wirkungen als Erwärmung/Verbrennung tieferer Gewebeschichten (bei $100 \text{ kHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$)

- in Teilen des Körpers (z. B. des Auges, Kopfes oder der Gliedmaßen)
- des gesamten Körpers

Thermische Wirkungen als Erwärmung/Verbrennung der Körperoberfläche bzw. oberflächennaher Gewebeschichten (bei $6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$)

Direkte Wirkungen im Übergangsbereich zwischen $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$

Nichtthermische Wirkungen auf Nerven und Muskeln sowie thermische Wirkungen

Im Folgenden werden die biologischen Wirkungen, bezogen auf die Frequenzbereiche, näher erläutert (siehe auch FB 400).

A3 Direkte Wirkungen in statischen ($f = 0 \text{ Hz}$) und quasistatischen Feldern ($f \leq 10 \text{ Hz}$)

Statische elektrische Felder dringen kaum in das Körpergewebe ein. Deshalb sind sie in ihrer direkten Wirkung auf die Körperoberfläche, z. B. Bewegung von Körperhaaren, Elektrisierungen, Entladungen beschränkt. Das Körperinnere bleibt feldfrei.

Statische magnetische Felder können wegen ihrer Kraftwirkungen auf ferro- und diamagnetische Stoffe und bewegte geladene Teilchen im menschlichen Körper zu elektrischen Feldern im Körpergewebe führen (z. B. Auftreten von induktiver Beeinflussung bewegter Ladungen, Beschleunigungen, Drehmomente).

Bewegungen im statischen bzw. zeitliche Änderungen im statischen (quasistatischen) Magnetfeld induzieren niederfrequente elektrische Felder im Körpergewebe. In starken statischen Magnetfeldern (z. B. bei MRT) kann es durch Veränderungen der Ionengradienten und der Wirkungen induzierter Felder auf die Geschmackszellen im Mund zu einem metallischen Geschmack kommen. Als Wirkung auf das Gleichgewichtsorgan im Innenohr sind, vor allem bei (schnellen) Bewegungen, aber auch bei ruhigem Aufenthalt, Schwindelgefühle möglich. Auch Übelkeit kann auftreten. Diese Erscheinungen sind mit Feldern mit einer Frequenz von $f < 10 \text{ Hz}$ verbunden.

Sobald das verursachende Feld verlassen wird, klingen diese Wirkungen auf Sinnesorgane und Zentralnervensystem schnell ab. Es handelt sich somit um kurzzeitige reversible Wirkungen.

A4 Direkte Wirkungen im Frequenzbereich $0 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ MHz}$

Bei sensorischen Wirkungen handelt es sich um reversible Reizungen von Sinneszellen oder um geringfügige temporäre Veränderungen von Hirnfunktionen (Zentralnervensystem). Bei Magnetophosphenen (Wahrnehmung von Lichtblitzen) geht es um eine Wirkung auf die Netzhaut des Sinnesorgans Auge (Retina). Magnetophosphene können in starken niederfrequenten Magnetfeldern (mit $2 \text{ mT} \leq B \leq 10 \text{ mT}$) bei Frequenzen von $10 \text{ Hz} \leq f \leq 50 \text{ Hz}$ auftreten. Auch hier gilt, dass die Wirkung mit Verlassen des verursachenden Feldes innerhalb kurzer Zeit abklingt.

Zu direkten Wirkungen niederfrequenter Felder zählen auch Oberflächeneffekte auf der Haut bei starken elektrischen Feldern und die von elektrischen und magnetischen Feldern verursachten Wirkungen im Innern des Körpers, die im Folgenden beschrieben werden.

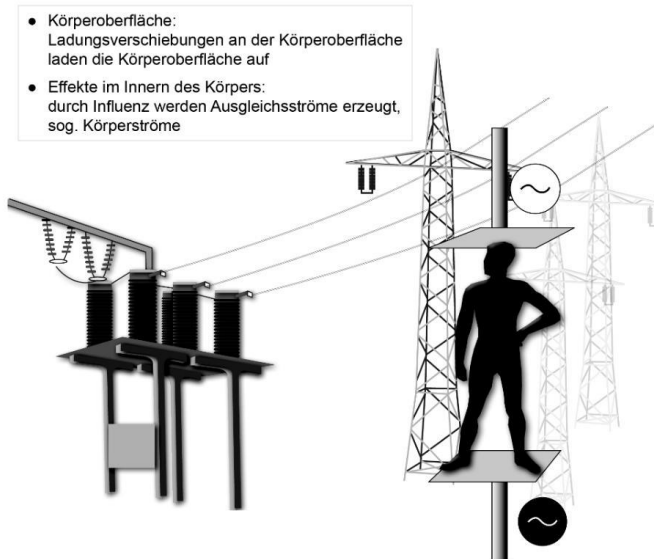
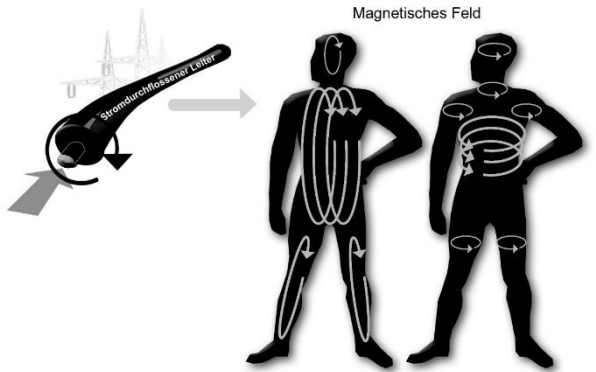


Abb. A3 Direkte Wirkung eines niederfrequenten elektrischen Feldes: Kapazitive Einkopplung eines Körperstromes als unmittelbare Feldwirkung

A4.1 Direkte Wirkungen in niederfrequenten elektrischen Feldern

Die kapazitive Einkopplung eines Körperstromes durch ein äußeres niederfrequentes elektrisches Feld tritt infolge von Aufladevorgängen auf, die mit der Feldfrequenz des einwirkenden Feldes wechseln. Im Innern des menschlichen Körpers entstehen durch Influenz Körperströme. Es kommt zu einem Stromfluss durch den Körper zur Erde (siehe Abbildung A3).

- Wirbelströme im Innern des Körpers durch magnetische Induktion



A4.2 Direkte Wirkungen in niederfrequenten magnetischen Feldern

Abb. A4 Direkte Wirkung eines niederfrequenten magnetischen Feldes: Induktive Einkopplung eines Körperstromes als unmittelbare Feldwirkung (links horizontales Magnetfeld, rechts vertikales Magnetfeld)

Niederfrequente Magnetfelder können das Körpergewebe ungehindert durchdringen. Die durch ein äußeres niederfrequentes Magnetfeld induzierten Ströme im Körpergewebe werden als Wirbelströme im menschlichen Körper bezeichnet. Die Wirbelströme im menschlichen Körper sind abhängig von der räumlichen Orientierung des Menschen in Bezug auf das wirksame äußere Magnetfeld. Durch die im menschlichen Körper induzierten Wirbelströme kann es zu Reizungen von Muskeln und Nerven und zu Wirkungen auf Sinnesorgane kommen (siehe Abbildung A4).

A4.3 Mechanismus der Reizwirkungen

Allgemein beruht die Reizwirkung von zeitlich veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern mit Frequenzen von $f \leq 10$ MHz auf Nerven oder Muskelzellen auf einer Beziehung zwischen der Stärke der Reizung und der Dauer des externen Reizes. Der wichtigste Parameter zur Beschreibung der Elektrostimulation von Körpergewebe ist der Spitzenwert der elektrischen Feldstärke im Gewebe.

Für Reizungen von Nerven und Muskeln (unwillkürliches Zucken, Kribbeln) sind neben der Frequenzabhängigkeit die Dauer der Stimulation (Einwirkdauer) und die Überschreitung eines Schwellenwertes der gewebeinternen elektrischen Feldstärke die entscheidende Voraussetzung.

Aus experimentellen Untersuchungen (z. B. an isolierten Nervenfasern und mit Probanden) sowie theoretischen Berechnungen und Überlegungen ergibt sich für die periphere Nervenstimulation ein Schwellenwert für die gewebeinterne elektrische Feldstärke von $6 \text{ V/m} \leq E_i < 7 \text{ V/m}$. Als Schwelle einer Stimulation des Gewebes des Zentralnervensystems gelten Werte von $0,15 \text{ V/m} \leq E_i \leq 0,35 \text{ V/m}$ [FB 400].

Ausnahmslos liegen die Schwellen für eine direkte Reizung von Muskeln wesentlich höher als die von Nerven. Zum Beispiel wird eine Störung der autonomen Funktion des Herzmuskels erst bei sehr starken äußeren Magnetfeldern ab einer magnetischen Flussdichte von $8 \text{ T} \leq B \leq 10 \text{ T}$ erwartet.

An den meisten Arbeitsplätzen liegen die auftretenden Expositionswerte weit unter den o. g. Schwellenwerten für periphere Nervenstimulation bzw. Muskelstimulation. Beispielsweise wurden an Büroarbeitsplätzen Expositionen von einigen Nanotesla bis Mikrottesla gemessen, an industriellen Arbeitsplätzen häufig zehn bis hundert Mikrottesla [FB 400].

Der Zusammenhang zwischen Stimulationen durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder mit $f \leq 10 \text{ MHz}$ und der Auslösung einer Erregung von Muskel- oder Nervenzellen (Aktionspotential) wird durch das Lapicque'sche Gesetz (Lapicque, 1926) bzw. die modifizierte Weiss'sche Gleichung beschrieben:

$$I_S = \left(1 + \frac{\tau}{T} \right) \cdot I_R$$

Gl. A-1

und wenn $\tau = T$ gilt $I_S = 2 \cdot I_R$

mit

I_S minimale Reizstärke, Stimulationsschwelle (in μA)

I_R Rheobase (in μA): Schwelle, bei der eine Erregung (Aktionspotential) ausgelöst wird

τ Chronaxie (in ms): Zeit, nach der die minimale Reizstärke gleich dem doppelten Rheobase-Wert ist

T Dauer der Stimulation (in ms)

Aus Gleichung A-1 und Abbildung A5 lassen sich folgende Aussagen ableiten:

1. Reize müssen I_R (Rheobase, Schwelle für Auslösung eines Aktionspotentials) überschreiten, um überhaupt eine Erregung, also ein Aktionspotential, auszulösen. Das heißt, eine minimale Reizstärke (minimaler Strom) I_S (Stimulationsschwelle) mit der Dauer T ist für eine Überwindung der Reizschwelle erforderlich (siehe Abbildung A5).
2. Aus der Grafik geht hervor, dass bei langen Reizen der Wert der Reizstärke (des Reizstromes) mit der Rheobase übereinstimmt. Die Erregung einer Nerven- oder Muskelzelle kann durch längere Reize oder größere Reizstärken nicht gesteigert werden. Selbst wenn sie lange dauern, können Reize unterhalb der Rheobase kein Aktionspotential hervorrufen.
3. Die Auslösung einer Erregung hängt vom Zeitverlauf des Reizes ab: Sind die zeitlichen Änderungen zu gering (Frequenz zu niedrig) und sind die Reize zu kurz (Frequenz zu hoch), tritt auch bei hoher Stärke des Reizes keine Nerven- oder Muskelreaktion auf.
4. Haben Reize eine kurze Dauer, ist eine höhere Intensität notwendig, um ein wirksames Aktionspotential auszulösen.

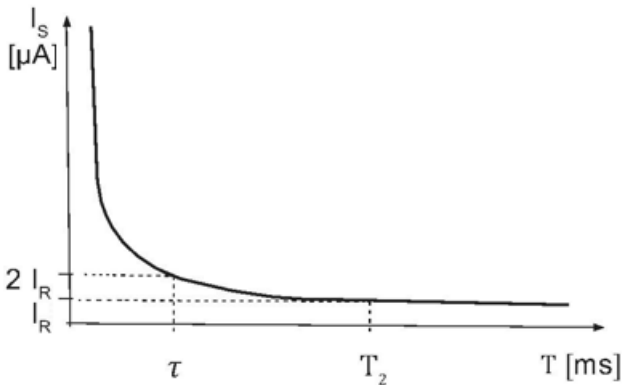


Abb. A5 Grafische Darstellung des Gesetzes von Lapicque nach FB 400

A4.4 Direkte Wirkungen in niederfrequenten Feldern als Oberflächenwirkungen und körperlere Wirkungen

Die Wirkungen von niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern unterscheiden sich grundsätzlich. Ein niederfrequentes elektrisches Feld kann die Körperoberfläche nicht durchdringen. Starke niederfrequente elektrische Felder können aber zu einer Aufladung der Hautoberfläche führen, z. B. bei trockenem Wetter bei Aufenthalt unter einer Hochspannungsleitung. Diese Wirkung kann als Kribbeln zu spüren sein. Die Wirkungen starker elektrischer Wechselfelder können auch als Bewegung von Körperhaaren infolge Influenz und elektrostatischer Abstoßung wahrgenommen werden (für $E_e > 10 \text{ kV/m}$). Die Ursache für eine Bewegung von Haaren ist, dass z. B. bei einem äußeren elektrischen Feld mit 50 Hz das elektrische Feld 100-mal pro Sekunde seine Richtung wechselt und die Hautoberfläche – bezogen auf die Erde – abwechselnd positiv oder negativ auflädt.

Wenn die Körperoberfläche durch das äußere elektrische Feld alternierend aufgeladen wird, fließt durch das Körperinnere ein Strom von der Hautoberfläche zu den Füßen auf dem Boden, obwohl die Körperoberfläche nicht durchdrungen wird. Niederfrequente elektrische Felder können also innere Ströme zwischen der Haut und einem geerdeten Körperteil erzeugen.

Demgegenüber kann ein niederfrequentes magnetisches Feld die Haut durchdringen und im Körper Wirbelströme erzeugen. Bei Expositionen gegenüber zeitlich veränderlichen niederfrequenten magnetischen Feldern ist deshalb eine Stimulation des Nerven- und Muskelgewebes infolge der induzierten Ströme möglich. Bei geringen Feldstärken ist diese Stimulation zwar nicht gesundheitsschädlich, kann aber bei mangelhafter Information und Unterweisung der Beschäftigten zu Schreck- und Schockreaktionen und damit zu sekundären Gefährdungen führen.

A5 Direkte Wirkungen im Frequenzbereich $100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$

Mit zunehmender Frequenz nehmen die für den Niederfrequenzbereich typischen Stimulationswirkungen immer mehr ab, während die für den Hochfrequenzbereich charakteristischen Wärmewirkungen zunehmen. Diese Besonderheit ist kennzeichnend für den Übergangsbereich.

A6 Direkte Wirkungen im Frequenzbereich $100 \text{ kHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$

Hochfrequente Felder können in biologisches Gewebe eindringen, es kommt zur Absorption der Strahlungsleistung und demzufolge zu einer Wärmewirkung, d. h. zu einer Erhöhung der Temperatur des Körpergewebes in örtlich begrenzten Bereichen oder zu einer Erwärmung des gesamten Körpers (siehe Abbildung A6).

Bekanntlich ist das Auge besonders wärmeempfindlich. Bei ausreichend hoher Intensität kann es bei einmaliger lokaler Einwirkung auf das Auge zu einer Temperaturerhöhung in der nicht durchbluteten Augenlinse und bei langjähriger Einwirkung zur Entstehung eines Katarakts (Mikrowellenstar/Grauer Star) kommen. Ein Katarakt wäre somit durch Überwärmung durch eine einmalige hohe Überexposition ($\text{SAR} > 100 \text{ W/kg}$) als auch durch wiederholte oder ständige Überexpositionen ($\text{SAR} > 10 \text{ W/kg}$) möglich. Durch Arbeitsschutzmaßnahmen konnten in den letzten Jahren Katarakte durch hochfrequente Felder (z. B. Radar) verhindert werden.

Die Absorption hängt neben der Frequenz und der Leistung des EMF auch von den Eigenschaften und der Struktur des menschlichen Körpergewebes ab. Außerdem erfolgt durch die Thermoregulation und unterschiedliche Durchblutung des Gewebes ein Abtransport der Wärme mit unterschiedlicher Effektivität. Diese Parameter sowie die Leistungsfähigkeit der Regulationsmechanismen und die gesamte körperliche Verfassung eines Menschen sind individuell ausgeprägt. Wie ein Beschäftigter auf eine Strahlungsabsorption im Körper reagiert, hängt außerdem von den Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie der Arbeitsbelastung und der Bekleidung ab.

Sollten sich der gesamte oder Teile des menschlichen Körpers infolge der Absorptionswirkung erwärmen, kann die Wahrnehmung eines Wärmegefühls auf der Haut eines Beschäftigten nicht als Indikator für eine gesundheitsschädliche Exposition gegenüber hochfrequenten Feldern dienen. Es ist wichtig zu wissen, dass die Strahlungsabsorption hochfrequenter Strahlungsanteile vor allem in den tieferen Gewebeschichten des Körpers stattfindet und der Mensch im Körperinneren nicht über Sensoren für Wärmewirkungen verfügt. Deswegen können in inneren Organen bereits Schäden auftreten, bevor Thermorezeptoren der Haut reagieren. Bei längerer Ganzkörpereinwirkung kann eine Erhöhung der Körperkerntemperatur mit möglichen schweren Schädigungen die Folge sein.

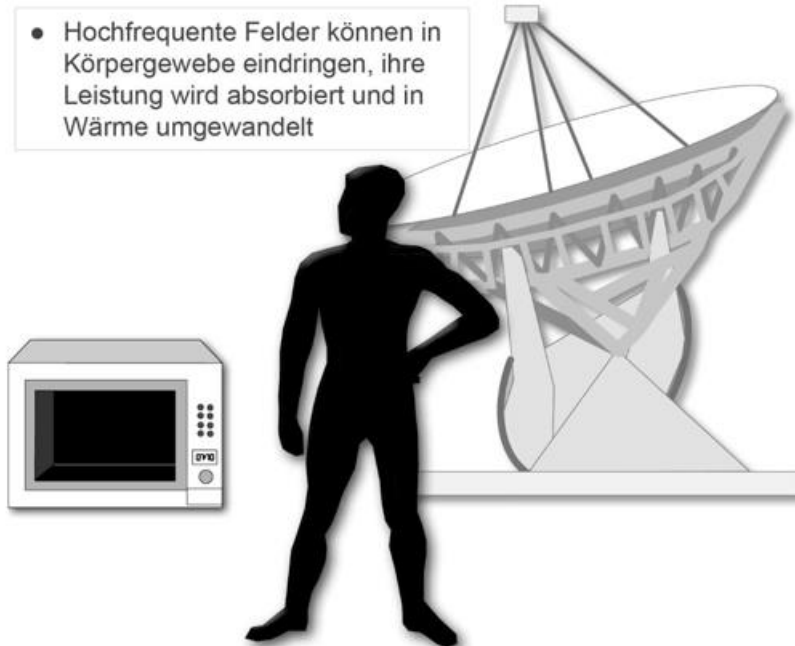


Abb. A6 Direkte Wirkung eines hochfrequenten Feldes: Erwärmung des Körpergewebes als unmittelbare Feldwirkung

A6.1 Mechanismus der thermischen Wirkungen

Da im biologischen Gewebe elektrische Ladungen (Ionen, d. h. geladene Atome oder Moleküle) auftreten, können diese Ladungen von einem äußeren EMF beeinflusst werden. Beim Eindringen von hochfrequenter Strahlung in das Gewebe treten mit der Frequenz des wirksamen Feldes Oszillationen, Schwingungen und Verschiebungen der geladenen Teilchen auf. Eine der wichtigsten Wirkungsmechanismen ist die Orientierungspolarisation von Dipolen, wie von Wassermolekülen, da das menschliche Körpergewebe zu einem hohen Prozentsatz aus Wasser besteht. Bewegungen der Moleküle führen in Verbindung mit Kraftwirkungen auf andere Moleküle zu Reibungswärme. Auf große Eiweißmoleküle des menschlichen Gewebes, die ebenfalls als Dipole mit positiven und negativen Ladungen auftreten, übt das hochfrequente Feld Drehmomente aus, es kommt unter Reibungsverlusten zu einer Ausrichtung im Feld. Zu einer Erwärmung des bestrahlten Gewebes tragen auch Rotationen, Stöße und Resonanzen der geladenen Teilchen bei.

Mit steigender Frequenz nimmt die Eindringtiefe in das Körpergewebe stark ab. Während im MHz-Bereich (Rundfunk) die Eindringtiefe bei ca. 10 cm bis 30 cm liegt, sind es im GHz-Bereich (Mobilfunk) nur noch wenige Zentimeter und über 10 GHz (Radar) weniger als 1 mm. Bei noch höheren Frequenzen treten nur noch Oberflächenwirkungen auf die Haut auf.

Außerdem ist bei der Wirkung hochfrequenter Felder zu beachten, dass ein menschlicher Körper wie eine „Empfangsantenne“ wirkt. Ein Körper kann je nach Körpergröße und bestrahltem Kör-

perteil unter Berücksichtigung des Verhältnisses zur Wellenlänge der einfallenden Strahlung unterschiedlich viel Strahlung absorbieren. Bei einer Körpergröße von ungefähr der halben Wellenlänge der wirksamen Strahlung kann besonders viel Leistung aufgenommen werden. Die Resonanzfrequenz (aufgrund Absorption sowie Reduktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit des EMF im Körpergewebe und somit Wellenlängenverkürzung) eines Erwachsenen liegt etwa zwischen $70 \text{ MHz} \leq f \leq 100 \text{ MHz}$.

A6.2 Bedeutung von Schwellenwerten

Von entscheidender Bedeutung ist, dass direkte biologische Wirkungen hochfrequenter Felder mit gesundheitsschädlichen Folgen erst bei Überschreitung eines Schwellenwertes ausgelöst werden. Um gesundheitsschädliche Wirkungen zu vermeiden, muss die Überschreitung dieses Schwellenwertes daher verhindert werden.

Die physikalische Größe, um thermische Wirkungen zu einer Exposition in hochfrequenten Feldern in Beziehung zu setzen, ist die Spezifische Absorptionsrate (SAR). Die spezifische Absorptionsrate ist die über den ganzen Körper oder Teile des Körpers gemittelte Rate, mit der Strahlungsleistung je Masseneinheit des Körpergewebes absorbiert wird (Angabe in W/kg).

Thermische Wirkungen hochfrequenter Felder sind u. a. bei Tierversuchen und mit Probanden erforscht worden. Eine SAR von 4 W/kg ist im Durchschnitt mit einer Erhöhung der Körperkern-temperatur von 1 K verbunden. Diese Erhöhung ist für einen gesunden Menschen gesundheitlich unbedenklich, zum Vergleich: Durch körperlich anstrengende Tätigkeit werden innerhalb des Körpers 3 bis 5 W/kg umgesetzt.

Um Beschäftigte vor Schädigungen der Gesundheit infolge hochfrequenter Strahlung zu schützen, darf die Erhöhung der Körperkerntemperatur maximal 1 K betragen. Daraus ergibt sich ein Schwellenwert von $\text{SAR}_{\text{Ganzkörper}} = 4 \text{ W/kg}$. Ganzkörperwerte sind über den gesamten Körper gemittelt und dienen dem Schutz vor zu hoher Wärmebelastung und Hitzschlag. Um starke Absorptionen in Teilbereichen des Körpers oder von Körperteilen zu verhindern, sind bei besonderen Expositionsbedingungen lokale SAR-Werte zu beachten (z. B. bei Exposition des Kopfes). Die lokalen SAR-Werte verhindern bei Bestrahlungen von Teilen des Körpers die thermische Schädigung des jeweiligen Gewebes. Da dabei auch Inhomogenitäten von Körpergewebe berücksichtigt werden müssen, wird über eine geringere Masse (10 g) eines zusammenhängenden Gewebes gemittelt. (Sowohl Ganzkörper-SAR als auch lokale SAR werden weiterhin über Sechs-Minuten-Intervalle gemittelt (siehe Abschnitt 6).

Im Frequenzbereich von $0,3 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$ kann es zu einer Wirkung auf das Sinnesorgan Ohr kommen. Die sehr seltene sensorische Wirkung des Mikrowellenhörens (mit Geräuschen wie Summen oder Zischen) kann nur bei Pulsbreiten von $\text{TPuls} < 30 \text{ } \mu\text{s}$ auftreten. Ab Frequenzen mit $f \geq 6 \text{ GHz}$ dringt die Strahlung nicht mehr in das Körpergewebe ein, die Absorption beschränkt sich auf die Hautoberfläche. Sehr hohe Expositionen können zu Schmerzempfindungen und Verbrennungen führen. Deshalb ist es notwendig, die auf die Körperoberfläche auftreffende Leistungsdichte zu begrenzen (Mittlung über festgelegte Flächenelemente und über Sechs-Minuten-Intervalle).

A7 Indirekte (mittelbare) Wirkungen

Bei indirekten Wirkungen handelt es sich um mittelbare Wirkungen von EMF, die die Gesundheit und Sicherheit von Beschäftigten gefährden können. Zu indirekten Wirkungen gehören die von

elektrischen oder magnetischen Feldern durch Gegenstände im Feld ausgelösten Wirkungen, die im Folgenden kurz erläutert werden:

1. Kontaktströme (Stromschläge oder Verbrennungen durch Kontaktströme infolge der Berührung eines leitfähigen Gegenstandes in einem EMF):
 - a) Indirekte Wirkungen durch Kontaktströme können bei der Berührung von leitfähigen metallischen Gegenständen in elektrischen Feldern auftreten, wobei entweder nur der Beschäftigte oder nur der Gegenstand geerdet ist (siehe Abbildung A7).
 - b) In elektrischen Feldern (wie unter einer Hochspannungsleitung) kann die Oberfläche von Kraftfahrzeugen aufgeladen werden. Bei einer Berührung des Fahrzeugs durch eine Person fließt ein Strom mit der Frequenz des anliegenden elektrischen Feldes durch den Körper zur Erde. In der Folge kommt es zu einer Entladung (Mikroschock) über den menschlichen Körper.
 - c) Mikroschocks werden nicht als gesundheitsschädlich eingestuft, werden aber häufig als belästigend angesehen. Die Wahrnehmungsschwelle für derartige Funkenentladungen bzw. die entstehenden Körperströme sind von den Eigenschaften des betreffenden aufgeladenen Materials und der individuellen persönlichen Empfindlichkeit abhängig.
2. Beeinflussung von aktiven bzw. passiven Implantaten oder am Körper getragenen medizinischen Geräten:
 - a) Die Anzahl der Implantationen und der am Körper getragenen medizinischen Geräte nimmt ebenso wie die Zahl der betroffenen Beschäftigten ständig zu. In Deutschland wurden 2018 insgesamt ca. 120 000 Neuimplantationen von Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren (ICD) vorgenommen.
 - b) Als aktive Implantate (besitzen eine Energiequelle) sind beispielhaft zu nennen:
 - Herzschrittmacher, ICD,
 - elektronische Innenohrprothesen (Cochlea-Implantate),
 - Muskelstimulatoren, Blasenstimulatoren, Magenstimulatoren,
 - Insulinpumpen,
 - Retina-Implantate,
 - Hirnschrittmacher.
 - c) Passive Implantate sind z. B. Endoprothesen (künstliche Hüft-, Schulter-, Kniegelenke), Stents (Stabilisatoren für Blutgefäße), metallische Stifte, Nägel, Schienen, Platten wie Schädelplatten.
 - d) Beeinflussung von Implantaten:
 - Wenn über ein äußeres EMF in das Implantat (wie z. B. einen Herzschrittmacher) ein Signal eingekoppelt wird, ist eine Beeinflussung des Implantats möglich. Das heißt, dass die Funktionen des Implantats gestört werden und leichte bis schwerwiegende gesundheitliche Beeinträchtigungen auftreten können.
 - Bei passiven Implantaten können durch thermische Wirkungen von EMF Erwärmungen des passiven Implantats und des angrenzenden Körpergewebes auftreten.
3. Projektilwirkung durch Kraftwirkung auf ferromagnetische Gegenstände in statischen Magnetfeldern:

In sehr starken statischen Magnetfeldern (wie am Magnetresonanztomographen) können ferromagnetische Gegenstände (z. B. Werkzeuge aus Nickel oder Stahl) angezogen und sehr stark beschleunigt werden, sodass sie wie Geschosse wirken.

4. Unbeabsichtigte Auslösung von elektrischen Zündvorrichtungen (Detonatoren):

Elektrische und elektronische Zündanlagen können durch EMF beeinflusst werden, dies kann u. U. zu Frühzündungen führen. Bei der Vorbereitung von Sprengarbeiten sind deshalb mögliche Beeinflussungen durch EMF zu berücksichtigen.

5. Brände oder Explosionen durch die Entzündung von brennbaren oder explosiven Materialien aufgrund von Funkenbildung:

Für Brände und Explosionen zündfähiger Materialien wie Staub- oder Gasgemische sind häufig elektrostatische Entladungen als Zündursache nachgewiesen worden. Durch elektrostatische Entladungen kann es z. B. zu Funken-, Büschel-, Koronaentladungen kommen.



Abb. A7 Indirekte (mittelbare) Wirkung eines niederfrequenten elektrischen Feldes: Galvanische Einkopplung eines Körperstromes als mittelbare Feldwirkung