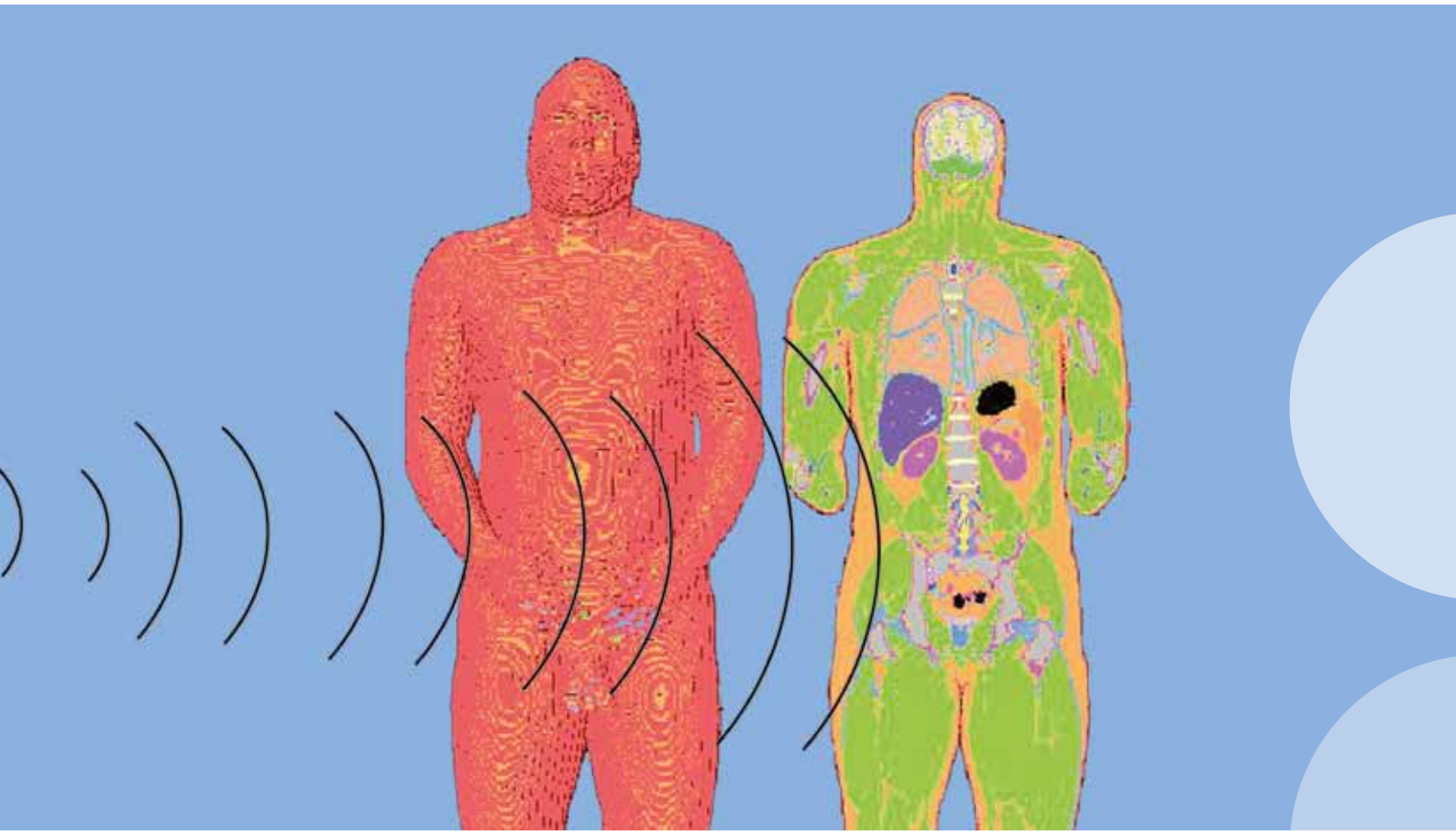
DGUV
Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung
Spitzenverband



IFA-Report 5/2011

Elektromagnetische Felder an Anlagen, Maschinen und Geräten

DGUV
Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung
Spitzenverband

IFA-Report 5/2011

Elektromagnetische Felder an Anlagen, Maschinen und Geräten

Verfasser: Fritz Börner

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Alte Heerstraße 111
D – 53754 Sankt Augustin
Telefon: 02241 / 231 - 02
Telefax: 02241 / 231 - 2234
Internet: www.dguv.de/ifa
E-Mail: ifa@dguv.de

Redaktion und Satz: Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
Mittelstraße 51
D – 10117 Berlin
Telefon: 030 288763800
Telefax: 030 288763808
Internet: www.dguv.de
E-Mail: info@dguv.de
— November 2011 —

Layout: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Berlin

Druck: MedienHaus Plump, Rheinbreitbach

ISBN: 978-3-86423-011-0
(ISBN online: 978-3-86423-012-7)

ISSN: 2190-7986

Kurzfassung

Elektromagnetische Felder an Anlagen, Maschinen und Geräten

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von elektrischen und elektronischen Geräten, Maschinen und Anlagen nehmen die elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder (EM-Felder) bei der Arbeit und im Alltag ständig zu. Neben elektromagnetischen Feldern natürlichen Ursprungs, denen der Mensch seit jeher ausgesetzt ist, gibt es Felder technischen Ursprungs, d.h. vom Menschen erzeugte Felder. Deren Intensität nimmt seit der Nutzung der elektrischen Energie ständig zu. Besonders an oder in der Nähe von industriellen Arbeitsplätzen werden immer mehr Feldquellen mit hohen elektrischen Energien zum Trocknen, Schmelzen oder Schweißen eingesetzt. Ob mit der Zunahme der elektrischen und magnetischen Feldstärke und dem ständigen Erschließen neuer Frequenzbereiche für den Menschen die gesundheitlichen Beeinträchtigungen zunehmen, wird in der Öffentlichkeit z.T. kontrovers diskutiert. Zahlreiche Forschungsprojekte befassen sich daher intensiv mit den Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder. Die Ergebnisse dieser Projekte sind inzwischen veröffentlicht und werden in Richtlinien, Normen und Regeln berücksichtigt. Der vorliegende Report ist eine Aktualisierung des BIA-Reports 06/2003.

Er erläutert die physikalischen Zusammenhänge von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (EM-Feldern) in Abhängigkeit von der Frequenz. Ferner werden die Wirkungen der Felder auf den Menschen und auf Körperhilfsmittel (Implantate) beschrieben. Darüber hinaus wird ein Überblick über die Anforderungen in Richtlinien, Normen und Regeln zum Schutz von Beschäftigten gegenüber EM-Feldern gegeben. Weiterhin werden zur Beurteilung der Expositionen von Personen die zu erwartenden EM-Felder an Arbeitsplätzen an oder in der Nähe von Anlagen, Maschinen und Geräten in Produktions- und Bürobereichen aufgezeigt. In diesem Zusammenhang werden auch Methoden erläutert, mit denen im Bereich von Niederfrequenzfeldern die Exposition an einem Arbeitsplatz und im Hochfrequenzbereich der Sicherheitsabstand an einer Mobilfunkantenne abgeschätzt werden kann. Zum Abschluss des Reports werden Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition an Arbeitsplätzen und Aufenthaltsorten erläutert.

Abstract

Electromagnetic fields generated by plant, machines and equipment

As a result of the constantly growing use of electrical and electronic equipment, machines and plant, there has been a steady increase in electrical, magnetic and electromagnetic fields at work and in everyday life. In addition to electromagnetic fields of nature origin, to which man has always been exposed, there are fields of technical origin, the strength of which has been constantly increasing since electricity was first used. Particularly at industrial workplaces or in their proximity, a growing number of powerful electrical field sources are used for drying, melting and welding. Whether this increase in electrical and magnetic field strength and the exploitation of ever new frequency ranges is detrimental to human health is a matter of in some cases heated public debate. Numerous research projects are therefore concerned in depth with the effects of electrical, magnetic and electromagnetic fields. The results of these projects have been published in the meantime and incorporated in guidelines, standards and rules. The present report is an update of BIA Report 6/2003.

It explains the physical principles of electrical, magnetic and electromagnetic fields (EM fields) in relation to frequency. Furthermore, it describes the effects of fields on humans and on bodily aids (implants). In addition, it presents an overview of the requirements contained in guidelines, standards and rules for the protection of employees from EM fields. The report also describes the EM fields that occur at workplaces at or close to plant, machines and equipment in production and office areas. In this connection, it also explains methods for estimating the exposure to low frequency fields at the workplace and the safety distance from high-frequency mobile phone transmitter masts. Finally, the report explains the measures that can be taken to reduce exposure at workplaces and other areas frequented by people.

Résumé

Champs électromagnétiques créés par des installations, des machines et des appareils

L'utilisation d'appareils, de machines et d'installations électriques et électroniques ne cessant de se développer, nous sommes de plus en plus exposés à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, aussi bien au travail que dans la vie quotidienne. Outre les champs électromagnétiques d'origine naturelle, auxquels nous sommes exposés depuis toujours, il existe également des champs d'origine technique, dont l'intensité ne cesse de croître depuis que nous utilisons l'énergie électrique. On emploie de plus en plus de sources de champs à hautes énergies électriques pour le séchage, la fusion ou le soudage, en particulier à des postes de travail industriels ou à proximité de ceux-ci. L'opinion publique est divisée sur la question de savoir si l'accroissement de l'intensité des champs électriques et magnétiques ainsi que l'extension continue des plages de fréquences a des répercussions négatives de plus en plus importantes sur notre santé. C'est la raison pour laquelle de nombreux projets de recherche ont été initiés dans le but d'étudier de façon approfondie les effets de champs électriques, magnétiques et électromagnétiques.

Les résultats de ces projets ont été rendus publics et pris en considération dans des directives, normes et règlements. Le présent compte rendu est une actualisation du compte rendu 6/2003 du BIA. Il explique les relations physiques existant entre les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques (champs EM) en fonction de la fréquence. Il décrit en outre les effets de ces champs sur l'être humain et des implants. Il donne également un aperçu des exigences imposées par des directives, des normes et des règlements pour la protection des travailleurs contre les champs EM. De plus, le compte rendu met en évidence les champs EM existant devant des installations, des machines et des appareils ou à proximité de ceux-ci, dans des ateliers de production et des bureaux. Des méthodes permettant d'estimer l'exposition à des champs EM au poste de travail (domaine des basses fréquences) et la distance de sécurité à respecter par rapport à une antenne de téléphonie mobile (domaine des hautes fréquences) sont également présentées. En guise de conclusion, des mesures visant à réduire les expositions à des champs EM à des postes de travail et au domicile sont expliquées.

Resumen

Campos electromagnéticos en equipos, máquinas y aparatos

Debido al incremento del uso de aparatos, máquinas y equipos eléctricos y electrónicos, aumenta de forma permanente el número de campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos en el trabajo y la vida diaria. Además de los campos electromagnéticos de origen natural, a los que el ser humano está expuesto desde siempre, existen campos de origen técnico. Su intensidad aumenta constantemente desde el uso de la energía eléctrica. En particular, en los sitios de trabajo industriales o en sus inmediaciones cada vez se emplean más fuentes de campo con energías eléctricas altas para secar, fundir o soldar. Tanto si es por el aumento de la intensidad del campo eléctrico y magnético como por el desarrollo constante de nuevas gamas de frecuencia para las personas, los perjuicios para la salud se incrementan y la opinión pública está tratando este tema en parte controvertido. Por consiguiente, hay numerosos proyectos de investigación que se ocupan intensivamente de los efectos de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. Los resultados de estos proyectos ya se han publicado y se han tenido en cuenta en la redacción de directivas, normas y reglas.

El presente informe es una actualización del informe BIA 6/2003 que explica las relaciones físicas de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (campos EM) según la frecuencia. Además, describe los efectos de los campos en los humanos y en los implantes. También da una perspectiva general de los requisitos de las directivas, normas y reglas para proteger a los trabajadores de los campos EM. El informe muestra qué campos EM se manifiestan en los sitios de trabajo o en las inmediaciones de equipos, máquinas y aparatos en las zonas de producción y oficinas. A este respecto, se explican también métodos para poder evaluar la exposición a los campos de baja frecuencia en el sitio de trabajo y la distancia de seguridad a la alta frecuencia de una antena de radio móvil. En la parte final del informe se explican las medidas que reducen las exposiciones en los sitios de trabajo y lugares de permanencia.

Inhaltsverzeichnis

1	**Einleitung**	11
2	**Grundlagen**	13
2.1	Elektromagnetische Felder	13
2.2	Felder natürlichen Ursprungs	13
2.3	Felder technischen Ursprungs	13
2.4	Statische Felder	14
2.5	Niederfrequente Felder	14
2.6	Hochfrequente Felder	14
3	**Wirkungen**	17
3.1	Unmittelbare Wirkungen	17
3.1.1	Statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder	17
3.1.2	Hochfrequente elektromagnetische Felder	18
3.2	Mittelbare Wirkungen	19
3.3	Elektrostatik	20
4	**Richtlinien, Vorschriften, Normen, Regeln und Grenzwerte**	21
4.1	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)	21
4.2	Empfehlungen des Rates der Europäischen Union	22
4.3	EU-Richtlinie 2004/40/EG Elektromagnetische Felder	22
4.4	Maschinenrichtlinie	23
4.5	26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes	23
4.6	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B 11	23
4.6.1	Sicherheitskonzept und Expositionsbereiche	23
4.6.2	Basiswerte und zulässige Werte	24
4.7	Normen	26
4.7.1	DIN EN 12198	26
4.7.2	DIN EN 50499 bzw. VDE 0848-499:2009-11	26
5	**Körperhilfsmittel**	29
5.1	Implantate	29
5.1.1	Passive Implantate	29
5.1.2	Aktive Implantate	29
5.2	Beschäftigte mit Körperhilfsmitteln	30
6	**Messung und Berechnung von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern zum Schutz von Personen**	33

6.1 Messung statischer Felder 33
6.1.1 Elektrische Felder 33
6.1.2 Magnetische Felder 33

6.2 Messung niederfrequenter Felder 33
6.2.1 Elektrische Felder 33
6.2.2 Magnetische Felder 34

6.3 Messung hochfrequenter Felder 34

6.4 Messung gepulster Felder 35
6.4.1 Niederfrequenz 35
6.4.2 Hochfrequenz 35

6.5 Durchführung der Messungen 37

6.6 Messorte und Messpunkte 37

6.7 Messbericht 37

6.8 Messung von eingekoppelten hochfrequenten Körperströmen 38

7 Berechnung elektrischer und magnetischer Felder 39

7.1 Berechnungsverfahren 39

7.2 Berechnung der induzierten Körperstromdichte, elektrischen Feldstärke und der spezifischen Absorptionsrate (SAR) 39
7.2.1 Körpermodelle 39
7.2.2 Homogene Körpermodelle 40
7.2.3 Anatomische Körpermodelle 40

7.3 Unsicherheiten und Grenzen der Einsetzbarkeit 41

7.4 Anwendungskriterien 41

8 Anwendungen, Berechnungsmethoden, Messergebnisse 43

8.1 Aluminiumelektrolyse- und Galvanotechnikanlagen 43

8.2 Elektroenergieanlagen 43
8.2.1 Netzstationen 43
8.2.2 Hochspannungsanlagen 45

8.3 Motore, Antriebe 46
8.3.1 Asynchronmotore 46
8.3.2 Linearantriebe 47
8.3.3 Elektrowerkzeuge 47

8.4 Magnetische Spann-, Halte- und Abscheideeinrichtungen 48

8.5 Bearbeitungszentren (CNC-Werkzeugmaschinen) 49

8.6 Induktions-Erwärmungsanlagen 49

8.7 Induktionskochfelder 50

8.8 Magnetische Felder an Schweißeinrichtungen 51
8.8.1 Lichtbogenschweißanlagen 51
8.8.2 Widerstandsschweißeinrichtungen (Punktschweißzangen) 52

8.9 Kapazitiv wirkende Erwärmungsanlagen 54
8.9.1 Kunststoffschweißmaschine 54
8.9.2 Stanzautomat 55
8.9.3 Trockner 55
8.9.4 Klebebinder 56

8.10 Büroarbeitsplätze 57

8.11 Drahtlose Bürokommunikationseinrichtung 58

8.12 Bildschirmgeräte und Monitore 58

8.13 Mikrowellenkochgeräte (Mikrowellenherde) 59

8.14 RFID-Systeme 59

8.15 Anlagen des Mobilfunks 60

8.16 Radaranlagen 61

9 Beurteilung der Ergebnisse 63

10 Schutzmaßnahmen 65

10.1 Technische Maßnahmen 65

10.2 Persönliche Schutzausrüstung 65

11 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 67

Literatur 69

1 Einleitung

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von elektrischen und elektronischen Geräten, Maschinen und Anlagen nehmen die elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder bei der Arbeit und im Alltag ständig zu. Neben elektromagnetischen Feldern natürlichen Ursprungs, denen der Mensch seit jeher ausgesetzt ist, gibt es Felder technischen Ursprungs, d. h. vom Menschen erzeugte Felder. Deren Intensität nimmt seit der Nutzung der elektrischen Energie ständig zu. Besonders an oder in der Nähe von industriellen Arbeitsplätzen werden immer mehr Feldquellen mit hohen elektrischen Energien zum Trocknen, Schmelzen oder Schweißen eingesetzt. Ob mit der Zunahme der elektrischen und magnetischen Feldstärke und dem ständigen Erschließen neuer Frequenzbereiche für den Menschen die gesundheitlichen Beeinträchtigungen zunehmen, wird in der Öffentlichkeit z. T. kontrovers diskutiert. In diesem Zusammenhang werden elektromagnetische Felder vielfach auch für Erkrankungen verantwortlich gemacht. Dies steht nach wie vor im Widerspruch zu den derzeitigen Forschungsergebnissen.

In vielen Staaten befasst sich die Grundlagenforschung daher intensiv mit der Wirkung elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme. Die zurzeit vorliegenden Erkenntnisse wurden in den verschiedenen Guidelines der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) als Grenzwerte berücksichtigt und veröffentlicht.

Zahlreiche Vorschriften, Normen und Regeln legen diese Werte bei der Gefährdungsbeurteilung zugrunde. Da der Mensch mit seinen Sinnen das Vorhandensein und die Intensität von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern nicht unmittelbar wahrnehmen kann, müssen zur Beurteilung einer Gefährdung neben den Grenzwerten auch die tatsächlich auftretenden Feldstärken bekannt sein. Reproduzierbare Mess- und Berechnungsverfahren sind daher Grundlage für die Ermittlung sowohl der Emission von Geräten, Maschinen und Anlagen als auch der Exposition an Arbeitsplätzen. Für den technisch Interessierten werden in dem vorliegenden Report die theoretischen Grundlagen erläutert, wesentliche Inhalte aus Richtlinien, Normen und Regeln vorgestellt, Mess- und Berechnungsverfahren beschrieben und beispielhaft Hilfen für Konstrukteure und Betreiber zur Abschätzung der Exposition gegeben.

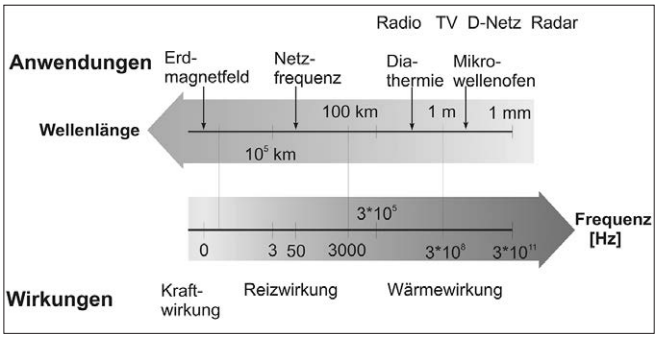
Der Report ist eine Aktualisierung des BIA-Reports 6/2003. Die Kapitel fünf bis sieben wurden neu auf genommen. Alle anderen Kapitel wurden überarbeitet und an neue Erkenntnisse und Entwicklungen angepasst oder ergänzt.

2 Grundlagen

2.1 Elektromagnetische Felder

Unter dem Begriff „Elektromagnetische Felder“ werden elektrische und magnetische Felder bis zu einer Frequenz von 300 GHz zusammengefasst. Diese Felder zählen wie die Wärmestrahlung und sichtbares Licht zur nicht ionisierenden Strahlung, d. h. die Energie der Felder reicht nicht aus, um Atome zu ionisieren. Innerhalb des Frequenzbereiches bis 300 GHz wird zwischen statischen (0 Hz), niederfrequenten (0 Hz ‹ f ‹ 30 kHz) und hochfrequenten (30 kHz ‹ f ‹ 300 GHz) Feldern unterschieden. Das Spektrum der vorkommenden elektromagnetischen Felder reicht von der Frequenz 0 Hz bis zu 300 GHz. Eine schematische Einteilung mit einigen Anwendungen und Wirkungen für verschiedene Frequenzbereiche ist in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1:
Das Spektrum elektromagnetischer Felder
und deren Wirkungsmöglichkeiten



Im physikalisch-technischen Sinn versteht man unter einem Feld ein Raumgebiet, in dem sich eine physikalische Größe als Funktion der Raum- und Zeitkoordinaten darstellen lässt [1]. Betrag und Richtung von Feldern können mittels Feldvektoren in jedem Punkt eines Raumes beschrieben werden. Man unterscheidet statische und dynamische Felder. Statische Felder sind zeitunabhängig. Sie können in reine elektrische und magnetische Felder unterschieden werden. Bei zeitlich veränderlichen (dynamischen) Feldern ist eine solche Trennung nicht möglich. Beide Felder, d. h. das elektrische und das magnetische Feld, sind hier stets untrennbar miteinander verknüpft. Die Verknüpfung zwischen der elektrischen Feldstärke **E** und der magnetischen Feldstärke **H** werden durch die Maxwellschen Feldgleichungen, das Durchflutungsgesetz und das Induktionsgesetz, mathematisch beschrieben.

Durchflutungsgesetz

$$\oint \mathbf{H} \cdot \mathbf{ds} = -\int_A \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot \mathbf{dA} \qquad \text{mit } \mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \tag{1}$$

Induktionsgesetz

$$\oint \mathbf{E} \cdot \mathbf{ds} = -\int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{dA} \qquad \text{mit } \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \tag{2}$$

mit

H	=	magnetische Feldstärke
ds	=	Wegelement der Randkurve entlang des Flächenelementes dA
$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	=	zeitlich veränderliche elektrische Flussdichte
dA	=	Flächenelement des hindurchtretenden Verschiebungsflusses
D	=	elektrische Flussdichte
ε	=	Dielektrizitätskonstante
E	=	elektrische Feldstärke
$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	=	zeitlich veränderliche magnetische Flussdichte
μ	=	Permeabilität
B	=	magnetische Flussdichte

Variablen im Fettdruck sind vektorielle Größen.

Gleichung (1) beschreibt, dass in elektrischen Leitern fließende Ströme bzw. ein elektrischer Fluss von einem Magnetfeld mit ringförmig geschlossenen Feldlinien umgeben sind. Gleichung (2) beschreibt, dass ein sich zeitlich ändernder magnetischer Fluss in einer ihn umgebenden Leiterschleife eine Spannung erzeugt [2]. Grundsätzlich unterscheidet man elektromagnetische Felder natürlichen und technischen Ursprungs.

2.2 Felder natürlichen Ursprungs

Statische magnetische und elektrische Felder kommen vielfach in der Natur vor. Beispiele hierfür sind das magnetische Gleichfeld der Erde und das elektrische Feld in der Luft. Die Werte des magnetischen Feldes sind regional unterschiedlich. Sie haben gewöhnlich Flussdichten zwischen 30 und 65 μT. Das elektrische Feld in der Luft hängt dagegen von den meteorologischen Bedingungen ab. Es wird zwischen einem wolkenunabhängigen und einen wolkenabhängigen Teil unterschieden. Die Feldstärke des wolkenunabhängigen Anteils liegt zwischen 100 und 200 V/m. Im wolkenabhängigen Anteil werden Spitzenwerte von einigen kV/m erreicht [3].

2.3 Felder technischen Ursprungs

Felder technischen Ursprungs sind eng mit der Erzeugung, Umwandlung und dem Verbrauch von elektrischer Energie verbunden. Vorwiegend werden Wechselfelder erzeugt, deren Stärke und Frequenz variiert [3]. Zur Klassifizierung elektromagnetischer Felder unterteilt man sie in der Technik nach Frequenzbereichen: Grob wird zwischen statischen, nieder- und hochfrequenten Feldern unterschieden. Eine detaillierte Einteilung der Frequenzbereiche enthält Tabelle 1.

Tabelle 1:
Einteilung der Frequenzbereiche

Frequenzbereich			Wellenlänge			Abkürzung	Internationale Bezeichnung
0	bis	30 kHz		›	10 000 m	VLF	Very Low Frequency
30 kHz	bis	300 kHz	10 000 m	bis	1000 m	LF	Low Frequency
300 kHz	bis	3 MHz	1000 m	bis	100 m	MF	Medium Frequency
3 MHz	bis	30 MHz	100 m	bis	10 m	HF	High Frequency
30 MHz	bis	300 MHz	10 m	bis	1 m	VHF	Very High Frequency
300 MHz	bis	3 GHz	100 cm	bis	10 cm	UHF	Ultra High Frequency
3 GHz	bis	30 GHz	10 cm	bis	1 cm	SHF	Super High Frequency
30 GHz	bis	300 GHz	1 cm	bis	1 mm	EHF	Extremely High Frequency

2.4 Statische Felder

Statische Felder sind zeitunabhängig. Sie werden auch Gleichfelder genannt. Dabei sind das elektrische und das magnetische Feld getrennt zu betrachten, wobei das elektrische Feld nur von der Spannung U und das magnetische Feld nur von der Stromstärke I abhängt. Technologisch haben elektrostatische Felder keine große Bedeutung. Statische Magnetfelder sind häufig im Bereich der Hochtechnologie und im Bereich der Medizin anzutreffen. Dort werden hohe Magnetfelder schwerpunktmäßig bei der Kernspintomografie angewendet. Im Bereich der Forschung sind hohe statische Magnetfelder in der Magnetspektroskopie und in Anlagen der Kernfusion anzutreffen. Bei industriellen Anwendungen sind, mit Ausnahme von Anwendungen mit Permanentmagneten, hohe statische Magnetfelder mit der Nutzung von hohen Gleichströmen verbunden. Diese sind hauptsächlich in der Elektrochemie bei der Aluminiumelektrolyse und in der Galvanotechnik zu finden.

2.5 Niederfrequente Felder

Niederfrequente Felder umfassen alle elektrischen und magnetischen Felder mit Frequenzen zwischen 0 Hz und 90 kHz. Sie sind an Anlagen der elektrischen Energieversorgung (50 Hz), der Bahn (162/3 Hz) und der Industrie z. B. in der Nähe von Drehzahl geregelten Antrieben, induktiven Erwärmungsanlagen oder Schweißeinrichtungen sowie im Haushalts- und Bürobereich anzutreffen.

Aufgrund der dielektrischen Eigenschaften der Luft (ε_0, μ_0 und κ_0) ist, wie die Gleichungen (1) und (2) zeigen, der Verschiebungsstrom im freien Luftraum gegenüber dem Leitungsstrom vernachlässigbar. Das elektrische und das magnetische Feld sind damit praktisch voneinander entkoppelt, sodass beide Felder getrennt voneinander betrachtet werden können. Daraus folgt, dass das elektrische Feld nur von der Spannung U und das magnetische Feld nur vom Strom I abhängen. Bei Anlagen und Geräten mit hohen Betriebsströmen überwiegt im Allgemeinen das magnetische Feld, während bei Anlagen mit hohen Spannungen das elektrische Feld dominiert. Das hat aber auch zur Folge, dass die Ausbreitung der Felder im Wesentlichen von der Leitungsführung bestimmt wird. Durch die Felder wird nur eine geringe Energiemenge transportiert. Dabei verringern sich sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Feldstärken mit zunehmender Entfernung von den Feldquellen.

Die Feldstärken verhalten sich je nach Art der Quelle mindestens umgekehrt proportional zum Abstand (linienhafter Leiter) und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes (Mehrleitersysteme, Spulen) [1].

Der Verlauf des elektrischen Feldes wird durch leitfähige Gegenstände beeinflusst. Es kann verzerrt und abgeschirmt werden. Bei Anwesenheit eines Menschen in einem elektrischen Feld konzentriert sich das äußere Feld im menschlichen Körper, d. h. die im Körpergewebe influenzierte elektrische Feldstärke E_i ist gegenüber der äußeren elektrischen Feldstärke E_a um den Faktor k größer. Bei Niederfrequenzfeldern nimmt der Faktor k Werte zwischen k = 15 und 18 an.

Das magnetische Feld kann dagegen nur mit sehr hohem Aufwand abgeschirmt werden. Nicht magnetische Stoffe durchdringt es nahezu ungehindert [4].

2.6 Hochfrequente Felder

Der Hochfrequenzbereich beginnt bei etwa 90 kHz und erstreckt sich bis zum Ende des Mikrowellenbereichs bei 300 GHz. In diesem Frequenzbereich ist eine getrennte Betrachtung der elektrischen und magnetischen Feldkomponenten nicht gerechtfertigt. Beide Feldkomponenten sind hier, wie die Gleichungen (1) und (2) beschreiben, eng miteinander verknüpft. Die Felder können sich von ihrer Feldquelle, z. B. von einer Antenne, ablösen und über große Entfernungen ausbreiten. Man spricht dann von elektromagnetischen Wellen. Im Gegensatz zu anderen Wellen benötigen elektromagnetische Wellen kein Träger- und Ausbreitungsmedium. Sie können sich somit auch im luftleeren Raum ausbreiten. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist identisch mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Dabei wird in Ausbreitungsrichtung elektromagnetische Energie transportiert. Die Energieströmung lässt sich berechnen, wenn die elektrische und die magnetische Feldstärke bekannt sind. Es gilt unter sehr allgemeinen Bedingungen der Poyntingsche Satz:

„An jeder Stelle des Raumes ist die Richtung der Energieströmung senkrecht zur Richtung der elektrischen und der magnetischen Feldstärke."

Das ist auch die Richtung des Poynting-Vektors **S**, dessen Betrag die Leistung durch eine Fläche senkrecht zur Energieströmung (Gleichung (3)), d. h. die Leistungsdichte, angibt.

$$S = E \cdot H \cdot \sin\gamma \qquad (3)$$

mit

S	=	Betrag des Poynting-Vektor (Leistungsflussdichte) in W/m²
E	=	Betrag der elektrischen Feldstärke in V/m
H	=	Betrag der magnetischen Feldstärke in A/m
γ	=	Winkel zwischen elektrischer und magnetischer Feldstärke

Der Poynting-Vektor charakterisiert den Zustand des Energietransports in diskreten Feldpunkten. Anstelle der Leistungsdichte werden auch die Begriffe Energieflussdichte oder Strahlungsdichte verwendet.

Bei der Ausbreitung eines elektromagnetischen Feldes müssen häufig Phasenunterschiede zwischen den Feldstärkekomponenten in den verschiedenen Raumrichtungen berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere, wenn man einer Feldquelle sehr nahe kommt. In der Nähe einer Feldquelle unterscheidet man daher zwischen Nahfeld und Fernfeld. Das ideale Fernfeld mit einer transversalen Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes wird theoretisch nur im Unendlichen erreicht. In der Praxis wird der Beginn des Fernfeldes durch Gleichung (4) wie folgt definiert:

$$r = \frac{2 \cdot D_0^2}{\lambda} \qquad (4)$$

mit

r	=	Abstand, bei dem näherungsweise Fernfeldbedingungen erreicht sind, in m
D_0	=	größte geometrische Abmessung der Antenne in m
λ	=	Wellenlänge in m

Streng genommen gilt Gleichung (4) nur für Antennenanordnungen, bei denen die größte geometrische Abmessung der Antenne größer ist als die Wellenlänge [5].

Das Gebiet mit $r < \lambda/2\pi$ beschreibt den Nahfeldbereich. Im Nahfeldbereich sind elektrische und magnetische Feldstärken näherungsweise um 90° phasenverschoben. Daher ist die Richtung der Energieströmung oszillierend. Die Energie strahlt abwechselnd aus der Feldquelle heraus und wieder zurück.

Im Fernfeld sind die elektrische und magnetische Feldstärke in Phase. Beide Felder stehen senkrecht aufeinander und verlaufen senkrecht zur Energieströmung. Die Feldstärken sind proportional zu 1/r und werden mit wachsender Entfernung kleiner. Das bedeutet, dass die Leistungsflussdichte mit $1/r^2$ abnimmt. Vereinfacht gilt im Fernfeld die Beziehung in Gleichung (5).

$$S = \frac{E^2}{120 \cdot \pi\Omega} = 120\,\pi\Omega \cdot H^2 \qquad (5)$$

mit

S	=	Betrag der Leistungsflussdichte in W/m²
E	=	Betrag der elektrischen Feldstärke in V/m
120 π	=	Feldwellenwiderstand in Luft in Ω
H	=	Betrag der magnetischen Feldstärke in A/m

Im Fernfeld reicht daher die Kenntnis einer Größe aus, um die anderen zu bestimmen.

3 Wirkungen

Man unterscheidet zwischen unmittelbaren und mittelbaren bzw. indirekten Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf den menschlichen Körper. Unter unmittelbaren Wirkungen werden Effekte verstanden, die eine direkte Auswirkung auf den menschlichen Körper haben. Da diese im Allgemeinen von der Feldstärke und der Frequenz abhängen, wird zwischen nieder- und hochfrequenten Wirkungen unterschieden.

Unter mittelbaren oder indirekten Wirkungen versteht man Feldwirkungen, die beim Kontakt eines Menschen mit elektrisch leitfähigen Gegenständen entstehen oder die aufgrund von Wärmewirkungen oder Störbeeinflussungen von Implantaten schädigende Auswirkungen haben können [6].

3.1 Unmittelbare Wirkungen

3.1.1 Statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder

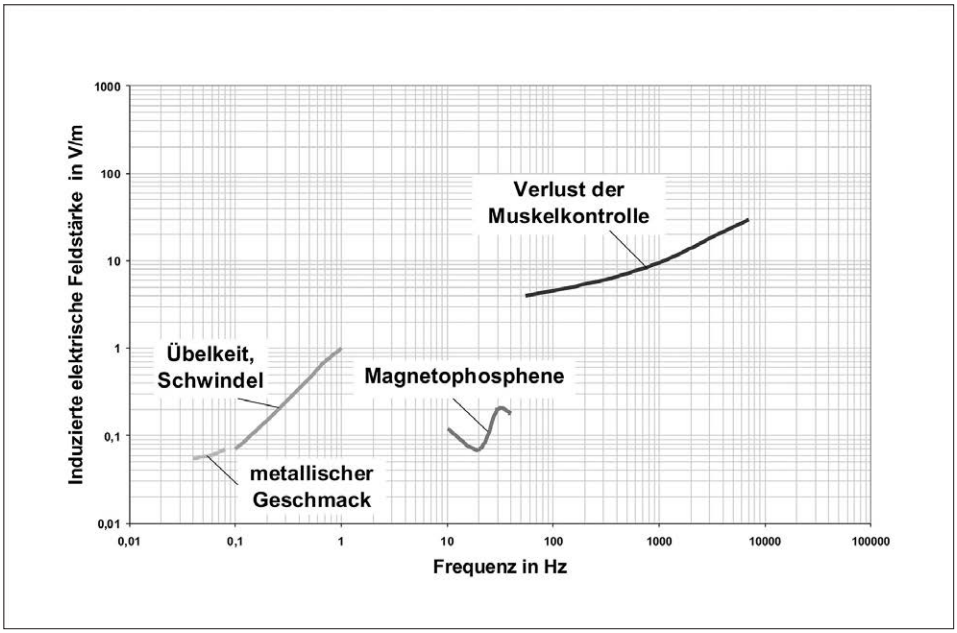
Im Bereich statischer und niederfrequenter elektromagnetischer Felder verhält sich der menschliche Körper wie ein elektrischer Leiter. Jede zeitliche Änderung der magnetischen und elektrischen Feldstärke im Körper hat eine induzierte oder influenzierte elektrische Gewebefeldstärke und somit einen sogenannten Körperstrom zur Folge. Dieser entsteht durch die Influenz und Induktionswirkung des elektromagnetischen Feldes, das die Ladungsträger im menschlichen Körper beeinflusst. Dabei ist es gleichgültig, ob die Feldänderung durch ein Wechselfeld oder durch Körperbewegungen in einem Gleichfeld verursacht wird. Im menschlichen Körper haben induzierte bzw. influenzierte Gewebefeldstärken je nach Höhe der Feldstärke, Frequenz und Dauer der Einwirkung unterschiedliche Wirkungen. Die Wirkungen basieren auf der Annahme, dass physiologische Effekte nur bei Veränderungen der elektrischen Gewebefeldstärke auftreten. Ein Zusammenhang mit den äußeren Feldgrößen ist jedoch nur beobachtbar, nachdem die Gewebefeldstärke eine bestimmte Schwelle überschritten hat. Zur Stimulation bzw. zur Erregung von Nervenzellen im peripheren Nervensystem (PNS) muss die Gewebefeldstärke einen Wert von etwa 6 bis 7 V/m überschreiten. Die Schwelle für Gewebe des Zentralnervensystems (ZNS) liegt etwa um das 20 bis 40-fache unter der Schwelle für Gewebe des PNS. Beide Systeme müssen daher getrennt voneinander betrachtet werden. Neben der Höhe der Gewebefeldstärke hängt die Auslösung einer Erregung auch vom zeitlichen Verlauf der Änderung der Gewebefeldstärke ab. Sind diese zu gering und/oder zu kurz, wird selbst bei einer hohen Gewebefeldstärke keine Stimulation ausgelöst. Treten die Stimulationen mit einer Wiederholfrequenz von bis zu einigen Hundert Hertz auf, kann jede Überschreitung des Schwellenwertes von 6 bis 7 V/m zur Erregung einer Nervenzelle führen. Bei höheren Frequenzen sind meist mehrere Stimulationen erforderlich, um eine Erregung zu bewirken. Bei einer Stimulationsfrequenz von 5 kHz sind fünf bis zehn Stimuli und bei einer Frequenz von 50 kHz sind 50 bis 100 Stimuli notwendig. Zur Stimulation einer Nervenzelle muss die Gewebefeldstärke den Schwellenwert innerhalb eines Zeitfensters von 1 bis 2 ms überschreiten. Das hat zur Folge, dass zur Beurteilung der Gewebefeldstärke nur deren Spitzenwerte herangezogen werden können. Aufgrund eines induzierten elektrischen Feldes können Sinnesorgane, Muskeln und Nerven im menschlichen Körper stimuliert und erregt werden. In Abhängigkeit von der Frequenz treten im menschlichen Körper in verschiedenen Gewebearten unterschiedliche physiologische Effekte auf. Die bei starken magnetischen Feldern am häufigsten auftretenden Effekte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Der Verlauf der Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von der Frequenz und der induzierten elektrischen Gewebefeldstärke ist für die am häufigsten vorkommenden physiologischen Effekte in Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 2:
Physiologische Effekte und Ort der Wahrnehmung bei Magnetfeldern oberhalb der Erregungsschwelle von Nervenzellen

Frequenz in Hz	Physiologischer Effekt	Ort der Wahrnehmung
‹‹ 1	Metallischer Geschmack	Zunge, Stimulation von Geschmacksrezeptoren auf der Zunge
‹ 0,1 bis 2	Schwindel, Übelkeit, induzierte elektrische Felder durch Durchblutung	Innenohr (Gleichgewichtsorgan) Stimulation von Nerven und Muskeln, (Beeinflussung der Herzfunktion)
20	Magnetophosphene, Lichtblitze	Retina (Auge)
50	Fühlbare Schmerzempfindung, Kribbeln, Zucken, Verlust der Muskelkontrolle Beeinflussung der eigenständigen Herzfunktion	Peripheres Nervensystem (PNS) Muskel Herz

Abbildung 2:
Physiologische Effekte in Abhängigkeit von der induzierten Feldstärke und der Frequenz



Elektrische Felder mit Feldstärken, die auch im Körpergewebe Feldstärken von einigen mV/m bewirken können, treten hauptsächlich im experimentellen Bereich z. B. an Höchstspannungsübertragungseinrichtungen auf. Aufgrund der Durchschlagspannung der Luft von 3 000 kV/m bei homogenen Feldern ist die Feldstärke jedoch begrenzt. Dadurch ist es nicht möglich, dass durch äußere elektrische Felder im Gewebe des menschlichen Körpers elektrische Feldstärken influenzieren, die schädliche physiologische Wirkungen zur Folge haben. Erregbares Körpergewebe, wie sensorische Organe, Nerven und Muskeln, wird daher hauptsächlich durch niederfrequente magnetische Felder stimuliert. Weil unterschiedliche erregbare Körpergewebe unterschiedliche maximale Empfindlichkeit in Bezug auf die Frequenz haben, ändert sich auch der Ort der Wahrnehmung mit der Frequenz [6].

3.1.2 Hochfrequente elektromagnetische Felder

Treffen hochfrequente elektromagnetische Felder, d. h. Felder oberhalb einer Frequenz von 90 kHz auf einen menschlichen Körper, wird ein Teil des Feldes reflektiert und der andere Teil dringt in den Körper ein und wird dort absorbiert. Die Eindringtiefe hängt von der Frequenz des Feldes und der Gewebeart ab. Allgemein gilt: Je höher die Frequenz ist, umso geringer ist die Eindringtiefe des Feldes in das menschliche Gewebe. Oberhalb einer Frequenz von etwa 10 GHz ist die Eindringtiefe s so gering ($s < 0{,}2$ mm), dass nur Oberflächeneffekte auftreten. Im Gewebe wird die absorbierte Energie in Wärme umgewandelt. Mit der Energieumwandlung verbunden ist eine Erhöhung der Körpertemperatur. Deren Anstieg über 42 °C hinaus kann zum Tod führen. Die Absorption elektromagnetischer Felder im menschlichen Körper muss daher auf eine Temperaturerhöhung von 1 °C gegenüber Normaltemperatur begrenzt werden.

Die Energieabsorption im menschlichen Körper hängt im Wesentlichen von den elektrischen und dielektrischen Eigenschaften des exponierten menschlichen Gewebes sowie von der elektrischen Gewebefeldstärke ab. Die Übertragung der Energie auf das menschliche Gewebe erfolgt frequenzabhängig durch mehrere Mechanismen. Die Wichtigsten sind:

- Polarisation gebundener Ladungen
- Orientierung permanenter Dipole
- Schwingungs- und Rotationsbewegungen innerhalb von Molekülen
- Verschiebung freier Ladungsträger.

Für die Bewertung der Wirkungen eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes wird heute die spezifische Absorptionsrate (SAR) in W/kg als Basisgröße verwendet. Die SAR ist ein Maß für die vom Körpergewebe absorbierte Energie. Mithilfe dieser Größe können sowohl Effekte beschrieben werden, die auf eine Temperaturerhöhung zurückgeführt werden, als auch solche, die von der körperinneren Feldstärke abhängen. Die SAR wird mit Gleichung (6) beschrieben.

$$SAR = \frac{\sigma \cdot \left|E_i\right|^2}{\rho} = c \cdot \left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{t \to 0+} \qquad (6)$$

mit

SAR	=	spezifische Absorptionsrate in W/kg
σ	=	elektrische Leitfähigkeit des Körpergewebes in A/Vm
E_i	=	Körperfeldstärke in V/m
ρ	=	Dichte des Körpergewebes in kg/m³
c	=	spezifische Wärmekonstante in J/kg K
$\frac{\partial T}{\partial t}$	=	zeitlich veränderlicher Temperaturanstieg

Die von elektromagnetischen Feldern im Körper ausgelösten thermischen Effekte können die Temperaturregelung des Körpers beeinflussen und zu einer Überhitzung des mensch-

lichen Gewebes führen. Aufgrund der inhomogenen Körperstruktur erfolgt die Erwärmung lokal unterschiedlich stark. In schwach durchbluteten Gewebeteilen und in thermisch isolierten Bereichen bildet sich ein Wärmestau. Dies kann zu einer lokalen, meist nur auf wenige Gramm Körpergewebe beschränkten Überhitzung führen. Im restlichen Körper macht sich diese Erwärmung nicht bemerkbar. Als besonders sensibel einzustufen ist das menschliche Auge. Hier kann schon eine kurzzeitig auftretende Temperaturerhöhung zur Linsentrübung (Katarakt) führen. Hierfür sind allerdings sehr hohe Energien erforderlich, die nur in einem fokussierten hochfrequenten elektromagnetischem Feld auftreten, z. B. in der Nähe von Radaranlagen bei einer Exposition des Kopfes in Hauptstrahlrichtung der Radarantenne. Ferner kann es durch Brechung in bestimmten Frequenzbereichen zu Fokussierungseffekten kommen. Diese können zu räumlich begrenzten Erwärmungen im Körper, so genannten „hot spots“ führen [7; 8]. Die damit verbundene hohe Temperaturanstiegsrate kann die Ursache für das Auslösen von thermoelastischen Wellen sein, die im Zusammenhang mit der akustischen Wahrnehmung von Mikrowellen eine Rolle spielen.

Weiterhin sind durch Einwirkungen von elektromagnetischen Feldern Beeinflussungen von Zellstrukturen, von zellulären Prozessen und des Immun- und zentralen Nervensystems denkbar [9].

Unter Normalbedingungen führen bei erwachsenen Menschen Ganzkörper-SAR-Werte von 1 bis 4 W/kg zu einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von weniger als 1 °C. Lange Expositionszeiten und hohe SAR-Werte können eine Überlastung der körpereigenen Thermoregulation und eine Änderung von Verhaltensmustern (Verminderung der Ausdauer) verursachen. In Tabelle 3 sind die Wirkungen bei unterschiedlichen Ganzkörper-SAR-Werten zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3:
Temperaturwirkungen bei unterschiedlichen spezifischen Absorptionsraten (SAR)

Ganzkörper-SAR in W/kg	Wirkungen
0,1	keine merkliche Temperaturerhöhung
0,4	Temperaturerhöhung gering (< 0,5 °C)
1 bis 4	Temperaturerhöhung < 1 °C
> 4	Gesundheitsgefahren durch möglichen Temperaturanstieg > 1 °C

3.2 Mittelbare Wirkungen

Die mittelbaren Wirkungen von niederfrequenten elektromagnetischen Feldern beruhen auf Körperströmen und Berührungsspannungen, die bei der Annäherung an elektrisch leitfähige Teile auftreten — beispielsweise, wenn sich isolierte Objekte aufladen. Beim Berühren des Objektes findet eine Entladung statt und für die Dauer der Berührung fließt ein Strom zur Erde. Die Wahrnehmungsschwelle für derartige Entladungen und Ströme sind stark personenabhängig. So betragen die Schwellenwerte für Frauen und für Kinder etwa nur die Hälfte der für Männer ermittelten Werte. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Wirkungen elektrischer Ströme (50/60 Hz). Die Werte wurden experimentell für Männer ermittelt.

Auch das Vorhandensein von elektrischen Feldern kann vom Menschen wahrgenommen werden. Beispielsweise können elektrische Felder z. B. im Bereich einer Hochspannungsleitung unter ungünstigen Umständen bei Feldstärken über 1 kV/m als Hautkribbeln oder Körperhaarvibrationen wahrgenommen werden.

Tabelle 4:
Schwellenwerte für Wirkungen elektrischer Ströme (50/60 Hz)

Wirkung	Schwellenwerte des Stroms in mA
Herzkammerflimmern	100
Schwerer elektrischer Schlag (Loslassen des unter Strom stehenden Objektes nicht möglich)	23
Schmerzhafter elektrischer Schlag, unwillkürliche Muskelkontraktion (bei 50 % der Männer ist Loslassen des unter Strom stehenden Objektes nicht möglich)	16
Schmerzhafter elektrischer Schlag, unwillkürliche Muskelkontraktion (bei 0,5 % der Männer ist Loslassen des unter Strom stehenden Objektes nicht möglich)	9
Schmerzhafter elektrischer Schlag (Fingerkontakt)	1,8
Elektrischer Schlag, nicht schmerzhaft (Griffkontakt)	1,8
Wahrnehmung (Griffkontakt)	1,1
Berührungswahrnehmung (Fingerkontakt)	0,36

Wie bei den niederfrequenten Feldern kann es auch bei den hochfrequenten Feldern zu mittelbaren Wirkungen des elektromagnetischen Feldes kommen. Bei Annäherung oder beim Berühren von leitfähigen Gegenständen können Funkenüberschläge oder Entladungserscheinungen die Ursache für Verbrennungen (Hochfrequenzverbrennungen) oder Schocks sein. Zündfähige Gasgemische können durch Funkenüberschlag zur Explosion gebracht werden. Ferner können hochfrequente elektromagnetische Felder beim Berühren eines metallischen Objektes bzw. durch Induktion oder Influenz in Personen einkoppeln und Ströme bewirken. In der Regel werden diese zum Boden hin abgeleitet. In Körperteilen mit geringen Muskel- und Fettgewebeanteilen, z. B. in den Gelenken der Extremitäten, können dadurch hohe elektrische Gewebestromdichten auftreten, die eine lokale Überhitzung des Gewebes auslösen. Zu den mittelbaren Wirkungen elektromagnetischer Felder wird darüber

hinaus die Beeinflussung von aktiven Körperhilfen gerechnet. Elektromagnetische Felder können die Folge von Störspannungen sein und beispielsweise die Funktion eines Herzschrittmachers, einer Insulinpumpe oder eines Hörgerätes stören.

3.3 Elektrostatik

Bei der Herstellung und Verarbeitung von nicht leitenden Werkstoffen wie Papier, Textilien, Glas, Kunststoffen, Chemikalien lädt sich beim Reiben (Ab- und Aufwickeln), Zersplittern, Zerreißen, Zerstäuben und beim Schütten oder beim Strömen von Flüssigkeiten der Werkstoff elektrostatisch auf, d. h. es entsteht statische Elektrizität. Die Höhe der elektrostatischen Aufladung wird bestimmt von

- den Werkstoffeigenschaften (Leitfähigkeit)
- der Intensität des Berührens/Trennens (Geschwindigkeit)
- der Oberflächenleitfähigkeit und
- den Umgebungsbedingungen (z. B. relative Luftfeuchte).

Eine Voraussetzung für die Aufladung ist, dass der Oberflächenwiderstand der Werkstoffe mehr als $10^9\ \Omega$ beträgt und die relative Luftfeuchte unter 45 % liegt.

Neben Werkstoffen können auch Menschen, die isolierende Kleidung oder Schuhwerk tragen, z. B. beim Gehen aufgeladen werden (Abbildung 3). Berühren aufgeladene Gegenstände (z. B. beim Transport) oder Personen geerdete elektrisch leitfähige Stoffe, findet eine elektrostatische Entladung statt. Diese macht sich meist bei ausreichender Annäherung aufgrund einer genügend hohen elektrischen Feldstärke durch einen Funkenüberschlag bemerkbar.

Der Entladungsvorgang hängt von folgenden Faktoren ab:

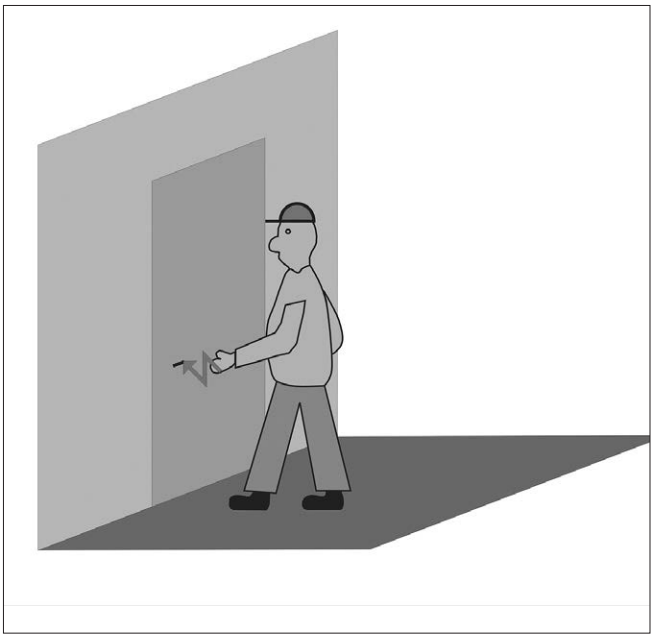
- Höhe der elektrostatischen Spannung
- Annäherungsgeschwindigkeit des elektrostatisch geladenen Objektes an das leitfähige oder geerdete Objekt
- Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Staubpartikel) sowie
- Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Objekte.

Die bekanntesten alltäglichen Entladungseffekte sind die Entladungsfunken an Türgriffen, Treppengeländern und Autokarosserien sowie das Knistern oder das Überschlagen von Funken beim Ausziehen eines Kleidungsstücks aus einem synthetischen Stoff.

Entladungen über den menschlichen Körper sind spürbar und können zu Schreckreaktionen führen. Menschen spüren Entladungsvorgänge ab einer Ladespannung von 2 kV (0,5 mJ). Bei höheren Spannungen wird der verspürte elektrische Schlag zunehmend unangenehmer und ab etwa 10 kV auch schmerzhaft. Gesundheitliche Schädigungen aufgrund elektrostatischer Entladungen können nicht ausgeschlossen werden, wenn die über den menschlichen Körper übertragene Ladung 50 µC oder die Energie 350 mJ überschreitet.

Unterhalb dieser Ladungsmenge können elektrostatische Entladungen elektronische Bauteile und Schaltungen zerstören sowie brennbare Gase, Nebel, Dämpfe, Flüssigkeiten und Stäube bei Entladungsenergien größer 0,5 mJ entzünden (Explosions-/Brandgefahr).

Abbildung 3:
Elektrostatische Aufladung beim Gehen



Maßnahmen zur Vermeidung einer Personengefährdung durch elektrostatische Elektrizität können sein [10; 11]:

- Verhinderung von Aufladung z. B. durch konstruktive Gestaltung
- Gebrauch von Gegenständen und Einrichtungen aus elektrostatisch ableitfähigen Materialien, die mit Erdpotential verbunden sind. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Ableitwiderstand kleiner als $10^9\ \Omega$ ist.
- Schutz gegen Berührung eines aufgeladenen Gegenstandes (elektrostatische Abschirmung)
- Begrenzung der Abmessungen von isolierenden Oberflächen
- Begrenzung der Bewegungsgeschwindigkeit von Schüttgütern und Flüssigkeiten in Rohrleitungen und Behältern
- Vermeidung von Ladungstrennung (Riemenantriebe, Förderbänder, Folien oder Papierbahnen)
- Erhöhung der Luftfeuchte auf mehr als 50 %
- Einsatz aktiver oder passiver Ionisatoren
- Tragen von leitfähiger oder ableitfähiger Kleidung incl. Schuhwerk
- Personenerdung.

4 Richtlinien, Vorschriften, Normen, Regeln und Grenzwerte

4.1 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)

Die Internationale Kommission für den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung (ICNIRP) hat drei Leitfäden zur Begrenzung der Exposition gegenüber statischen magnetischen Feldern sowie elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen zeitveränderlichen Feldern für Frequenzen bis zu 300 GHz veröffentlicht [12 bis 14]. Der Leitfaden [12] erschien 1998 und gilt für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. In [13] werden die in [12] ausgeführten Forderungen zum Schutz bei Expositionen in statischen Feldern an neuere Entwicklungen z. B. in der Medizintechnik angepasst und präzisiert. Neue Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition von zeitlich veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern im Frequenzbereich von 1 Hz bis 150 kHz sind in [14] enthalten. Die wesentliche Änderung gegenüber [12] ist in [14] der Wechsel bei den Grenzwerten von induzierten elektrischen Gewebestromdichten hin zu induzierten elektrische Gewebefeldstärken. Bei entsprechender Berücksichtigung der Leitfäden [13] und [14] ist der Leitfaden [12] nur noch bei elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern oberhalb einer Frequenz von 150 kHz anzuwenden, z. B. bei der Festlegung von Grenzwerten. Die in den drei Leitfäden aufgeführten Grenzwerte sind auf eine wissenschaftlich gesicherte Datenbasis gestützt. So wurden nur Ergebnisse aus Untersuchungen berücksichtigt, die vollständig nachvollziehbar sind, eine ausreichende Bedeutung haben und von einer unabhängigen Stelle bestätigt wurden. Die Leitfäden behandeln die berufliche Exposition am Arbeitsplatz und die Exposition in der Öffentlichkeit. Den angegebenen Grenzwerten liegen die sogenannten Basiswerte (Basic Restrictions) zugrunde, d. h. Werte, die direkt auf den wissenschaftlich bestätigten gesundheitsschädlichen Wirkungen, wie z. B. direkten biologischen Effekten, basieren. Von diesen Werten sind unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren die Grenzwerte, auch Basisgrenzwerte genannt, abgeleitet. Sie beschreiben Werte, die sich auf die Wirkungen eines äußeren Feldes im menschlichen Körper beziehen. Je nach Frequenz werden zur Bewertung der Exposition Grenzwerte für die elektrische Gewebefeldstärke bzw. Gewebestromdichte, die spezifische Absorptionsrate (SAR) und die Leistungsdichte angegeben. Bei Einhaltung der Grenzwerte ist ein ausreichender Schutz exponierter Personen vor den Wirkungen statischer und zeitveränderlicher elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder gegeben. Darüber hinaus werden zum Vergleich mit Messwerten physikalischer Größen sogenannte Referenzwerte oder abgeleitete Werte angegeben. Diese Werte wurden so festgelegt, dass bei Übereinstimmung der Messwerte mit den Referenzwerten die Einhaltung der Basisgrenzwerte gewährleistet ist. Sind die gemessenen Werte jedoch höher als die Referenzwerte, lässt sich daraus nicht zwangsläufig schließen, dass die Basisgrenzwerte überschritten werden. Um in einem solchen Fall die Übereinstimmung mit den Basisgrenzwerten zu beurteilen, ist eine detaillierte und aufwendige Analyse notwendig (siehe hierzu Abschnitt 7) [15; 16]. In Tabelle 5 sind die Basisgrenzwerte und in Tabelle 6 die abgeleiteten Werte für die berufliche Exposition gegenüber zeitlich veränderlichen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern bei Frequenzen bis 300 GHz aufgeführt.

Tabelle 5:
Basisgrenzwerte für die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern am Arbeitsplatz; Quelle: [12; 14; 17; 18]

Frequenzbereich			Effektivwert der induzierten elektrischen Gewebe-		Spezifische Absorptionsrate SAR in W/kg			Leistungsdichte S in W/m²
			Stromdichte in A/m²	Feldstärke (ZNS und Kopf) in V/m [5]	Ganzkörper-mittelwert	Kopf und Rumpf	Glied-maßen	
› 0	bis	1 Hz	0,04	-	-	-	-	-
1	bis	4 Hz	0,04/f [1]	0,5/f [4]	-	-	-	-
4	bis	10 Hz	0,01	0,5/f [4]	-	-	-	-
10	bis	25 Hz	0,01	0,05 [4]	-	-	-	-
25	bis	400 Hz	0,01	2×10^{-3} f [4]	-	-	-	-
400	bis	1 000 Hz	0,01	0,8 [4]	-	-	-	-
1	bis	3 kHz	f/100 [2]	0,8 [4]	-	-	-	-
3	bis	100 kHz	f/100 [2]	$2,7 \times 10^{-4}$ f [4]	-	-	-	-
0,1	bis	10 MHz	f/100 [2]	$2,7 \times 10^{-4}$ f [4]	0,4	10	20	-
0,01	bis	10 GHz	-	-	0,4	10	20	-
10	bis	300 GHz	-	-	-	-	-	50

[1] f in Hz, [2] f in kHz, [3] Über jedes 6-Minuten-Intervall arithmetisch gemittelt, [4] Induzierte Gewebefeldstärken (EiGF) im PNS, EiGF = 0,8 V/m im Frequenzbereich von 1 Hz bis 3 kHz und EiGF = $2,7 \cdot 10^{-4}$ f im Frequenzbereich von 3 kHz bis 10 MHz, [5] siehe [14]

Tabelle 6:
Abgeleitete Werte für die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern am Arbeitsplatz; Quelle: [12 bis 14]

Frequenzbereich			E-Feld (Effektivwert) in V/m	H-Feld (Effektivwert) in A/m	B-Feld (Effektivwert) in µT	Leistungsdichte (Mittelwert) in W/m²
0 Hz			-	-	$4 \cdot 10^5$	-
1	bis	8 Hz	20 000	$1{,}63 \cdot 10^5/f^2$	$2 \cdot 10^5/f^2$	-
8	bis	25 Hz	20 000	$2 \cdot 10^4/f$	$2{,}5 \cdot 10^4/f$	-
25	bis	300 Hz	$5 \cdot 10^2/f$	$8 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	-
300	bis	3 000 Hz	$5 \cdot 10^2/f$	$2{,}5 \cdot 10^5/f$	$3 \cdot 10^5/f$	-
3 000	bis	100 000 Hz	170	80	$1 \cdot 10^2$	-
0,1	bis	1 MHz	610	1,6/f	2/f	-
1	bis	10 MHz	610/f	1,6/f	2/f	-
10	bis	400 MHz	61	0,16	0,2	10
0,4	bis	2 GHz	$3f^{1/2}$	$0{,}008f^{1/2}$	$0{,}01f^{1/2}$	f/40
2	bis	300 GHz	137	0,36	0,45	50

f wie in Frequenzbereichsspalte angegeben

4.2 Empfehlungen des Rates der Europäischen Union

Im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft wurde die „Empfehlung des Rates 1999/519/EC vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)“ veröffentlicht [19]. Die Empfehlung enthält allgemeine Grundsätze und Methoden zum Schutz der Bevölkerung. Den Mitgliedstaaten bleibt es überlassen, nach Maßgabe der Gemeinschaftsbestimmungen über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer und der Bevölkerung detaillierte Vorschriften vorzusehen.

Im Anhang II und III dieser Empfehlungen sind Basisgrenzwerte und Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder aufgeführt. Die Basiswerte entsprechen den Werten der ICNIRP für die allgemeine Bevölkerung. Die Referenzwerte sind vergleichbar den Strahlungspegeln nach DIN EN 12198 Teil 1 und damit den zulässigen Werten des Expositionsbereiches 2 der berufsgenossenschaftlichen Vorschrift BGV B11 [17].

4.3 EU-Richtlinie 2004/40/EG Elektromagnetische Felder

Die Richtlinie wurde im Amtsblatt der EU Nr. L 184 vom 24. Mai 2004 veröffentlicht. Bei der Richtlinie handelt es sich um die 18. Einzelrichtlinie nach Artikels 16 Absatz 1 der Arbeitsschutz-Rahmen Richtlinie 89/391/EWG über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit. Die nationale Umsetzungsfrist der Richtlinie wurde vom EU-Rat und -Parlament (Richtlinie 2008/46/EG) vom 30. April 2008 auf den 30. April 2012 um vier Jahre verlängert [20; 21].

Die EU-Richtlinie 2004/40/EG enthält Mindestvorschriften zum Schutz der Arbeitnehmer vor der Gefährdung der Gesundheit und Sicherheit durch die Einwirkung von elektromagnetischen Feldern während der Arbeit. Langzeitwirkungen, auch mögliche karzinogene Wirkungen aufgrund der Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, für die bislang kein schlüssiger Beweis eines kausalen Zusammenhangs vorliegt, erfasst die Richtlinie nicht.

In der Richtlinie sind Expositionsgrenzwerte und Auslösewerte festgelegt. Die Werte stützen sich auf von der ICNIRP erarbeiteten Empfehlungen [12 bis 14]. Bei Einhaltung der Grenzwerte wird gewährleistet, dass Arbeitnehmer gegen alle bekannten gesundheitsschädlichen Auswirkungen geschützt sind. Je nach Frequenz werden Werte für die induzierte Gewebestromdichte, die spezifische Absorptionsrate (SAR) und die Leistungsdichte angegeben. Das Sicherheitskonzept der Richtlinie zeigt Abbildung 4.

Die Expositionsgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden. Die angegebenen Auslösewerte werden für direkt messbare Größen, wie die elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke und magnetische Flussdichte, Leistungsdichte und Kontaktstrom angegeben. Bei der Überschreitung der Werte ist nachzuweisen, dass die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden und Sicherheitsrisiken ausgeschlossen werden können. Trifft das nicht zu, sind Maßnahmen zu ergreifen, um eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte zu verhindern. Die Einhaltung der Auslösewerte gewährleistet, dass keine nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen auftreten.

Eine Beeinflussung von elektronischen Geräten und Systemen ist jedoch auch bei Einhaltung der Auslösewerte nicht ausgeschlossen. Die Auswirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf Personen mit aktiven Implantaten wie Herzschrittmacher, Defibrillatoren usw. sind daher entsprechend zu berücksichtigen.

Abbildung 4:
Sicherheitskonzept der EU-Richtlinie 2004/40/EG

Die Expositionsgrenzwerte und die Auslösewerte entsprechen weitgehend den Basiswerten bzw. den zulässigen Werten für den Expositionsbereich 2 der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11.

Die Richtlinie verpflichtet den Arbeitgeber zur Bewertung und Verminderung von Expositionsrisiken sowie zur Unterweisung und zur Gesundheitsüberwachung der Arbeitnehmer.

Die Ermittlung und Bewertungen müssen grundsätzlich sachkundig geplant und durchgeführt werden. Die aus Bewertungen, Messungen oder Berechnungen resultierenden Daten sind in geeigneter Form zu speichern und aufzubewahren [22].

4.4 Maschinenrichtlinie

Die Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung) wurde am 9. Juni 2006 im EU-Amtsblatt (L 157) veröffentlicht. Sie ersetzt die Richtlinie des Rates vom 22. Juni 1998 zur Angleichung der Rechtsvorschriften für Maschinen 98/37/EG; Maschinenrichtlinie. Mit der Richtlinie wird ein einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen beim Inverkehrbringen innerhalb des europäischen Wirtschaftsraumes (EWR) angestrebt. Im Anhang 1 der Richtlinie 2006/42/EG sind unter Punkt 1.5.10 „Strahlung“ Schutzziele formuliert und Anforderungen an die Beschaffenheit einer Maschine beschrieben. Danach muss eine Maschine so konzipiert und gebaut sein, dass unerwünschte Strahlungsemissionen der Maschine ausgeschlossen oder so weit verringert werden, dass sie keine schädlichen Auswirkungen für den Menschen haben [23]. Dies gilt für den Betrieb und für Wartungs- und Reinigungsarbeiten.

4.5 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

Mit der Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 16. Dezember 1996 [24] (Verordnung über elektromagnetische Felder — 26. BImSchV) wurde in Deutschland erstmals eine spezielle Regelung zum Schutz der Gesundheit der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern getroffen. Die Verordnung gilt für die Einrichtung und den Betrieb von Hoch- und Niederfrequenzanlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder in wirtschaftlichen Unternehmungen Verwendung finden und die nicht einer besonderen Genehmigung bedürfen. Im Sinne der Verordnung sind Hochfrequenzanlagen ortsfeste Sendefunkanlagen mit einer allseitig gleichförmigen Sendeleistung von 10 Watt (EIRP)[1] oder mehr, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 10 MHz bis 300 GHz erzeugen. Niederfrequenzanlagen sind ortsfeste Anlagen zur Umspannung und Fortleitung elektrischer Energie mit einer Frequenz von 162/3 Hz und 50 Hz und einer Spannung von 1000 V und mehr.

Die in der Verordnung festgelegten Immissionsgrenzwerte beruhen auf den Richtlinien der ICNIRP und der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK). Diese Werte gelten nicht für den beruflichen Bereich sondern zum Schutz der Allgemeinheit. Die Festlegungen sind unter Berücksichtigung von Vorsorgeaspekten getroffen worden und enthalten gegenüber den Werten für den beruflichen Bereich zusätzliche Sicherheitsfaktoren. Dies stellt sicher, dass auch besonders empfindliche Gruppen und Personen der Bevölkerung (z. B. Kinder) geschützt werden.

4.6 Berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B 11

Die Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, heute Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, setzte die berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B11 „Unfallverhütungsvorschrift, Elektromagnetische Felder“ [17] Mitte des Jahres 2001 in Kraft. Diese regelt den Arbeitsschutz für Personen bei Gefährdungen durch elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz. Die Vorschrift richtet sich an Unternehmer und Arbeitnehmer (Versicherte). Für beide Parteien werden Anforderungen und Verhaltensregeln aufgeführt, die es bei einer möglichen Gefährdung durch elektromagnetische Felder zu beachten gilt.

4.6.1 Sicherheitskonzept und Expositionsbereiche

Das in der Vorschrift umgesetzte Sicherheits- und Vorsorgekonzept folgt dem Grundsatz, Gefährdungen von Personen auszuschließen und wesentliche Belästigungen von Personen zu verhindern. Basierend auf diesem Konzept sind drei Expositionsbereiche und der Gefahrenbereich definiert (siehe Abbildung 5.

1 *EIRP, Äquivalente isotrope Sendeleistung (engl.: equivalent isotropically radiated power)*

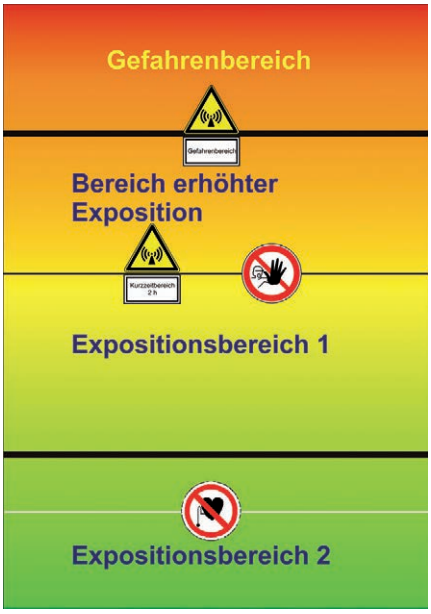
Der Expositionsbereich 2 umfasst alle Bereiche, in denen nicht nur mit einer vorübergehenden Exposition gerechnet werden muss. Dies sind z. B.

- allgemein zugängliche Bereiche
- Büro- und Sozialräume
- Arbeitsräume, in denen eine Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern bestimmungsgemäß nicht erwartet wird.

Der Expositionsbereich 1 erfasst

- kontrollierte Bereiche, z. B. elektrische Betriebsstätten und vom Betreiber überprüfbare Bereiche
- Bereiche, in denen aufgrund der Betriebsweise sichergestellt ist, dass eine Exposition nur vorübergehend erfolgt.

Abbildung 5:
Sicherheitskonzept der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11



Nach BGR B11 „BG-Regel Elektromagnetische Felder“ [18] bedeutet „vorübergehende Exposition“, dass die Expositionszeiten im Mittel wesentlich kürzer als acht Stunden täglich sind, an fünf Tagen in der Woche bei 50 Wochen pro Jahr. Die zulässigen Werte sind unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit gewählt. Sie orientieren sich an den Wirkungen von niederfrequenten und-hochfrequenten Feldern. Die zulässigen Werte sind nach dem Vorsorgekonzept ausgewählt.

Neben den genannten Expositionsbereichen gibt es den Bereich erhöhter Exposition.

Dieser Bereich ist ein kontrollierter Bereich, in dem für eine begrenzte Zeitdauer die zulässigen Werte des Expositionsbereiches 1 überschritten werden dürfen. Die Expositionszeit, die nicht überschritten werden darf, ist bei niederfrequenten Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 91 kHz auf zwei Stunden pro Tag und bei hochfrequenten Feldern auf kleiner als sechs Minuten begrenzt. Ist eine Begrenzung des Aufenthaltes auf diese Werte nicht möglich oder werden die zulässigen Werte überschritten, besteht eine Gefahr für Personen, die sich in diesem Bereich aufhalten. Daher sind Maßnahmen zu ergreifen, mit denen eine unzulässige Exposition verhindert werden kann.

4.6.2 Basiswerte und zulässige Werte

Grundlage für die zulässigen Werte sind die sogenannten Basiswerte der ICNIRP. Die Basiswerte sind die aufgrund der unmittelbaren und mittelbaren Wirkungen durch elektromagnetische Felder festgelegten Grenzwerte. Sie sind in Tabelle 4 angegeben. Die jeweiligen zulässigen Werte für die verschiedenen Expositionsbereiche sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt, sie gelten für eine Ganzkörperexposition. Bei Teilkörperexpositionen gelten die Basiswerte [25 bis 27].

Die in den Abbildungen 6 und 7 angegebenen Feldstärken sind im Niederfrequenzbereich Effektivwerte und im Hochfrequenzbereich über ein Sechs-Minuten-Intervall gemittelten Effektivwerte.

Für kurzzeitig gepulste Felder im Niederfrequenzbereich ($T < 1$ s), die aus sinus-, trapez-, dreieckförmigen oder exponentiellen Einzel- oder Mehrfachimpulsen bestehen, enthält die BGV B11 spezielle Anforderungen. Bei der Bewertung werden die zeitlichen Änderungen der elektrischen Feldstärke bzw. der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von einem berechneten Gewichtungsfaktor betrachtet.

Abbildung 6:
Abgeleitete Werte der elektrischen Feldstärke der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11

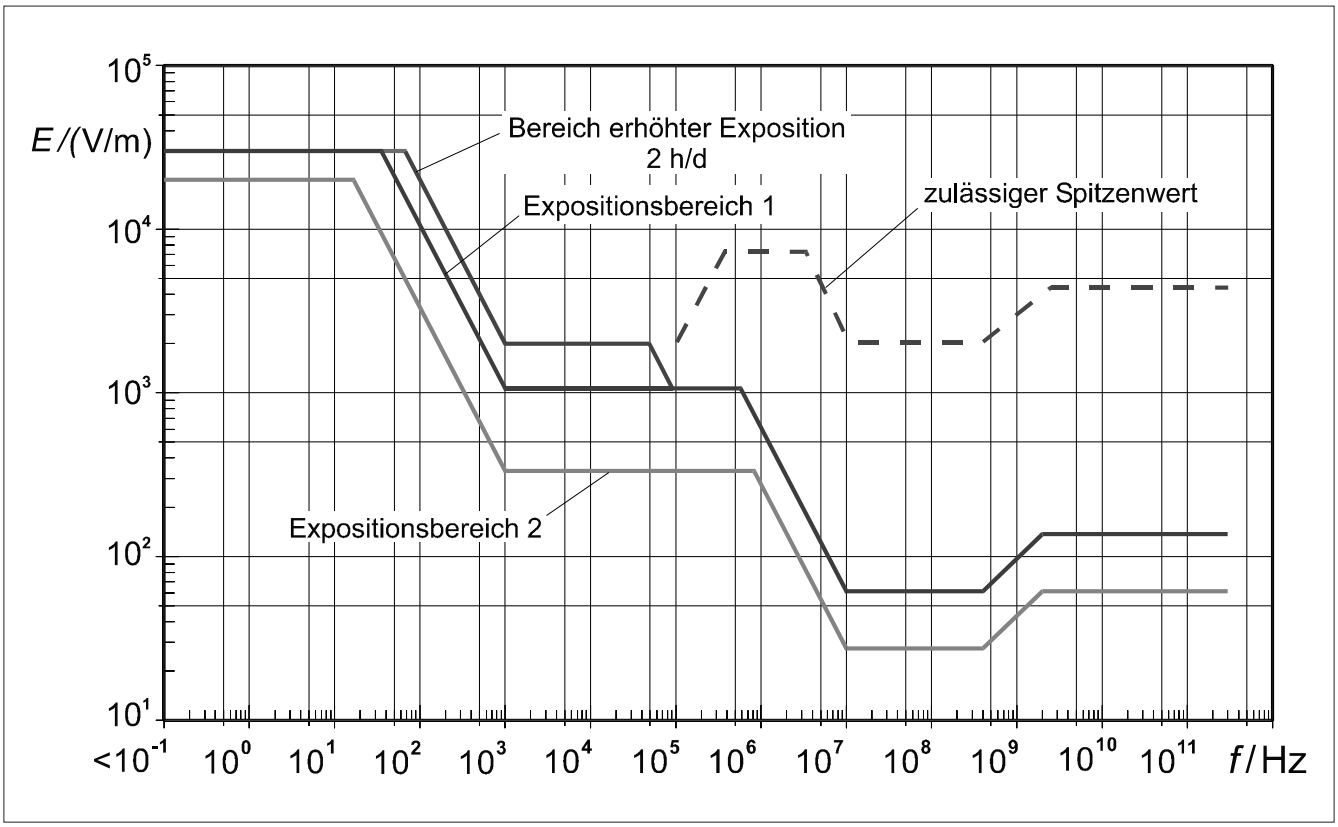
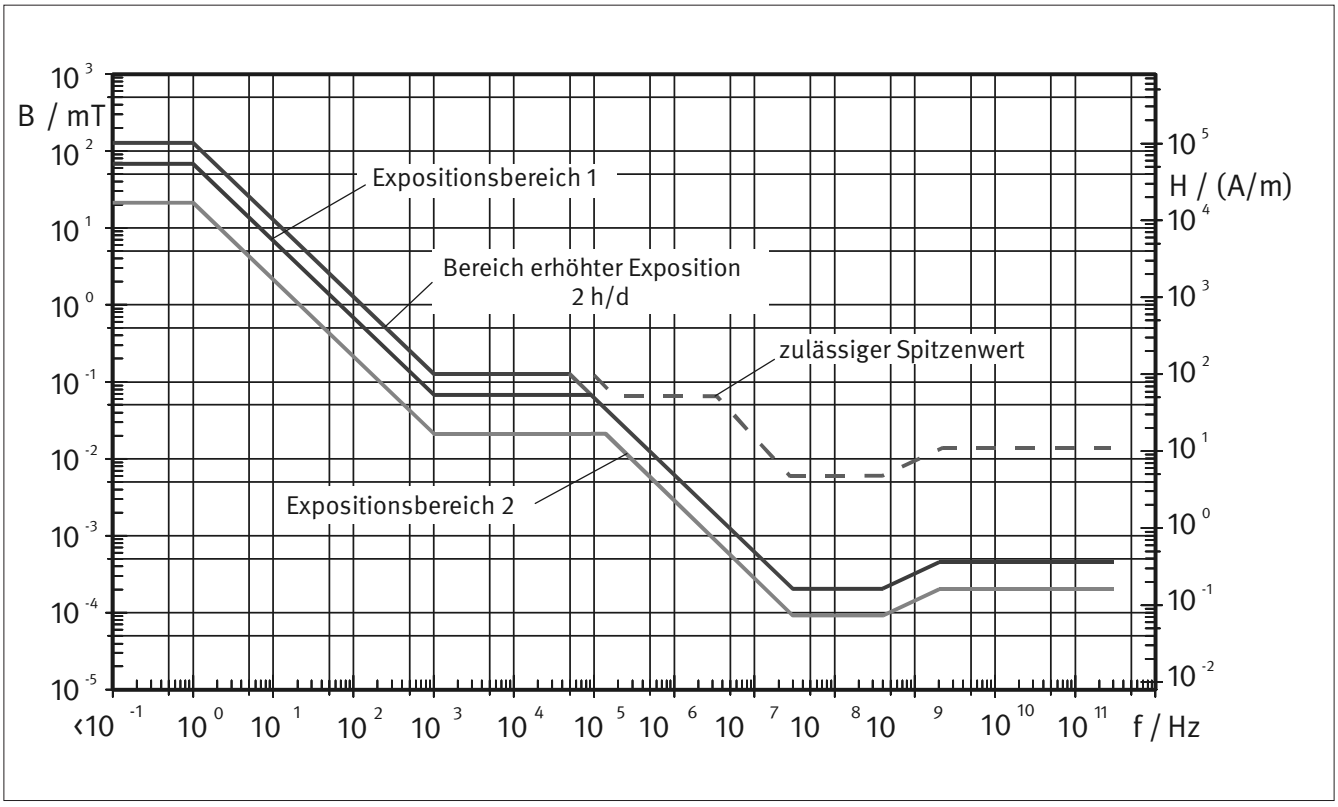


Abbildung 7:
Abgeleitete Werte der magnetischen Flussdichte/Feldstärke der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11



4.7 Normen

4.7.1 DIN EN 12198

Zur Umsetzung der Beschaffenheitsanforderungen der Richtlinie 2006/42/EG [23] sind die europäischen Normen DIN EN 12198 Teile 1 bis 3 [28] anzuwenden. Diese Normen enthalten allgemeine Leitsätze zur Risikobewertung der Strahlenemission durch Maschinen, zu Messverfahren und Schutzmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung der Strahleneinwirkung auf Personen.

Ihr Ziel ist nicht die Beschränkung der Emission elektrischer Anlagen durch Grenzwerte, sondern die Beschreibung eines Verfahrens zur Einschätzung des durch Strahlung der Maschine verursachten Risikos und die Kategorisierung aller Strahlung emittierenden Maschinen entsprechend den in der Norm vorgegebenen Strahlenemissionspegeln [29; 30]. Zur Einschätzung des Strahlungsrisikos muss der Hersteller einer Maschine eine Risikobewertung nach DIN EN ISO 14121 Teil 1 durchführen. Basis hierfür sind die zunächst ermittelten Emissionswerte der Maschine. Darauf aufbauend ist unter Zugrundelegung der Anforderungen der DIN EN 12198 eine Bewertung der Maschinenemission für alle Lebensdauerstufen einer Maschine durchzuführen. Diese umfasst auch die Zuweisung der Strahlungsemissionskategorien (Kategorie 0 bis 2) zu den einzelnen Betriebsphasen der Maschine wie z. B. Einrichten, Betrieb, Wartung und Fehlersuche. Ferner hat der Hersteller der Maschine in den Maschineninformationen anzugeben, wie Betrieb und Instandhaltung der Maschine ohne Gesundheitsrisiko durchführbar sind. In Tabelle 7 sind die Strahlungsemissionskategorien aufgeführt. Tabelle 8 enthält die Grenzwerte der Strahlungspegel für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder bis 300 GHz für eine Zuordnung in Kategorie 0. Die Grenzwerte der Strahlungspegel für eine Zuordnung in die Kategorie 1 entsprechen den Werten der Tabelle 6. Bei Strahlungspegeln, die über den Werten der Tabelle 6 liegen, gilt die Kategorie 2.

Tabelle 7:
Einteilung der Maschinen in Strahlenemissionskategorien nach DIN EN 12198 Teil 1; Quelle: [28]

Kategorie	Beschränkungen und Schutzmaßnahmen	Information und Ausbildung
0	keine Beschränkung	keine Information erforderlich
1	Beschränkungen: Zugangsbegrenzung, Schutzmaßnahmen können erforderlich sein	Information über Gefahren, Risiken und sekundäre Wirkungen
2	besondere Beschränkungen und grundlegende Schutzmaßnahmen	Information über Gefahren, Risiken und sekundäre Wirkungen; Ausbildung kann erforderlich sein

Tabelle 8:
Strahlungspegel nach DIN EN 12198 Teil 1 für die Zuordnung in Kategorie 0; Quelle: [28]

Frequenzbereich	E-Feld (Effektivwert) in V/m	H-Feld (Effektivwert) in A/m	B-Feld (Effektivwert) in µT	Leistungsdichte (Mittelwert) in W/m²
1 bis 8 Hz	10 000	$3{,}2 \cdot 10^4/f^2$	$4 \cdot 10^4/f^2$	-
8 bis 25 Hz	10 000	4 000/f	5 000/f	-
0,025 bis 0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0,8 bis 3 kHz	250/f	5	6,25	-
3 bis 150 KHz	87	5	6,25	-
0,15 bis 1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	-
1 bis 10 MHz	$87/f^{1/2}$	0,73/f	0,92/f	
10 bis 400 MHz	27,5	0,073	0,092	2
0,4 bis 2 GHz	$1{,}375f^{1/2}$	$0{,}0037f^{1/2}$	$0{,}0046f^{1/2}$	f/200
2 bis 300 GHz	61	0,16	0,2	10

f wie in Frequenzbereichsspalte

4.7.2 DIN EN 50499 bzw. VDE 0848-499:2009-11

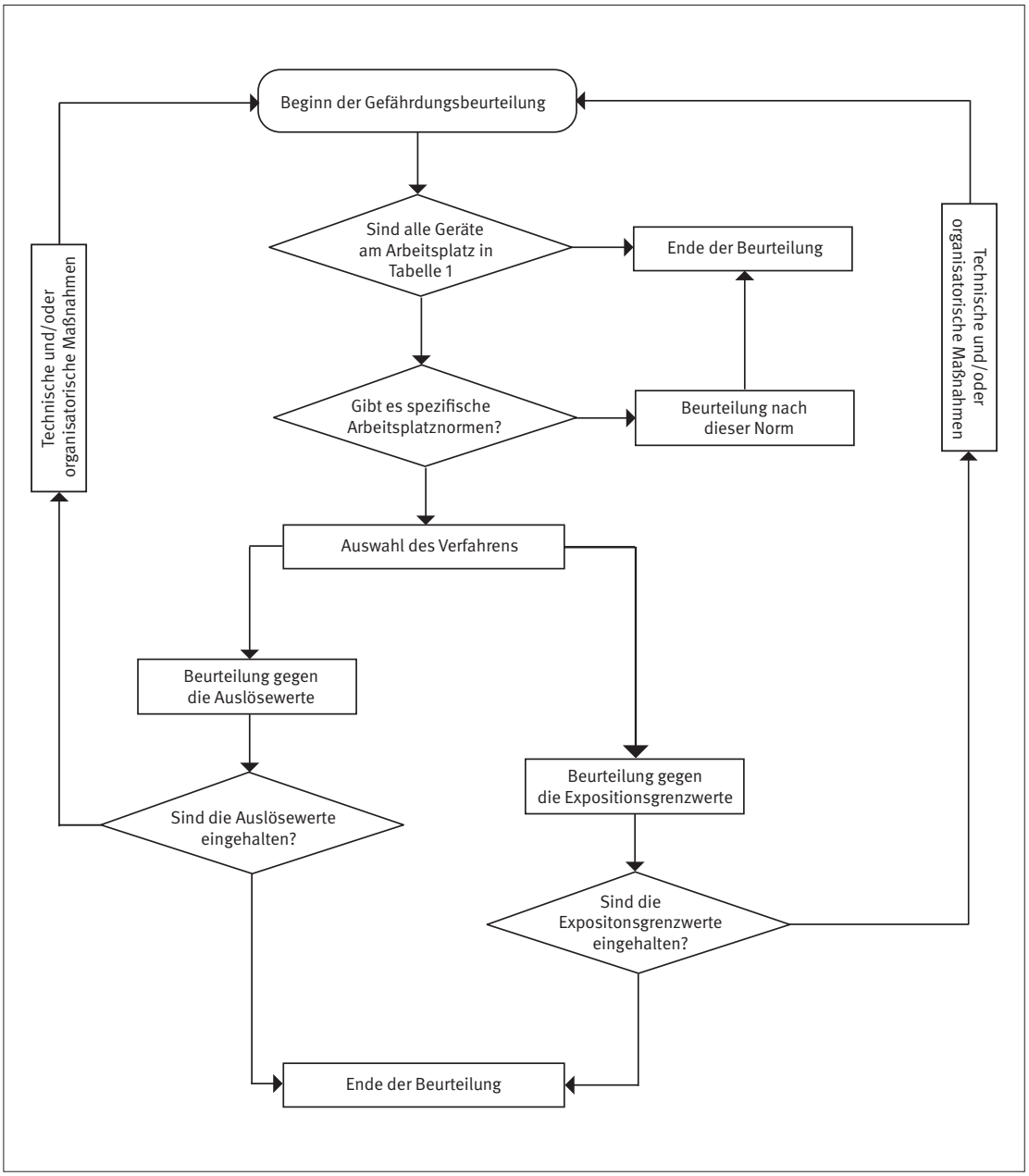
Die Norm DIN EN 50499 bzw. VDE 0848-499 dient der Umsetzung der Europäischen Arbeitsschutz-Richtlinie 2004/40/EG. Sie enthält Festlegungen für die Beurteilung von Arbeitsplätzen im Hinblick auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz [31].

Beschrieben wird ein allgemeines Konzept für die Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Arbeitsplätze werden unterteilt in Arbeitsplätze, die aufgrund vorhandener Feldquellen (Maschinen und Geräte) geringer Emission von vorneherein die Anforderungen der EU-Richtlinie 2004/40/EG erfüllen, und in Arbeitsplätze, deren Feldquellen einer weiteren Beurteilung bedürfen. Anlagen, Maschinen und Geräte (Feldquellen), für die keine detaillierten Bewertungen durchzuführen sind, sind in einer sogenannten „White List“, der Tabelle 1 der DIN EN 50499, aufgeführt. Dazu zählen beispielsweise Büroarbeitsplätze (siehe Abschnitt 8.10). Bei Feldquellen, die nicht in

der Tabelle 1 aufgeführt sind, ist zu prüfen, ob eine spezifische Norm auf die Arbeitsumgebung angewendet werden kann, z. B. EN 50496 (Abbildung 8) oder EN 50519 [32; 33]. Kann keine Norm herangezogen werden, muss die Expositionsbewertung entweder gegen die Auslösewerte oder direkt gegen die Expositionsgrenzwerte der EU-Richtlinie durchgeführt werden. Bis zur Umsetzung der Richtlinie ist zur Expositionsbewertung die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 anzuwenden.

Zu den Arbeitsplätzen mit Feldquellen, die einer weiteren Bewertung bedürfen, gehören z. B. Arbeitsplätze mit industrieller Elektrolyse, Widerstandsschweißanlagen, Arbeitsplätze zum Wärmen und Trocknen mit Mikrowellen oder Arbeitsplätze in der direkten Nähe von Sende- oder Radaranlagen. Zeigt die Beurteilung, dass die Expositionen am Arbeitsplatz die Expositionsgrenzwerte nicht einhalten, dann müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Übereinstimmung mit den Festlegungen der Europäischen Richtlinie herbeizuführen. Nach der Durchführung von Maßnahmen ist der Bewertungsvorgang solange zu wiederholen, bis keine Gefährdung mehr festgestellt wird.

Abbildung 8:
Gefährdungsbeurteilung nach EN 50499



5 Körperhilfsmittel

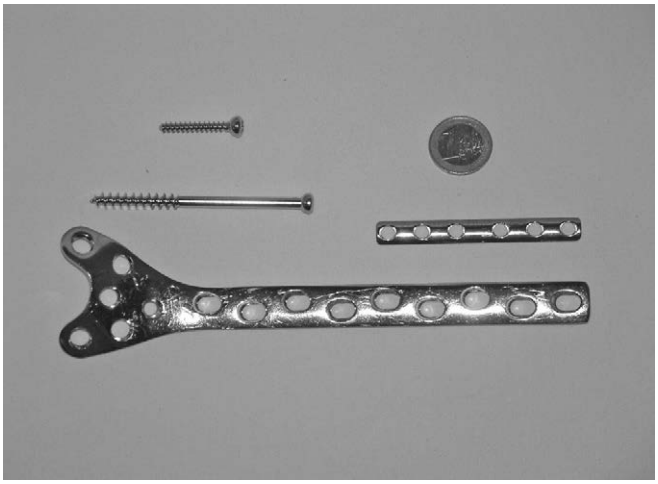
5.1 Implantate

Immer häufiger dienen Implantate zur Unterstützung von geschädigten Körperteilen oder Organen. Damit einhergehend erweitern sich die Anwendungen für Implantate ständig. Menschen jeder Altersstufe können davon betroffen sein. Im Alltag und am Arbeitsplatz kann die Funktion von Implantaten über unterschiedliche physikalische Mechanismen durch elektrische und magnetische Felder beeinflusst werden. Zum Schutz von Arbeitnehmern mit Implantaten fordert die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 daher die Einhaltung besonderer Maßnahmen. Diese sollen Beeinflussungen der Implantate und damit Gefährdungen der Implantatträger durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder verhindern. Implantate werden in passive und aktive Implantate unterschieden.

5.1.1 Passive Implantate

Passive Implantate (Abbildung 9) übernehmen fast immer eine irgendwie geartete mechanische Funktion. Sie haben den Zweck, beeinträchtigte Körperteile ganz oder teilweise zu ersetzen, sodass die Funktion eines Körperteils verbessert oder wiederhergestellt wird. Die Implantate verbleiben entweder für einen bestimmten Zeitraum oder auf Dauer im Körper des Patienten.

Abbildung 9:
Beispiel für passive Implantate; Quelle: [34]



Die wichtigsten passiven Implantate sind:

- Endoprothesen (künstliche Hüft-, Knie- und Schultergelenke)
- Platten, Schienen und Stabilisatoren sowie Nägel und Schrauben für Knochenbrüche
- Stabilisatoren für Blutgefäße („Stent“)
- Gefäßklips oder Klemmen

Gegenwärtig werden passive Implantate überwiegend aus Metall (Edelstahl, Titan, Gold) hergestellt. In zunehmendem Maße werden aber speziell entwickelte Materialien aus Kunststoffen, Keramik oder Verbundmaterial verwendet. Sie sind mechanisch stark beanspruchbar und weisen eine gute Gewebeverträglichkeit auf.

Implantate aus Metall erwärmen sich bei der Einwirkung von sehr starken niederfrequenten Magnetfeldern und elektromagnetischen Feldern. Bei zu starker Erwärmung kann das an das Implantat angrenzende Gewebe geschädigt werden. Mit der Schädigung einher geht oftmals eine mechanische Lockerung des Implantates. Aufgrund der Kraftwirkung des magnetischen Feldes ist bei Implantaten, die im Wesentlichen aus ferromagnetischen Werkstoffen bestehen, eine Dislokation möglich.

5.1.2 Aktive Implantate

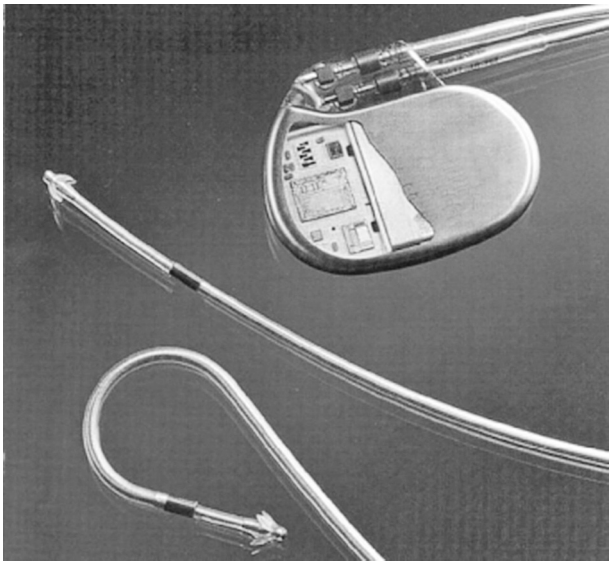
Die Bezeichnung „aktive Implantate“ weist bereits darauf hin, dass diese Geräte mit einer Energiequelle versehen sind und ihren Träger aktiv unterstützen. Die bekanntesten aktiven Implantate sind Herzschrittmacher und Defibrillatoren. In den letzten Jahren wurde eine ganze Reihe von Geräten entwickelt, die der Unterstützung anderer Organfunktionen dienen. Beispiele für aktive Implantate sind:

- Herzschrittmacher
- Defibrillator
- Chochlea-Implantat
- Brainstem-Implantat
- Innenohrprothese
- Neurostimulator
- Medikamentenpumpe
- Retina-Encoder.

Die Funktionsbeeinflussung von elektrisch oder elektronisch betriebenen Implantaten, wie Herzschrittmacher, Defibrillatoren, Cochlea-Implantate oder Insulinpumpe durch elektrische und magnetische Feldern müssen aufgrund der daraus resultierenden Gefährdungen für den Implantatträger gesondert betrachtet werden. So können beispielsweise bei magnetischen Wechselfeldern Störströme und Störspannungen in die Elektronik des Implantates eingekoppelt werden und die Funktion des Implantates stören. Am empfindlichsten sind Implantate, die zur Steuerung elektrophysiologische Signale im Implantatträger abfragen und auswerten.

Bei Herzschrittmachern (Abbildung 10) wird die physiologische Größe, d. h. die elektrische Aktivität des Herzens, direkt zur Beurteilung seiner Funktion abgeleitet und zur Steuerung der Abgabe des vom Schrittmacher erzeugten elektrischen Reizes verwendet. Durch den Einfluss elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder kann das elektrophysiologische Signal des Herzens vorgetäuscht und so die Steuerung des Schrittmachers beeinflusst werden.

Abbildung 10:
Herzschrittmacher mit angeschlossener Elektrode; Quelle: [34]



Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Herzschrittmacher, die sich in ihrer Betriebsart unterscheiden. Die Unterscheidung bezieht sich dabei in der Regel auf die Lage der Reiz- und Ableitelektrode, die je nach Indikation unterschiedlich sein kann. Grundsätzlich wird zwischen uni- und bipolaren Herzschrittmachersystemen unterschieden. Unipolare Herzschrittmacher sind störanfälliger gegenüber elektromagnetischen Feldern als bipolare, da sie nur eine Elektrode als Ableit- und Reizelektrode besitzen. Als Referenzelektrode dient das metallische Gehäuse des Schrittmachers. Zwischen Ableit- bzw. Reizelektrode, der isolierten Zuleitung, dem metallischen Gehäuse und dem Körper bildet sich eine Schleife, in der nach dem Induktionsgesetz ein magnetisches Feld eine Spannung induzieren kann. Insbesondere bei älteren Herzschrittmachern können bereits ab einer magnetischen Flussdichte von 20 µT bzw. einer elektrischen Feldstärke von 2,5 kV/m Störbeeinflussungen von unipolaren Schrittmachern hervorgerufen werden. Bipolare Schrittmacher haben im Frequenzbereich 10 Hz ‹ f ‹ 1 000 Hz eine geringere Störbeeinflussbarkeit. Diese hängt ab vom Abstand zwischen der Elektrodenspitze (Tip) und der Ringelektrode (Ring) (Tipp to Ring), der wirksamen Elektrodenlänge, dem elektrischen oder magnetischen Feld und der Feldrichtung. Sind die Elektroden so implantiert, dass der wirksame Elektrodenabstand in Feldrichtung oder der Tip-zu-Ring-Abstand der Elektrode sehr klein ist, kann die Störbeeinflussbarkeit um ein Vielfaches unter der von unipolaren Schrittmachersystemen liegen (siehe hierzu [34]). Bei großen Elektrodenabständen oder bei Tip-zu-Ring-Abständen › 1,5 cm kann die Störbeeinflussbarkeit von bipolaren Schrittmachersystemen höher als die von unipolaren sein. Aufgrund elektrischer oder magnetischer Felder kann:

- sich das Stimulationsintervall eines Schrittmachers verzögern, ohne dass ein Herzsignal dafür verantwortlich ist. Der Schrittmacherpatient wird, wenn die Aktion einmalig ist, nicht beeinträchtigt.

- der physiologische Herzrhythmus nachgebildet werden, und der Schrittmacher in einen Störbetrieb umschalten. Bei Patienten ohne herzeigenen Rhythmus führt dies zu Schwindel und Bewusstlosigkeit.

- eine spontane Impulsabgabe des Schrittmachers ausgelöst werden, obwohl der Patient eine eigene Herzaktion zeigt. Fällt der Schrittmacherimpuls in die vulnerable Phase (Aufsteigen der T-Flanke im EKG) des Herzzyklus, kann dies zu lebensbedrohlichem Kammerflimmern führen (äußerst selten).

5.2 Beschäftigte mit Körperhilfsmitteln

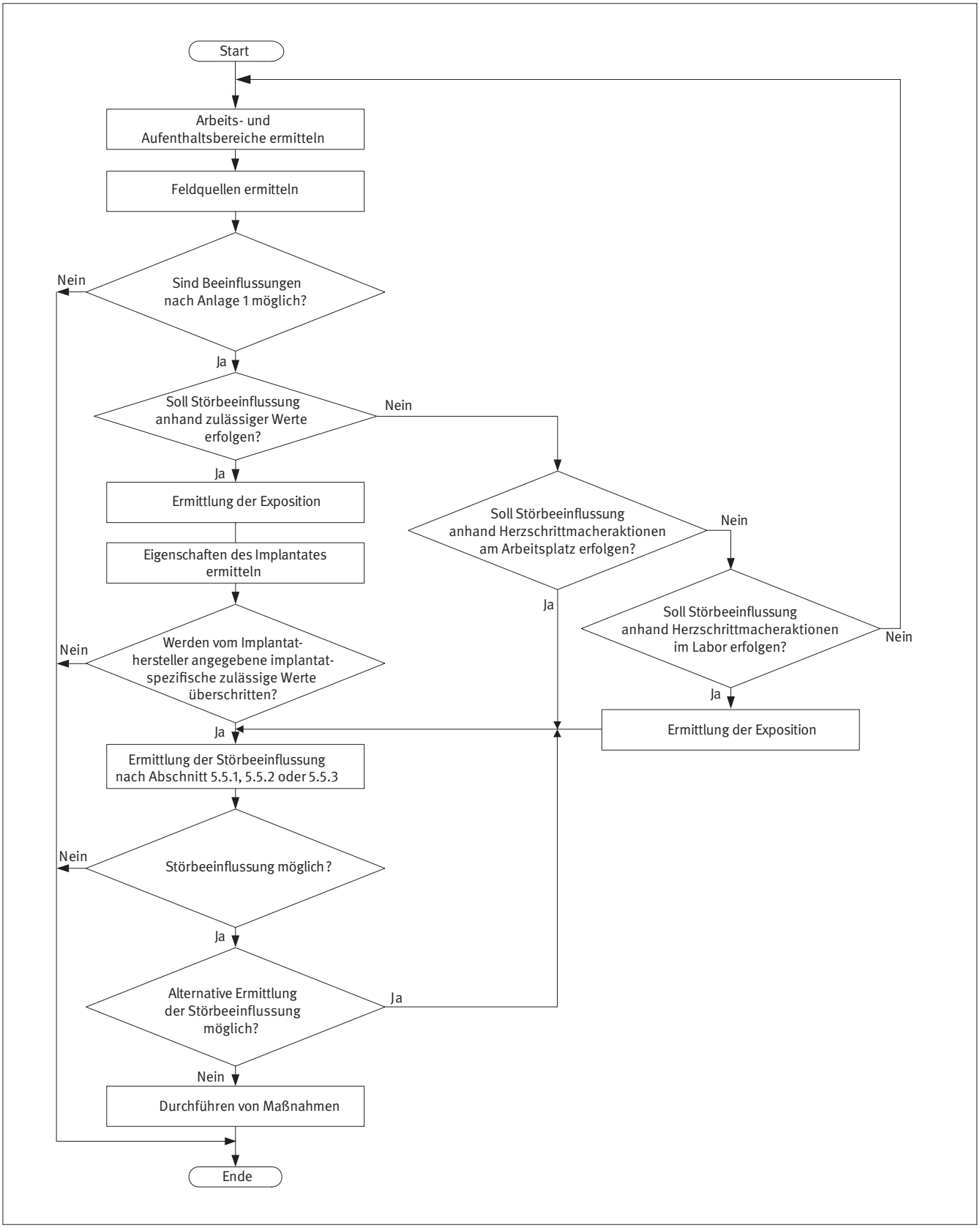
Nach der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 muss sichergestellt sein, dass bei Arbeitnehmern mit aktiven oder passiven Körperhilfsmitteln keine Funktionsstörungen der Körperhilfsmittel oder Schädigungen der Person auftreten. Nach § 12, Abs. 3 „Mittelbare Wirkungen, Körperhilfsmittel“ sind die Beschäftigten verpflichtet, den Unternehmer über das Tragen von Körperhilfsmitteln zu informieren. Dieser muss dann Maßnahmen ergreifen, um eine mögliche Gefährdung zu verhindern.

Nach dem derzeitigen Wissensstand können nachteilige Wirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder sicher ausgeschlossen werden, wenn für Beschäftigte mit passiven Implantaten, z. B. künstlichen Gelenken, die zulässigen Werte des Expositionsbereiches 2 der BGV B11 eingehalten werden. Ist das nicht der Fall, ist der Zugang zum Expositionsbereich 1 und Bereich erhöhter Exposition individuell für den Implantatträger zu regeln.

Beschäftigte mit aktiven Körperhilfsmitteln, z. B. Herzschrittmacher oder Defibrillator, dürfen nur dann uneingeschränkt tätig werden, wenn an den Arbeitsplätzen und an allen Aufenthaltsorten eine Störbeeinflussung des Implantates ausgeschlossen werden kann. Dies ist jedoch nur möglich, wenn zuvor individuell, d. h. für jeden Implantatträger, die Beeinflussbarkeit seines Implantates ermittelt und beurteilt wurde.

Eine mögliche Vorgehensweise zur Beurteilung der Beeinflussbarkeit von implantierten Herzschrittmachern wird in der BGI 5111 im Abschnitt 5 detailliert beschrieben [34; 35]. In Abbildung 11 ist diese als Ablaufdiagramm dargestellt.

Abbildung 11:
Vorgehensweise zur Beurteilung der Beeinflussbarkeit von implantierten Herzschrittmachern; Quelle: [34]



Im Rahmen einer Beurteilung sind die folgenden Arbeitsschritte auszuführen:

- Bestimmung der Arbeits- und Aufenthaltsbereiche
- Identifizierung der Feldquellen
- Ermittlung der auftretenden Exposition
- Ermittlung der Implantateigenschaften
- Bewertung der Störbeeinflussung

Zur Identifizierung relevanter Feldquellen sind im Anhang 1 der BGI 5111 Geräte und Anlagen aufgeführt, die hinsichtlich der Beeinflussung von aktiven Implantaten durch elektromagnetische Felder beurteilt wurden. Die Beeinflussung von Herzschrittmachern wird in „möglich“ und „nicht wahrscheinlich“ unterschieden. Dabei wurden Feldquellen der Rubrik „Beeinflussung möglich“ zugeordnet, bei denen unter normalen Betriebsbedingungen die von der Quelle emittierten elektromagnetischen Felder in der Lage sind, einen Herzschrittmacher zu beeinflussen. Geräte und Anlagen, bei denen die Beeinflussung eines Herzschrittmachers ausgeschlossen werden konnte oder bei denen diese nur bei besonderen Expositionsbedingungen zu erwarten war, wurden in die Rubrik „nicht wahrscheinlich“ eingeordnet.

Anhand der Eingruppierung können Anlagen und Geräte selektiert werden, sodass eine Ermittlung und Beurteilung der Exposition nur noch für relevante Feldquellen durchgeführt werden muss. Bei der Ermittlung und Bewertung der Störbeeinflussbarkeit eines Herzschrittmachers werden folgende Verfahren unterschieden:

- Vergleich der Exposition mit zulässigen Werten
- Überprüfung und Bewertung anhand der Herzschrittmacheraktion eines implantierten Herzschrittmachers mittels Untersuchungen am Arbeitsplatz
- Überprüfung und Bewertung anhand der Herzschrittmacheraktion eines implantierten Herzschrittmachers mittels Messungen im Labor

In der Regel erfolgt die Bewertung der Störbeeinflussbarkeit eines Herzschrittmachers durch Vergleich der Expositionen mit zulässigen Werten. Die zulässigen Werte werden entweder direkt oder unter Berücksichtigung individueller Implantateigenschaften wie z. B.

- der Bauart der implantierten Elektroden (uni-/bipolar)
- der eingestellten Empfindlichkeit
- der Implantationsart bzw. der wirksamen Schleifenfläche

mit den Verfahren im Normentwurf DIN VDE 0848-3-1 berechnet [29]. Führt die Anwendung dieses Verfahren zu dem Ergebnis, dass eine Störbeeinflussung des Implantates möglich ist, besteht die Möglichkeit, durch Aufzeichnung der herzeigenen Signale die Grenzen der Störbeeinflussbarkeit eines implantierten Implantates am Arbeitsplatz oder im Labor zu ermitteln.

Diese Möglichkeiten sind jedoch sehr aufwendig und werden daher nur in speziellen Fällen angewendet.

6 Messung und Berechnung von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern zum Schutz von Personen

Die Norm DIN EN 50413 (VDE 0848-1) [36] beschreibt Mess- und Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. Die Hinweise zum praktischen Vorgehen sind in dieser Norm jedoch nur allgemein gehalten und werden, wo sinnvoll, durch die folgenden Ausführungen ergänzt (siehe hierzu auch [1]).

6.1 Messung statischer Felder

6.1.1 Elektrische Felder

Zur Messung statischer Felder werden häufig Elektrofeldmeter oder Rotationsvoltmeter (Feldmühlen) eingesetzt.

Mit einem Elektrofeldmeter werden die durch das elektrische Feld influenzierten Ladungen erfasst und eine der Feldstärke proportionale Wechselspannung erzeugt. Diese wird über einen selektiven Verstärker gemessen, ohne dass dem elektrischen Feld Energie entzogen wird. Bei definiertem Potential (Erdung des Gerätes) und bekanntem Abstand des Gerätes zu einer Oberfläche kann die elektrische Spannung der Oberfläche beziehungsweise ihr Potential gegenüber Erdpotential berechnet werden (Gleichung (7)).

$$E = \frac{U}{s} \qquad (7)$$

mit

E	=	elektrische Feldstärke in V/m
U	=	elektrische Spannung in V
s	=	Abstand des Messgerätes vom Messobjekt in m

Anhand der Messergebnisse können Betriebszustände eines Materials bei der Verarbeitung abgeleitet und die Wirksamkeit einer Maßnahme überprüft werden. Bei der Messung mit einem Elektrofeldmeter sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Die richtige Messung der Feldstärke setzt ein homogenes Feld voraus.
- Der Abstand zwischen Messgerät und Messobjekt muss während der Messung konstant gehalten werden
- Bei hohen statischen Feldern muss das Messgerät geerdet werden
- Die Feldlinien greifen durch nicht leitende Stoffe hindurch. Aufgeladene Materialien können Messergebnisse beeinträchtigen, wenn sie sich hinter dem Messobjekt befinden.
- Luftfeuchte am Messort

6.1.2 Magnetische Felder

Zur Messung statischer magnetischer Felder werden üblicherweise Messsonden mit Hall-Sensoren eingesetzt. Als Messsonden werden isotrope Sonden verwendet.

Das Prinzip der Hall-Sonden beruht auf der Erzeugung von Spannungen in Halbleitern beim Vorhandensein eines äußeren Magnetfeldes. Dem sogenannten Hall-Effekt liegt die Ablenkung von Elektronen im Halbleiter durch das äußere Magnetfeld zugrunde. Durch die zur Messung notwendige Elektronenbewegung besitzen Hall-Sonden eine obere Grenzfrequenz, aber keine untere.

Bei geringen Abständen der Messsonde zur Oberfläche eines Messobjektes müssen Fehler, die aus der unterschiedlichen Lage der Sonden herrühren, beachtet werden. Um einen großen Messbereich abdecken zu können, enthält das Messsystem oft mehrere isotrop angeordnete Messsonden. Dies kann, insbesondere beim Umschalten von einem Messbereich z. B. zum nächsthöheren Messbereich, zu unterschiedlichen Messwerten führen. Der Grund dafür ist eine unterschiedliche Lage der Messsonden und damit unterschiedliche Abstände zum Messobjekt.

6.2 Messung niederfrequenter Felder

Messungen im Niederfrequenzbereich umfassen Frequenzen von $0 < f < 100$ kHz. Elektrische und magnetische Felder müssen in diesem Frequenzbereich getrennt ermittelt werden.

6.2.1 Elektrische Felder

Personen und Gegenstände in einem elektrischen Feld können zu Feldverzerrungen führen und damit die elektrische Feldstärke unzulässig beeinflussen. Bei der Messung der elektrischen Feldstärke ist daher darauf zu achten, dass solche Beeinflussungen nicht auftreten. Die Messungen dürfen daher nur am unbesetzten Arbeitsplatz durchgeführt werden.

Personen müssen einen ausreichenden Abstand zur Messeinrichtung einhalten.

Messwertaufnehmer, z. B. Feldsonden, werden daher entweder an einer Isolierstange ins Feld gehalten oder auf ein Stativ gesetzt und die Messwertübertragung erfolgt über einen Lichtwellenleiter zu einem abgesetzten Anzeigegerät.

Bei inhomogenen elektrischen Feldern sind Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Ersatzfeldstärke [36] über die Messung des Gesamtkörperableitstroms zugelassen, wenn der dabei entstehende Fehler bekannt ist. Näheres dazu siehe u. a. BGR B11 [18].

6.2.2 Magnetische Felder

Nennenswerte Verzerrungen des magnetischen Feldes sind nur durch Gegenstände aus ferromagnetischen Metallen (Stahlträger, Armierungen, Blechtüren und -bedachungen, Fahrzeuge) zu erwarten. Die Anwesenheit von Personen ändert das magnetische Feld nicht. Messgeräte können daher vom Messenden ins Feld gebracht werden.

Bei magnetischen Feldern werden die maximalen Flussdichten/Feldstärken über eine kreisförmige Fläche von 100 cm² arithmetisch gemittelt. Um Rückwirkungen von metallenen Konstruktion an Anlagen, Maschinen und Geräten zu vermeiden, sollte bei Messungen in deren Nähe ein Abstand von 20 cm zwischen dem Mittelpunkt des Messwertaufnehmers und berührbaren/zugänglichen Oberflächen eingehalten werden.

Messungen der magnetischen Flussdichte sollten möglichst bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung erfolgen. Ist dies nicht möglich, müssen die Messwerte hochgerechnet werden. Eine lineare Hochrechnung mit dem Leiterstrom ist nur möglich, wenn sichergestellt ist, dass es keine nicht linearen Einflussgrößen gibt. Falls das nicht möglich ist, z. B. an Freileitungen, können auch spezielle Feldberechungsprogramme eingesetzt werden. Felder eventuell auftretender Oberwellen sind gesondert zu ermitteln. Dies ist durch Messung der spektralen Feldverteilung oder durch Wahl entsprechender Messfilter möglich.

Bei der Bestimmung der Gesamtexposition durch verschiedene Anlagen einer Frequenz ist eine phasenrichtige Addition der Feldgrößen einer betragsmäßigen vorzuziehen. Eine Addition der Beträge führt immer zu einer konservativen Abschätzung der Gesamtexposition.

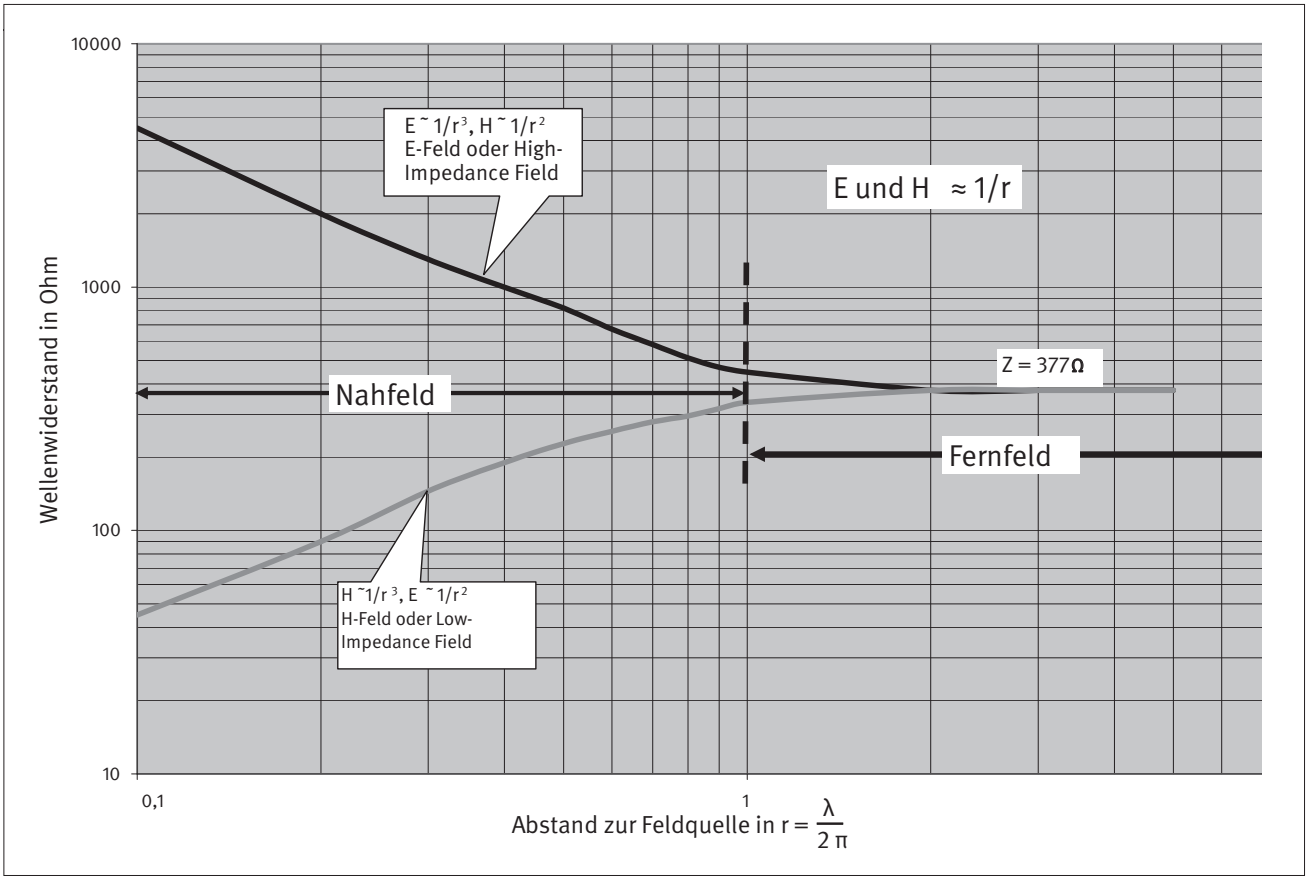
6.3 Messung hochfrequenter Felder

Hochfrequente elektromagnetische Felder werden im Frequenzbereich von etwa 100 kHz bis 300 GHz gemessen. Für die Messung und die Wahl der Messeinrichtungen sind der Abstand des Messortes zur Feldquelle und die Frequenz des zu messenden Feldes ausschlaggebend. Befindet sich der Messort im Nahfeld der Feldquelle (Abstand zur Quelle ist kleiner als die Wellenlänge des Feldes), kann es Bereiche geben, in denen das elektrische oder das magnetische Feld dominiert. Ferner ist in diesem Bereich das Verhältnis von elektrischer zu magnetischer Feldstärke nicht konstant. Abbildung 12 zeigt hierzu den Verlauf des Feldwiderstandes in Abhängigkeit von der Wellenlänge.
Für die Beurteilung der Exposition von Personen bedeutet das unterschiedliche Verhalten von E- und H-Feld, dass beide Felder getrennt gemessen werden müssen. Aufgrund der meist inhomogenen Felderverläufe des E- und des H-Feldes ist darüber hinaus zu prüfen, ob Messungen nur an einem Messort für die Beurteilung der Exposition ausreichen. Bei starken Feldstärkeschwankungen an einem Arbeitsplatz muss ggf. in unterschiedlichen Höhen oder in einem bestimmten Raster gemessen werden. Zur Beurteilung einer Ganzkörperexposition ist unter Umständen über das Körpervolumen der exponierten Person verteilt zu messen und der Höchstwert der Feldstärke zu ermitteln. Arbeitsplätze z. B. an kapazitiven Erwärmungsanlagen zum Kunststoffschweißen, trocknen von Textilien, Holz oder pharmazeutischen Produkten, befinden sich sehr oft in der Nähe der Feldquellen, sodass bei Expositionsmessungen die Besonderheiten der Nahfeldbedingungen zu beachten sind. Ferner sollten Beeinflussungen des Messergebnisses durch Personen und Gegenstände beachtet werden. Die Messungen sollten daher immer an einem unbesetzten Arbeitplatz durchgeführt werden.

Im Fernfeld einer Hochfrequenz-Feldquelle treten das elektrische und magnetische Feld nur in Kombination miteinander auf. Beide Größen stehen in einem festen Verhältnis zueinander. Sie sind über den Feldwellenwiderstand (377 Ω) bzw. die Leistungsflussdichte miteinander verknüpft und können ineinander umgerechnet werden. Zur Beurteilung der Intensität des Feldes ist es im Fernfeld daher ausreichend, wenn nur eine der beiden Feldgrößen ermittelt wird. Messung in Innenräumen sollten nur stattfinden, wenn dabei ein Abstand von 0,5 m zu Wänden, Decken, Mobiliar usw. nicht unterschritten wird. Bei den Messungen ist davon auszugehen, dass die Feldstärken im Fernfeld mit der Funktion 1/r von der Quelle abnehmen, wobei r der Abstand zur Quelle ist.

Zur Messung von Hochfrequenzfeldern kann zwischen Breitband- und frequenzselektiven Messverfahren gewählt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die mit breitbandig messenden Geräten ermittelten Ergebnisse keinen Rückschluss auf die Frequenzzusammensetzung des elektromagnetischen Feldes zulassen. Es wird lediglich die Stärke des Gesamtfeldes angegeben, die aus der über den Frequenzbereich der Sonde integrierten Hochfrequenzleistung ermittelt wurde. Für die Messungen kann zwischen Feldsonden mit unterschiedlichen Messbandbreiten bis etwa 60 GHz gewählt werden. Frequenzselektive Messungen sind erforderlich, wenn sich ein Feld aus Feldern unterschiedlicher Frequenz zusammensetzt und die Immission bei schwankender Intensität zu bestimmen ist, z. B. an Mobilfunksendeanlagen. Mit derartigen Messungen können die am Messort vorhandenen Signale frequenzabhängig separat erfasst und bewertet werden. Bei einer Summation der Einzelwerte ergibt das Ergebnis Informationen über die am Messpunkt herrschende Gesamtimmission.

Abbildung 12:
Verlauf des Feldwellenwiderstandes Z0 in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Feldquelle und dem Abstand zur Feldquelle



6.4 Messung gepulster Felder

6.4.1 Niederfrequenz

Gepulste elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder werden bei vielen industriellen Prozessen und medizinischen Verfahren zur Bearbeitung von Werkstücken oder zur medizinischen Behandlung von Personen genutzt. Für eine Expositionsbeurteilung z. B. von sinusförmigen Impulsen sind der zeitliche Verlauf des Feldes, der maximale Spitzenwert der Feldstärke, die maximale zeitliche Änderung des Feldes und die zugehörige Frequenz zu ermitteln. Bei mehrfrequenten bzw. überlagerten Impulsen oder bei komplexen Vorgängen, wie sie z. B. beim Punktschweißen auftreten, ist die Ermittlung der Feldgrößen für alle relevanten Frequenzen erforderlich. Zur Bestimmung der Feldgrößen sollten isotrop messende Messsysteme sowie den zeitlichen Verlauf des Feldes aufzeichnende Geräte verwendet werden. Mit isotrop messenden Feldsonden kann die Feldstärke an einem Messort nahezu gleichzeitig in drei Raumachsen gemessen werden. Damit entfällt die Suche nach dem Maximum am Messort z. B. durch Drehen einer Einzelachsensonde. Sind entweder die magnetischen oder elektrischen Felder dominant, kann anstelle des Feldverlaufs auch der zeitliche Verlauf des Stroms oder der Spannung zur Auswertung herangezogen werden. Detaillierte Hinweise zur Auswahl der Messeinrichtungen, Durchführung der Messung und Bewertung gepulster niederfrequenter Felder enthält die BGI 5011 [37].
Die BGI 5011 ist eine berufgenossenschaftliche Information zur Messung und Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen, die dort aufgeführten Informationen und Hinweise sind jedoch allgemein gehalten und können somit auf andere Anwendungen übertragen werden.

6.4.2 Hochfrequenz

Zur Beurteilung der Exposition von Personen gegenüber impulsförmigen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern haben sich Messungen der elektrischen Feldstärke und der Leistungsdichte etabliert. H-Feldstärkemesssysteme spielen bei der Messung gepulster hochfrequenter Felder keine Rolle. Oberhalb einer Frequenz von 1 GHz stehen keine Messsysteme zur Verfügung.

Zur Messung der Leistungsdichte werden häufig Leistungsmesser mit einem thermischen Messkopf und Hornantenne benutzt. Aufgrund der Arbeitsweise des Messsystems (thermische Auswertung der Leistung) kann dann die über die Periodendauer gemittelte Leistung bestimmt werden. Die Leistung eines Impulses selbst kann nicht gemessen werden. Diese muss entsprechend Gleichung (8) berechnet werden.

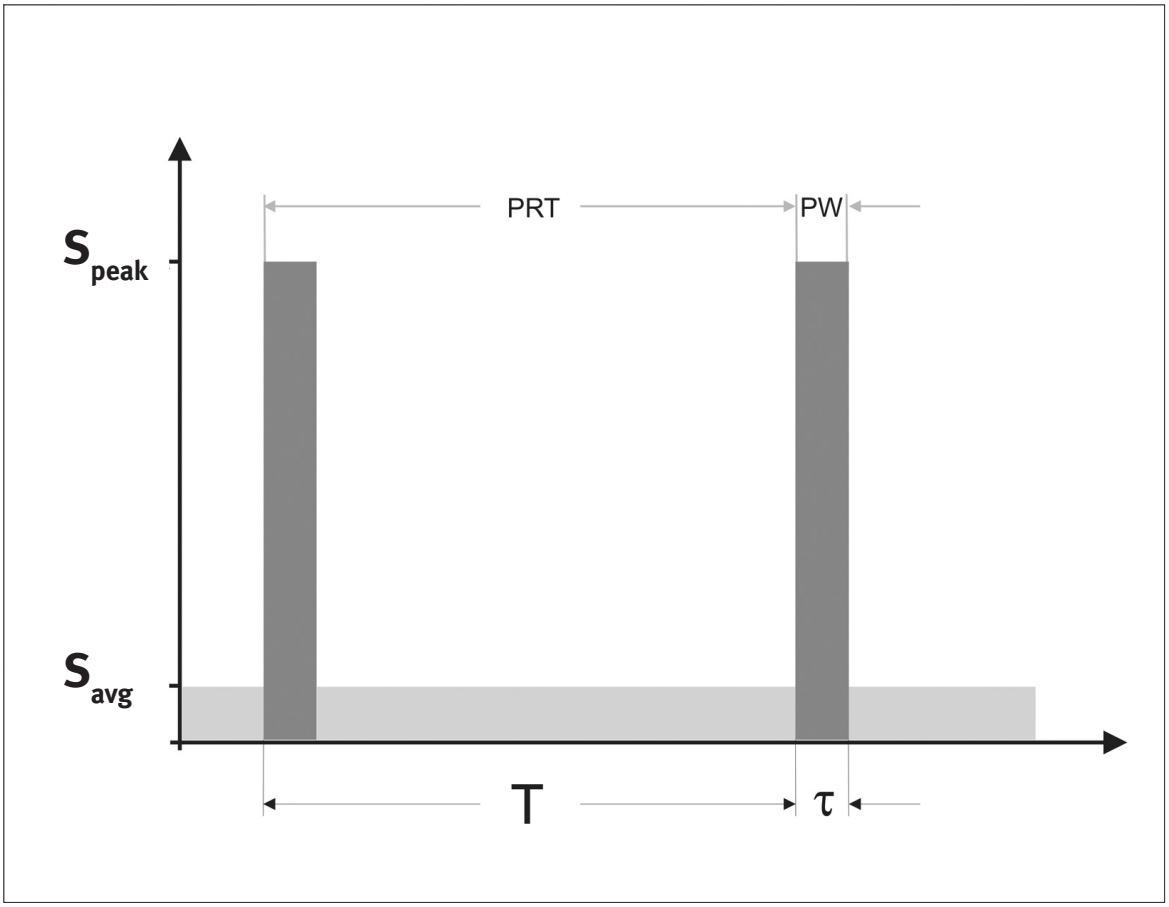
$$\text{Duty Cycle} = \frac{PW}{PRT} = \frac{\tau}{T} = \frac{P_{avg}}{P_{peak}} = \frac{S_{avg}}{S_{peak}} \quad (8)$$

mit

PW	=	Pulsbreite, Pulse width
PRF	=	Pulswiederholfrequenz, Pulse repitition Frequency
τ	=	Pulsbreite
T	=	Periodendauer
P_{peak}	=	Spitzenleistung
P_{avg}	=	Mittlere Leistung
S_{peak}	=	Spitzenwerte der Leistungsdichte
S_{avg}	=	Mittlere Leistungsdichte

Dazu müssen die Periodendauer und die Pulsbreite, d. h. das Tastverhältnis bzw. der „Duty Cycle“ der Impulse bekannt sein (Abbildung 13).

Abbildung 13:
Zusammenhang zwischen Duty Cycle, Mittelwert der Pulsleistung und Pulsbreite



Zur Bestimmung der Leistungsdichte muss darüber hinaus die Wirkfläche der Hornantenne bekannt sein. Da diese mit der Frequenz variiert, ist es zweckmäßig, nur Standard-Hornantennen zu benutzen. Für diese gibt der Hersteller in der Regel im Antennendatenblatt die Wirkfläche in Abhängigkeit von der Frequenz an, sodass die Leistungsdichte entsprechend Gleichung (9) bestimmt werden kann

$$S_{avg} = \frac{P_{avg}}{A_w} \quad (9)$$

mit

S_{avg}	=	Mittlere Leistungsdichte
P_{avg}	=	Mittlere Leistung
A_w	=	Wirkfläche der Hornantenne

Da bei der Messung gepulster Felder die Eingangsschaltungen des Messkopfes im ausgeschalteten Zustand unkontrolliert extrem belastet werden können, sollte zum Schutz des Messsystems zwischen Leistungsmesskopf und Antenne stets ein Dämpfungsglied mit einer Signaldämpfung von mindestens 10 dB eingesetzt werden.

Bei der Verwendung von Thermokoppler-Feldsonden sollte zum Schutz des Detektors die gemessene mittlere Leistung ein Zehntel des maximalen Messbereichs der Sonde nicht überschreiten.

Weiterhin muss die Trägheit (Integrationszeit) des Messsystems beachtet werden. Bei Thermokoppler-Feldsonden kann diese einige 100 ms betragen. Ist die Verweildauer des Feldes kürzer als die Integrationszeit des Messsystems, kann eine Unterbewertung des Feldes nicht ausgeschlossen werden. Diese kann jedoch verhindert werden, wenn die Verweildauer des Feldes länger ist als die Integrationszeit des Messsystems.

6.5 Durchführung der Messungen

Vor der Durchführung von Messungen müssen das Verhalten, die Eigenschaften und die Betriebsweise der Quelle bekannt sein. Dazu sind folgende Informationen einzuholen:

- Typ, Baujahr, Hersteller und technische Daten der Quelle
- Angaben zur Funktion und zum Betrieb, z. B. Zykluszeit, Einschaltdauer, Anzahl der Arbeitsvorgänge pro Schicht
- Bestimmung der Frequenz, ggf. Ermittlung des zeitlichen Feldverlaufs der von der Quelle emittierten Felder
- Ermittlung von Betriebs- und Lastbedingungen, Betriebsart, Anzahl der Feldquellen
- Ermittlung der Expositionsbedingungen (Ganzkörper-/ Teilkörperexposition), Anzahl der exponierten Personen, Expositionszeiten, Aufenthaltsorte, Körperhaltungen
- Abschätzung der zu erwartenden Exposition
- Auswahl der geeigneten Messverfahren, Messgeräte, Feldsonden

Ferner sollten die Aussendungseigenschaften und die Umgebungsbedingungen der Quellen vor der Messung bekannt sein. Die notwendigen Erkenntnisse können beispielsweise aus den Ergebnissen einer orientierenden Messung gewonnen werden.

Bei der Durchführung von Feldmessungen sind die Besonderheiten von statischen, nieder- und hochfrequenten elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern zu beachten. Während der Messungen muss darauf geachtet werden, dass die Expositionsgrenzwerte im Aufenthaltsbereich des Messpersonals nicht überschritten werden. Die Messungen sind möglichst bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; anderenfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen. Treten am Messort gleichzeitig Felder von mehr als einer Feldquelle auf, ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Sind die Grenzwerte für die Quellen im zu untersuchenden Frequenzbereich gleich, können die resultierenden Feldstärken mit breitbandigen Messeinrichtungen direkt gemessen werden.
- Arbeiten die Feldquellen in Frequenzbereichen mit unterschiedlichen Grenzwerten, darf mit breitbandigen Geräten nur bei Einzelbetrieb der Feldquellen gemessen werden. Anderenfalls sind frequenzselektive Messsysteme einzusetzen oder der niedrigste im Frequenzbereich vorkommende Grenzwert zur Bewertung heranzuziehen. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die Bandbreite des Messgerätes ausreichend ist, damit alle infrage kommenden Frequenzen gemessen werden können. Ferner muss die gewählte Beobachtungsdauer genügend lang sein, damit die maximalen Spitzen-/Effektivwerte erfasst werden.
- Bei Verwendung von einachsigen Feldsonden oder Messantennen mit ausgeprägter Richtcharakteristik sollte die Messung durch Abtastung des Raumes in Schritten mit dem Öffnungswinkel der Antenne unter Berücksichtigung der Polarisation mit anschließender Berechnung der Feldstärke (Raumintegral) durchgeführt werden.

Die Messergebnisse, Messbedingungen, Betriebszustände und die Messorte sind für die Auswertung der Messergebnisse zu protokollieren.

6.6 Messorte und Messpunkte

Messorte und Messpunkte sollten unter Berücksichtigung der individuellen Expositionssituationen eines Beschäftigten ausgewählt und festgelegt werden. Dabei sollten z. B. die Tätigkeit, Arbeitspositionen und der Aufenthaltsort berücksichtigt werden. Die Anzahl der Messpunkte muss ausreichen, um alle für die Bewertung der Exposition relevanten Feldparameter zu erfassen.

Die Lage des Messortes sollte durch Entfernungsangaben zu mindestens zwei Bezugspunkten und/oder Bezugslinien in horizontaler Ebene angegeben werden. Messpunkte werden am jeweiligen Messort durch die Höhenangabe festgelegt. Bei inhomogenen Feldern sind Messungen an mehreren Messorten sinnvoll. Häufig ist es ausreichend, wenn in drei Höhen gemessen wird. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen, wird die Verwendung einheitlicher Messpunkthöhen empfohlen. Bei sitzender Tätigkeit ist es ausreichend, wenn in 0,45 m, 0,90 m und 1,55 m Höhe über der Standfläche gemessen wird.

Bei Messungen niederfrequenter Felder im Freien unter Hochspannungsleitungen genügt es im Allgemeinen, in einer Höhe von 1 m über Standfläche und bei Erdkabeln in einer Höhe von 20 cm zu messen. Bei Messung homogener und reflexionsarmer Felder ist im Bereich über 100 kHz eine Messhöhe von 1,5 m zu verwenden.

6.7 Messbericht

Zu den Messungen ist grundsätzlich ein verständlicher und transparenter Messbericht anzufertigen. Dies bedeutet, dass klar nachvollziehbar sein muss, wie die Messwerte und daraus die Ergebnisse ermittelt wurden. Ebenso müssen die getroffenen Annahmen und Verfahren zur Fehlerabschätzung und zu eventuellen Hochrechnungen auf höchste betriebliche Anlagenauslastung nachvollziehbar sein.

Der Messbericht sollte möglichst übersichtlich gegliedert sein und die folgende Punkte enthalten:

- Messauftrag mit Anlass und Hintergrund der Untersuchung
- eindeutige Identifizierung des Messberichts
- Auftraggeber, Auftragnehmer mit Anschriften und Kontaktpersonen

- gesetzliche Grundlagen und Messvorschriften
- Angaben zu Messzeit, Messort (Fotos, evtl. Begründung für den Ort) und beteiligte Personen
- Wetterverhältnisse
- Beschreibung der eingesetzten Messgeräte (Art, Bezeichnung, Hersteller, Seriennummer, Datum der letzten Kalibrierung)
- Angaben zur betrachteten Feldquelle im Fall von speziellem Anlagenbezug (Betreiber, Kanalzahl, ggf. Frequenzinformationen, Betriebszustand der Anlagen usw.)
- Angaben zur Messunsicherheit
- Angaben zum Messvorgang (Messverfahren, welche Immissionen wurden gemessen, usw.)
- Messdaten
- angewandte Formeln und Grenzwerte
- Darstellung der mit Formeln, Grenzwerten und Messdaten erhaltenen Ergebnisse.

Ergebnisse aus Berechnungen müssen anhand der Angaben des Messberichts jederzeit nachvollziehbar sein. Dabei müssen aber nur solche Angaben erhoben werden, die für die fragliche Messaufgabe relevant sind. So ist auch die Angabe von klimatischen Bedingungen für bestimmte Messaufgaben erforderlich.

6.8 Messung von eingekoppelten hochfrequenten Körperströmen

Hochfrequente Körperströme können über zwei Wege in den menschlichen Körper eingekoppelt werden:

- beim Berühren eines metallischen Objektes, das sich in einem elektromagnetischen Feld befindet
- durch Induktion oder Influenz, wenn der menschliche Körper selbst einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt ist.

Die Messung der durch Influenz oder Induktion erfolgten Körperdurchströmung kann mit geeigneten Stromwandlerzangen oder Parallelplatten-Strommessgeräten erfolgen.

Ströme in den Extremitäten, z. B. Arme und Beine, werden bevorzugt mit einer Stromwandlerzange gemessen. Üblicherweise entspricht die Stromwandlerzange einer Rogowskispule [38]. Die Messspule ist auf einen segmentierten Ringferrit gewickelt, der zum An- bzw. Ablegen geöffnet und geschlossen werden kann. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass kein Luftspalt an den Verschlussstellen des Ringferrits, z. B. durch Kleidung, entsteht.

Bei der Auswahl der Stromwandlerzange ist auf den richtigen Frequenzbereich zu achten. Die Spule ist nur für einen bestimmten Frequenzbereich ausgelegt, der durch die untere und obere Grenzfrequenz f_u und f_o festgelegt ist.

Während der Messung ist auf die richtige Ankopplung des Messobjektes zum Boden zu achten.

Kontaktströme werden bevorzugt mit einem Parallelplatten-Strommessgeräte erfasst. Zur Messung stellt sich die Person auf die obere Platte des Messgerätes. Während der Messung ist auf eine gute Ankopplung des Messgerätes zum Boden zu achten [17; 18; 36].

7 Berechnung elektrischer und magnetischer Felder

7.1 Berechnungsverfahren

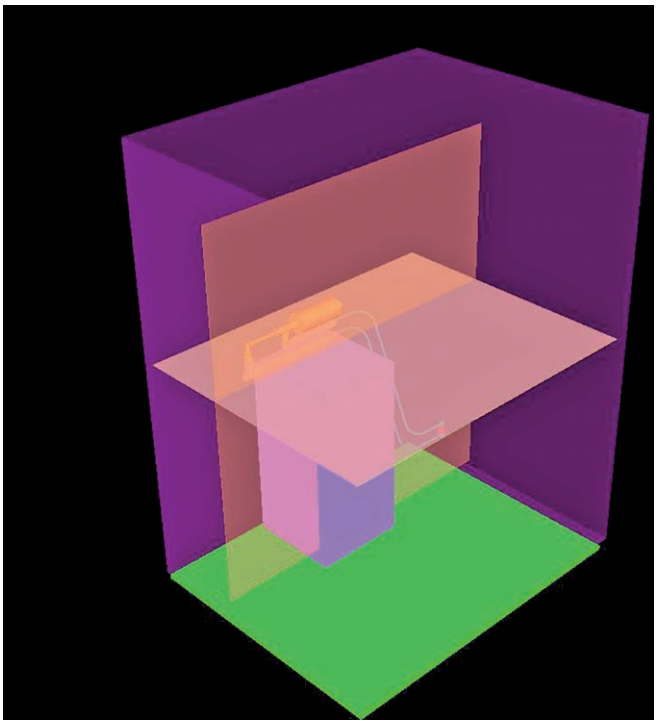
Bei komplexen oder unzugänglichen Strukturen steht man schnell vor dem Problem, dass elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder durch physikalische Messung nicht untersuchbar sind. Können die Strukturen jedoch extrem vereinfacht werden, z. B. bei einfachen Antennenstrukturen im freien Raum, Hochspannungsfreileitungen oder Widerstandsschweißeinrichtungen, weisen in der Regel die Ergebnisse aus analytischen Feldberechnungen eine ausreichende Genauigkeit für die Expositionsbeurteilung einer Person auf. Ist eine Vereinfachung komplexer Strukturen nicht möglich oder sind Beurteilungen der Wirkungen elektromagnetischer Felder im lebenden menschlichen Körper durchzuführen, sind Messungen und analytische Berechnungen von Feldgrößen schwierig oder nicht möglich. Um derartige Probleme zu lösen, haben sich numerische Berechnungsverfahren durchgesetzt. Es existieren verschiedene numerische Feldberechnungsverfahren zur Bestimmung von Feldverteilungen, induzierten Körperströmen und elektrischen Feldstärken sowie der spezifischen Absorptionsrate im biologischen Gewebe. Die gängigsten Verfahren/Methoden werden in zwei Hauptgruppen unterteilt [39]:

- Feldtheoretische Verfahren
  - Momentenmethode (MOM)
  - Finite-Elemente-Methode (FEM)
  - Finite-Differenzen-Methode (FDM)
  - Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD, Abbildung 14)
- Optische Verfahren
  - Physikalische Beugungstheorie (PTD)
  - Physikalische Optik (PO)
  - Geometrische Beugungstheorie (GTD)
  - Geometrische Optik (GO)

Die feldtheoretischen Verfahren basieren auf der Lösung der Maxwellschen Feldgleichungen, während die optischen Verfahren die Theorie aus der Optik anwenden.

Die aufgeführten strahlenoptischen Modelle werden zur Berechnung von Feldverteilungen in großen räumlichen Gebieten eingesetzt (Funknetzplanung). Hier können feldtheoretische Verfahren z. B. aufgrund begrenzter Rechenleistung nicht angewendet werden.

Abbildung 14:
Modellbeispiel zur Berechnung des Verlaufs der magnetischen Flussdichten nach der FDTD-Methode



Feldtheoretische Verfahren werden bevorzugt zur Berechnung von Feldverteilungen kleinerer Raumbereiche und bei der Berechnung der Einkopplung elektromagnetischer Felder in komplexen Strukturen wie dem menschlichen Körper benutzt. Letzteres ist jedoch nur sinnvoll bei Einbindung inhomogener Körpermodelle, d. h. Modelle, die aus unterschiedlichen, nach anatomischen Gesichtpunkten angeordneten Gewebearten zusammengesetzt sind. Hierzu gehört auch, dass die elektrischen Eigenschaften des Gewebes z. B. in Abhängigkeit von der Frequenz berücksichtigt werden.

7.2 Berechnung der induzierten Körperstromdichte, elektrischen Feldstärke und der spezifischen Absorptionsrate (SAR)

7.2.1 Körpermodelle

Für die Bestimmung der durch ein äußeres elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld induzierten Körperstromdichten oder elektrischen Feldstärken bzw. der absorbierten hochfrequenten Energie (spezifische Absorptionsrate SAR) verwendet man verschiedene Körpermodelle. Generell wird zwischen homogenen und anatomischen Körpermodellen unterschieden.

7.2.2 Homogene Körpermodelle

Homogene Körpermodelle verwenden vereinfachte Körperformen mit homogener Leitfähigkeit. Sie bestehen meist aus gestreckten Kugelformen (Sphäroiden), einfachen Scheiben- oder Würfelformen (Kuben). Die dielelektrischen Eigenschaften solcher Modelle entsprechen vielfach den bei den untersuchten Frequenzen auftretenden Ganzkörper-Mittelwerten. Sie können aber für bestimmte untersuchte Körperteile oder Gewebearten repräsentativ sein.

Die Verwendung derartiger Modelle eignet sich besonders zur Validierung einer Berechnung. Die exakte Nachbildung der menschlichen Anatomie ist hierfür vielfach zu komplex und gibt letztendlich auch immer nur die Verhältnisse eines speziellen Individuums an. Aufgrund einfacher Geometrien können Expositionssituationen leicht modelliert werden. Bei einer solchen Modellierung sollte die Position des Modells mit der entsprechenden Position eines menschlichen Körpers während der untersuchten Expositionssituation berücksichtigt werden [40].

7.2.3 Anatomische Körpermodelle

Es gibt eine Vielzahl von anatomischen Körpermodellen, die in numerischen Feldberechnungsprogrammen als Datensatz zur Berechnung induzierter Körperströme oder elektrischer Feldstärken eingebunden werden können. Sie basieren auf medizinischen Aufnahmen oder anatomischen Querschnittsdiagrammen. Beispiele von anatomischen Körpermodellen sind in Tabelle 9 aufgeführt. Abbildung 15 zeigt ein Beispiel für ein inhomogenes Körpermodell (KM) und einen Schnitt in der Frontalebene durch das KM.

Tabelle 9:
Beispiele von anatomischen Modellen [40]

Modell	Beschreibung	Quelle
Visible Man	Digitaler Bildsatz eines vollständigen Mannes	National Library of Medicine, USA
MEET Man	Weiterverarbeitung des Visible Man zu einem Volumendatensatz, 40 Gewebearten	Institut für Biomedizinische Technik, Universität Karlsruhe
Hugo	Weiterverarbeitung des Visible Man zu 3D-Volumen-Oberflächendatensatz, 40 Gewebearten	View Tec, Schweiz
Norman	Aus medizinischen Bilddaten entwickeltes 3D-Gitter aus Voxeln, 37 Gewebearten	Health Protection Agency, Centre for Radiation and Environmental Hazard, UK
Universität Utah	Auf Magnetresonanztomografie (MRI)-Aufnahmen beruhendes anatomisches Voxelmodell, 31 Gewebearten	Department of Electrical and Computer Engineering, USA
Universität Victoria	Voxelmodell, bis zu 128 Gewebearten	Department of Electrical and Computer Engineering, USA
Japanische Modelle	Auf MRI-Aufnahmen beruhendes anatomisches männliches und weibliches 2-mm-Voxelmodell, 51 Gewebearten	National Institute of Information and Telecommunication, Japan

Die Mehrzahl der zurzeit verfügbaren dreidimensionalen anatomischen Computermodelle beruhen auf den Datensatz des „Visible Man“ aus dem Projekt des „Visible Human“ der National Library of Medicine in Maryland, USA. Das Modell wurde durch Magnetresonanztomografie und Gewebeschnittbilder, entlang der Längsachse im Abstand von 1mm, entwickelt. Die Gewebe und Organe sind nach anatomischen Gesichtspunkten angeordnet. Je nach Modell wird etwa zwischen 40 bis 128 Gewebearten unterschieden. Die Eigenschaften der einzelnen Gewebearten variieren mit der Frequenz. So nehmen mit steigender Frequenz die Permittivität des Gewebes ab und die spezifische elektrische Leitfähigkeit zu. Die Algorithmen hierzu wurden für einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 20 GHz entwickelt. Sie basieren auf den Arbeiten von *C. Gabriel* [41]. Zur Berechnung der induzierten Feldgrößen muss der entsprechende Algorithmus im Feldberechnungsprogramm integriert sein [42].

Für räumlich detaillierte Untersuchungen der Expositionssituationen und der Wirkung äußerer Felder im Menschen werden hochauflösbare numerische Rechenmodelle des menschlichen Körpers benötigt. Zur Orientierung und Abschätzung der Exposition im Gewebe reicht allerdings eine grobe räumliche Auflösung des Körpermodells von etwa 6 bis 10 mm aus. Für eine Expositionsbeurteilung in einer speziellen Gewebeart, wie ZNS oder Herz, sind feinere Auflösungen erforderlich. Je nach Gewebestruktur kann zur Auswertung induzierter Feldgrößen bzw. Stromdichten eine räumliche Auflösung des Gewebes unter 1 mm notwendig sein [38].

Abbildung 15:
Beispiel für ein homogenes Körpermodell mit 42 unterschiedlichen Gewebearten und Gewebestrukturen bei Schnitt in der Frontalebene

7.3 Unsicherheiten und Grenzen der Einsetzbarkeit

Untersuchungen zu den Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder in unterschiedlichen Gewebestrukturen sind gegenwärtig nur durch aufwendige numerische Rechenverfahren möglich. Aufgrund der damit verbundenen Vielfältigkeit ist die Anzahl der Unsicherheitsquellen relativ groß. Die Größe bestimmen die Methode des Feldberechnungsprogramms und die von der Modulierung der Feldquelle und der dielektrischen Strukturen des Körpermodells herrührenden Einflüsse. Aufgrund beschränkter Rechnerressourcen sind immer Vereinfachungen bei der Modellerstellung der Expositionsquelle und der exponierten Objekte notwendig.

Die bei Anwendung numerischer Verfahren zur Feldberechnung erreichbaren Unsicherheiten können bei sorgfältiger Modellierung des Expositionsszenarios in der gleichen Größenordnung liegen wie messtechnisch erreichbare Unsicherheiten. Unsicherheitsfaktoren, die auf das gewählte Körpermodell zurückgeführt werden können, rühren beispielsweise her von

- dessen Körperabmessungen und Körperformen
- der anatomischen Auflösung des Modells (Anzahl der unterschiedlichen Gewebearten, Schichtdicke der Gewebe)
- den dielektrischen Gewebeeigenschaften (Entwicklungsstadium und Zustand des Gewebes)

7.4 Anwendungskriterien

Die Genauigkeit berechneter Ergebnisse hängt davon ab, wie gut Feldquellen und Randbedingungen in den Berechnungsprogrammen beschrieben werden. Für jedes Programm und jeden Typ von Feldquelle muss daher mindestens einmal eine Vergleichsmessung vorgenommen worden sein. Speziell bei komplexen Randbedingungen müssen stichprobenhafte messtechnische Überprüfungen die Richtigkeit eines Modells sicherstellen. Rechnungen mit ausreichender Genauigkeit sind nur mit den jeweiligen spezifischen Daten des Betreibers der einzelnen Feldquelle durchführbar. Streufelder, wie sie am Arbeitsplatz häufig auftreten, können in der Regel nicht berechnet werden.

8 Anwendungen, Berechnungsmethoden, Messergebnisse

Die Anwendungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder im beruflichen Alltag sind sehr vielseitig. Nahezu in allen Bereichen des Arbeitslebens sind Personen an ihren Arbeitsplätzen Feldern elektrischen Ursprungs ausgesetzt. Damit die Schutzanforderungen der Richtlinien, Vorschriften, Normen und Regeln angewendet, überprüft bzw. eingehalten werden können, müssen die Feldquellen und deren Eigenschaften sowie die Expositionsbedingungen am Arbeitsplatz bekannt sein. Nachfolgend werden beispielhaft typische Feldquellen in Anlagen, Maschinen und Geräten erläutert und deren typische Strahlungsemissionen sowie Expositionswerte angegeben. Wenn keine Angaben zur Herkunft der Messwerte gemacht werden, basieren die Angaben auf Messergebnissen des IFA. Anhand der Werte können bei einem Vergleich mit den Basis- und abgeleiteten Werten der Tabellen 5, 6 und 8 die Relevanz der Feldquellen beurteilt und die unwesentlichen Feldquellen von den wesentlichen getrennt werden. Im Weiteren ist dann eine Konzentration auf die wesentlichen Feldquellen möglich.

8.1 Aluminiumelektrolyse- und Galvanotechnikanlagen

Derartige Anlagen (Abbildung 16) werden in der Regel über Mehrfachsammelschienen versorgt. In den Leitern zu Aluminiumelektrolysezellen sind Nennströme von mehr als 200 kA möglich. Unmittelbar an den Sammelschienen können magnetische Gleichfelder mit einer Flussdichte von mehr als 100 mT auftreten.

Abbildung 16:
Schaltschrank an einer Elektrolyseanlage

In Anlagen der Galvanotechnik sind die Ströme um einige Größenordnungen kleiner. Die Nennströme derartiger Anlagen betragen etwa 2 bis 10 kA. Im Bereich der Galvanikbäder können in der Nähe der stromführenden Leiter im Aufenthaltsbereich von Personen magnetische Flussdichten bis zu 4 mT auftreten [43; 44]. Für eine Abschätzung der in diesen Anlagen in der Nähe der Leiter zu erwartenden magnetischen Flussdichte können bei Einzelleiter- und Zweileiterinstallation (Hin- und Rückleiter) die Gleichungen (10) und (11) angewendet werden:

für Einzelleiter

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \qquad (10)$$

für Hin- und Rückleiter

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \qquad (11)$$

mit

B	=	magnetische Flussdichte in Vs/m^2
μ	=	Permeabilität in Vs/Am
I	=	Nennstrom im Leiter in A
a	=	Leiterabstand in m
r	=	Abstand zum Leiter in m

8.2 Elektroenergieanlagen

8.2.1 Netzstationen

Netzstationen, auch Trafo- oder Umspannstation genannt (Abbildung 17), sind entweder konventionell gemauert oder werden als Fertigbausstation bzw. als Kompaktstation aufgestellt, um elektrische Energie aus dem Mittelspannungsnetz (10 bis 30 kV) auf das Niederspannungsnetz (400 V/230 V) zu transformieren. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Mittelspannungsschaltanlage, einem Transformator und einer Niederspannungsverteilung. Im Gegensatz zu Umspannwerken und Hochspannungsschaltanlagen stehen sie in Betrieben oft in unmittelbarer Nähe eines Arbeitsbereiches oder sind in Bürogebäude integriert. Neben der Feldbelastung innerhalb einer Station ist daher auch die äußere Belastung von besonderem Interesse. Aufgrund der gegenüber elektrischen Feldern schirmenden Wirkung der Wände ist außerhalb einer solchen Anlage nur das magnetische Feld, d. h. die magnetische Flussdichte, relevant.

Abbildung 17:
Netzstation in einem Wohngebiet

Als mögliche Magnetfeldquellen werden unterschieden

- Mittelspannungs-Schaltanlage
- Niederspannungs-Schaltanlage
- Transformator
- Kabelverbindung vom Transformator zur Niederspannungs-Schaltanlage.

An Mittelspannungs-Schaltanlagen treten bei gekapselten Schaltfeldern in den üblichen Aufenthaltsbereichen der Beschäftigten wegen der großen Abstände zu den stromführenden Baugruppen und Stromverteilern (Sammelschienensysteme, Einzelleiter) geringe magnetische Felder auf. Die höchsten magnetischen Flussdichten werden in der Regel im Bereich der Einspeisung am Hauptschalter gemessen. Der typische Wert der magnetischen Flussdichte beträgt hier etwa 10 µT. Der Beitrag von Mittelspannungsschaltanlagen zum Feld außerhalb von Netzstationen ist meist vernachlässigbar. Als Magnetfeldquelle dominiert in einer Netzstation die Niederspannungsanlage mit der Kabel- oder Sammelschienenverbindung zwischen der Einspeisung in die Schaltanlage und den Sekundäranschlüssen des Transformators [45].

Die magnetische Flussdichte für derartige Anlagen kann durch Vereinfachung und Rückführung auf einfache Stromleiteranordnungen in Abhängigkeit von der Belastung berechnet werden. Spezielle Hinweise hierfür sind in [46] enthalten.

Stark vereinfacht können diese Anlagenteile wie ebene Dreileiteranordnungen behandelt werden. Der maximale Effektivwert der magnetischen Flussdichte in senkrechter Ebene zur Leiteranordnung ergibt sich nach Gleichung (12) zu

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\frac{r}{a} + \frac{a}{r}} \qquad (12)$$

mit

B = magnetische Flussdichte in Vs/m²
μ_0 = Induktionskonstante 1,257 · 10^{-6} Vs/Am
I = Nennstrom in A
r = Abstand zur Leiteranordnung in m
a = Leiterabstand in m

Für Transformatoren ist anhand Gleichung (13) eine Abschätzung der magnetischen Feldstärke möglich. Die Gleichung gilt im Normalfall nur für Trockentransformatoren. Bei der Anwendung auf flüssigkeitsgefüllte Transformatoren ergeben sich bei der Berechnung Werte, die um einen Faktor zwei bis drei höher sind [47]. Die magnetische Flussdichte eines Trockentransformators berechnet sich nach [47] wie folgt:

$$H = 100\ \text{A/m} \cdot \frac{u_k}{6\ \%} \cdot \sqrt{\frac{P_N}{630\ \text{kVA}}} \cdot \left(\frac{0{,}5\ \text{m}}{r}\right)^2 \qquad (13)$$

mit

H = magnetische Feldstärke in A/m
u_k = Kurzschlussspannung des Transformators in %
P_N = Nennleistung des Transformators in kVA
r = Abstand zum Transformator in m

Berechnungen und Messungen zeigen, dass die magnetische Flussdichte mit steigendem Abstand zur Feldquelle stark abnimmt. Beispielsweise wurden in unmittelbarer Nähe einer 1 000-kVA-Trafostation nicht mehr als 100 µT gemessen. In einem Abstand von 2 m betrug die magnetische Flussdichte nicht mehr als 10 µT. Beispielhaft ist in den Abbildungen 18 und 19 der Verlauf der magnetischen Flussdichte für eine 400-kVA-Netzstation dargestellt. Abbildung 18 zeigt die Verteilung der magnetischen Flussdichte innerhalb der Netzstation, berechnet mit der Simulationssoftware „WinField“ [48]; in Abbildung 19 ist, bezogen auf die Lage der Stromschienen, der Feldverlauf außerhalb der Netzstation schematisch dargestellt.

Die Abbildungen 18 und 19 zeigen weiterhin, dass bei ungünstiger Anordnung bzw. Verlegung die Kabelverbindung zwischen Transformator und Niederspannungsverteilung den größten Einfluss auf das magnetische Feld haben kann [45]. Sind Teile der Niederspannungsanlage in einer Netzstation benachbart zu angrenzenden Räumen aufgestellt, können nicht zu vernachlässigende Felder an den Außenwänden der Netzstation auftreten, sodass Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition von Beschäftigten erforderlich werden können (z. B. Abstandsvergrößerung). In unmittelbarer Nähe der Feldquellen z. B. an den Stromschienen zum Transformator können magnetische Flussdichten von mehr als 10 mT auftreten. Die Stärke des Magnetfeldes ändert sich allerdings mit der Leistung und Belastung des Transformators sowie der Entfernung einer Person zur Feldquelle.

Abbildung 18:
Verteilung der magnetischen Flussdichte innerhalb einer Netzstation; Quelle: [32]

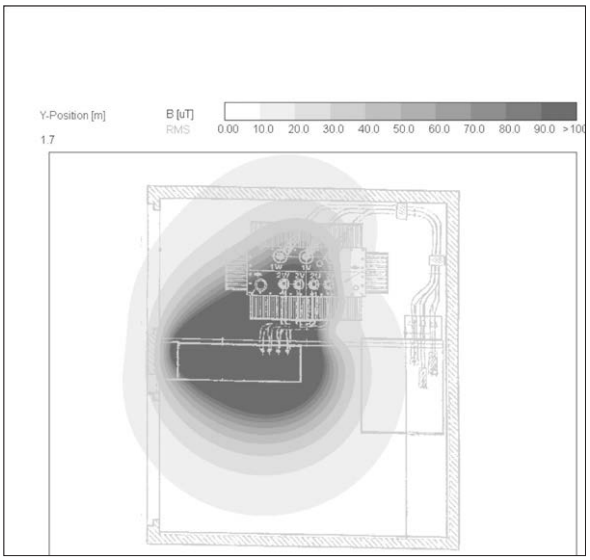
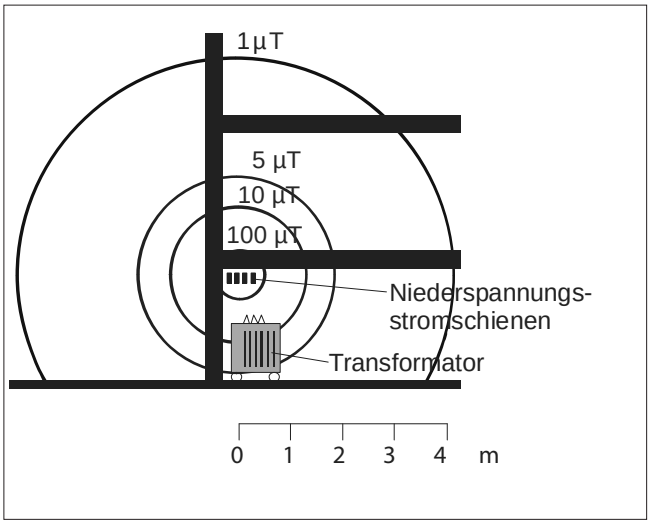


Abbildung 19:
Schematischer Verlauf des magnetischen Feldes außerhalb einer Netzstation; Quelle: [29]



An Niederspannungs-Verteilungsanlagen treten, wie bei der Mittelspannungsschaltanlage, die höchsten Felder im Bereich der Einspeisung auf. Die magnetische Flussdichte kann sich jedoch um ein bis zwei Größenordnungen unterscheiden. An offenen Schaltanlagen können in der Nähe der Hauptschalter magnetische Flussdichten von einigen 100 µT auftreten. Der Feldverlauf an Niederspannungs-Verteilungsanlagen wird jedoch stark von der Lage der Einspeisung bestimmt. Maßnahmen, die zu einer Reduzierung der magnetischen Flussdichte an Niederspannungsverteilung führen, sind, wie in [49; 50] aufgeführt:

- Symmetrierung der Einspeisung, die Einspeisung erfolgt nicht seitlich, sondern in der Mitte der Sammelschienen
- Phasenoptimierte Einspeisung, in der Mitte der Sammelschiene erfolgt eine doppelte Einspeisung mit umgekehrter Phasenfolge
- Gleichmäßige Lastverteilung, starke Verbraucher sollten möglichst nah an den Abgängen angeschlossen werden, die der Einspeisung am nächsten liegen.
- Verringerung des Abstandes der Sammelschienen untereinander

8.2.2 Hochspannungsanlagen

Unterhalb einer Hochspannungsfreileitung verbleiben infolge unterschiedlicher Abstände Restfelder, deren Feldstärken bestimmt werden durch

- Spannung und Stromstärke
- Mastbild und Anordnung der Leiter
- Leiterhöhe über Boden und
- Entfernung von der Leitungsachse.

Die höchsten Feldstärken treten am Erdboden in der Spannfeldmitte zwischen zwei Masten auf, d. h. dem Ort des geringsten Bodenabstandes der Leiterseile. Unabhängig von zeitlichen Schwankungen fallen beide Felder zu beiden Seiten der Leitungsachse schnell ab. Die Feldverteilungen werden als Querprofil jeweils 1 m über dem Erdboden beschrieben (siehe Abbildung 20). Die Höchstwerte der Feldstärken in Freiluftanlagen, Freileitungen und Kabeln sind für die in der Bundesrepublik Deutschland üblichen Spannungsebenen in Tabelle 10 angegeben [51].

Abbildung 20:
Beispiel für ein Querprofil der magnetischen Flussdichte unter verschiedenen Hochspannungsleitungen 1 m über dem Erdboden; Quelle: [33]

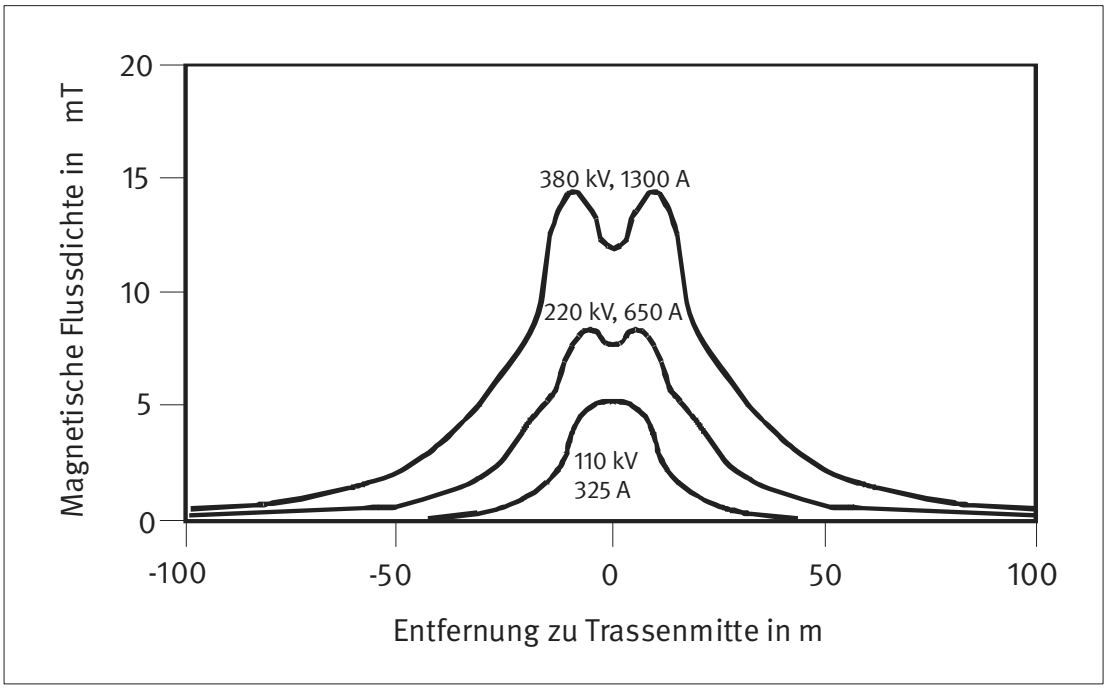


Tabelle 10:
Höchstwerte des elektrischen und magnetischen Feldes in Hochspannungs-Freiluftanlagen; Quelle: [51]

Hochspannungsanlagen		Höchstwerte	
		elektrisches Feld E in kV/m	magnetisches Feld B in µT
Freiluftanlagen und Freileitungen	380-kV-Station	15	300
	380-kV-Leitung	10	30
	110-kV-Leitung	3	20
	10-kV-Leitung	0,5	6
Kabel	Kabel für Betriebsspannungen › 1 kV	annähernd Null	100

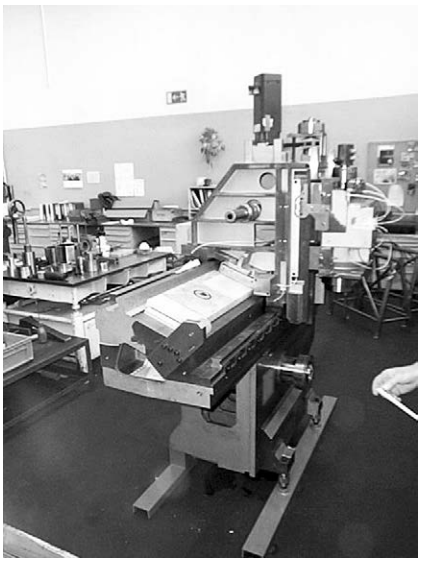
8.3 Motore, Antriebe

8.3.1 Asynchronmotore

Elektromotore sind meist die zentralen Komponenten eines elektrischen Antriebs. Im motorischen Betrieb dienen sie als Energiewandler, die zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie umsetzen. Aus dem industriellen Maschinenbau sind sie nicht mehr wegzudenken. In Verbindung mit elektronischen Antriebssteuerungen finden sie immer weitere Verbreitung und ihre Anzahl wächst ständig. Asynchronmotore mit Kurzschlussläufer zählen zu den am weitest verbreiteten Motortypen. Sie können mit und ohne Stellgerät am Drehstrom- oder Wechselstromnetz betrieben werden. Aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und ihrer geschlossenen Bauweise gelangen magnetische Streufelder nur in geringem Maße nach außen. Beispielsweise wurde auf einem Braunkohlebagger an der Oberfläche des 900-kW-Schaufelradmotors (Abbildung 21) bei Volllast eine magnetische Flussdichte von ca. 120 µT gemessen. Am Motoranschlusskasten und an der Kabeleinführung kann je nach mechanischer Ausführung die magnetische Flussdichte oberhalb der zulässigen Werte liegen. In den üblichen Aufenthaltsbereichen der Beschäftigten, sprich bei Abständen zwischen 20 und 50 cm, beträgt die magnetische Flussdichte nur noch wenige µT. Im Vergleich dazu liegt für die Frequenz f = 50 Hz im Expositionsbereich 2 der zulässige Wert der magnetischen Flussdichte bei 424 µT. Im industriellen Maschinenbau sind Drehstrom- und Wechselstrommotore auch bei großen Leistungen keine wesentlichen magnetischen Feldquellen. Träger von aktiven Implantaten wie Herzschrittmacherträger, deren Schrittmacher den Betriebsmodus selbständig von bipolar nach unipolar umschalten kann, sollten einen Sicherheitsabstand von etwa einer Unterarmlänge (30 bis 40 cm) nicht unterschreiten.

Abbildung 21:
900-kW-Schaufelradantrieb im Braunkohletagebau

Abbildung 22:
Ausgebauter Linearmotor eines Bearbeitungszentrums



8.3.2 Linearantriebe

Linearantriebe sind Motore, die ohne mechanische Umsetzung eine translatorische Bewegung erzeugen. Sie finden hauptsächlich Anwendung in Bereichen, in denen die ausschlaggebende Größe der Verfahrweg ist, z. B. in Werkzeugmaschinen zur hochgenauen Positionierung eines Werkzeugs oder Werkstücks (Abbildung 22). Wie der Rotationsmotor (Asynchron- und Synchronmotor) besteht ein Linearmotor aus Primär- und Sekundärteil. Typischerweise ist das Primärelement beweglich und das Sekundärelement fest montiert. Das Primärelement enthält eine Drehstromwicklung, die von einem Servoregler angesteuert wird. Der Sekundärteil besteht aus mehreren Segmenten von Permanentmagneten mit abwechselnder Magnetisierungsrichtung. Diese sind entsprechend der Länge des Verfahrwegs aneinandergereiht. Die Permanentmagnete liegen meist offen, hinter einer beweglichen Abdeckung. Das Bedienpersonal einer Maschine kommt daher mit den Magneten nicht in Berührung. Die Exposition durch das statische Magnetfeld ist daher meist zu vernachlässigen. Für Personen, die im Rahmen ihrer Tätigkeit Montage-, Wartungs- oder Reparaturarbeiten ausführen, darf die Exposition aufgrund der Permanentmagnete nicht vernachlässigt werden. Neben den Kraftwirkungen der Magnete auf ferromagnetische Teile wie Werkzeuge, kleine Maschinenteile und Schrauben ist die Störbeeinflussbarkeit von aktiven Implantaten z. B. des Reedkontaktes im Herzschrittmacher zu beachten.

Beispielsweise traten in einem Abstand von 5 mm, gemessen senkrecht zur Oberfläche der Permanentmagnete, magnetische Flussdichten von mehr als 650 mT auf. Im Abstand von etwa 10 cm verringerte sich die magnetische Flussdichte auf weniger als 500 µT. Bei Herzschrittmachern und Defibrillatoren muss ab einer magnetischen Flussdichte von etwa 500 µT mit einer Beeinflussung des Implantates gerechnet werden.Zum Schutz vor Gefährdungen durch die Kraftwirkungen magnetischer Felder sind die in der BGV B11 im § 14 aufgeführten Anforderungen einzuhalten.

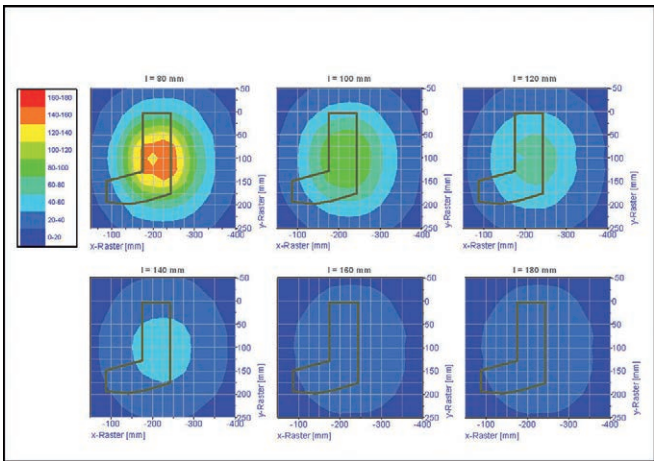
8.3.3 Elektrowerkzeuge

Handgeführte Elektrowerkzeuge wie Handbohrmaschinen, Handkreissägen, Stichsägen, Oberflächenfräsen oder Winkelschleifer werden in Industrie und Handwerk z. B. zur Bearbeitung von Metall, Kunststoff oder Holz eingesetzt. Sie werden entweder direkt an das öffentliche Netz (230 V/50 Hz) angeschlossen oder per Akku betrieben. Bei den netzbetriebenen Werkzeugen erzeugt ein Universalmotor, der im Gerät untergebracht ist, die Bewegung. Bei den akkubetriebenen Geräten werden anstelle der Universalmotore Gleichstrommotore mit Permanentmagnet eingesetzt.

Motore, die an Netzspannung betrieben werden, weisen in Abhängigkeit von ihrer Bauform und Belastung ein hohes aber lokal begrenztes magnetisches Streufeld auf. Das elektrische Feld kann dagegen vernachlässigt werden. Bei Nennlast treten an der Werkzeugoberfläche magnetische 50-Hz-Wechselfelder mit Flussdichten von etwa 200 µT bis 3 mT auf. Mit zunehmendem Abstand nehmen die Felder jedoch exponentiell ab. Abbildung 23 zeigt hierzu die Verteilungen der magnetischen Flussdichte über eine Bohrmaschine bei einer Nennlast von 300 W in verschiedenen Abständen.

Untersuchungen im Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) haben gezeigt, dass an der Oberfläche der akkubetriebenen Werkzeuge die magnetische Flussdichte der Streufelder die Werte des natürlichen magnetischen Feldes (50 µT) kaum überschreitet.

Abbildung 23:
Verteilung der magnetischen Flussdichte an einer Bohrmaschine bei unterschiedlichen Abständen



Eine Gefährdung durch magnetische Felder von handgeführten Elektrowerkzeugen ist aufgrund der Expositionsbedingungen (Arbeitsweise) nur bei Personen mit Herzschrittmachern oder Defibrillatoren anzunehmen. Da die Werkzeuge bei der Arbeit meist körpernah geführt werden (Abbildung 24), koppeln magnetische Felder nahezu direkt in die von den Elektroden und dem Schrittmacher aufgespannte Fläche ein und induzieren am Implantateingang eine Spannung.

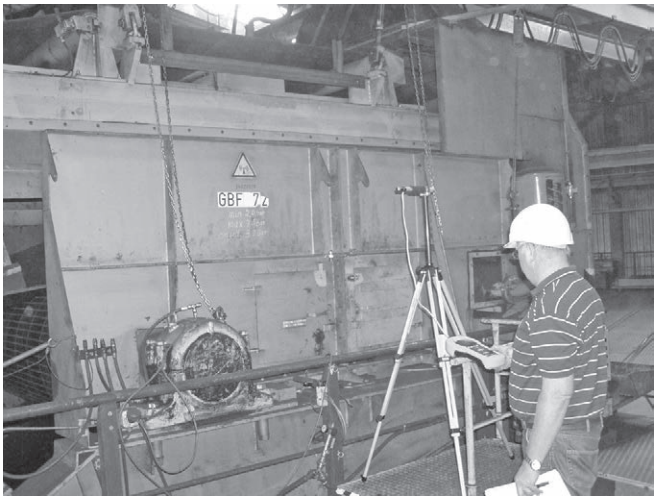
Abbildung 24:
Typische Arbeitshaltung an einer Bohrmaschine

Überschreitet diese induzierte Spannung die vom Kardiologen individuell eingestellte Wahrnehmungsschwelle, kann dies zu einer Störbeeinflussung des Implantates und damit zu einer Gesundheitsgefahr für den Implantatträger führen. Um eine Störbeeinflussung ausschließen zu können, sollte der Implantatträger beim Arbeiten mit handgeführten Elektrowerkzeugen einen Sicherheitsabstand von etwa 40 cm oder etwa eine Unterarmlänge nicht unterschreiten.

8.4 Magnetische Spann-, Halte- und Abscheideeinrichtungen

Der Einsatz von Magneteinrichtungen ist im Werkzeug-, Vorrichtungs- und Maschinenbau sowie in der Reyclingindustrie und im Transportwesen sehr weit verbreitet. Beispielsweise werden Magnetsysteme als Spann- oder Halteeinrichtungen, Metallsuch- oder Abscheidegeräte oder als Lasthebemagnete eingesetzt. In den verschiedenen Einrichtungen ziehen entweder Permanentmagnete, Elektropermanentmagnete oder Elektromagnete die Werkstücke an. Die höchsten magnetischen Flussdichten treten stets an den Polflächen der Magnete auf. Bei Magnetsystemen mit Dauermagnet-Werkstoffen kann die magnetische Flussdichte je nach verwendetem Werkstoff einen Wert von ca. 50 mT bis zu 1,5 T annehmen. Mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche nimmt die magnetische Flussdichte rasch ab. Bei einem Abstand von 10 bis 20 cm beträgt diese nur noch einige 100 µT (siehe hierzu auch Abschnitt 8.3.2). Über diese Flussdichtewerte hinausgehende magnetische Flussdichten können mit Gleichstrom-Elektromagneten erreicht werden. Diese werden daher vorzugsweise in Magnetsysteme eingebaut, mit denen sehr große Haltekräfte erreicht werden müssen oder wenn z. B. ein großer Luftspalt zu überbrücken ist. Elektromagnete sind daher häufig in Lasthebemagneten und Überbandmagnetabscheidern anzutreffen. Abbildung 25 zeigt einen Überbandmagneten oberhalb einer Förderanlage im Braunkohletagebau.

Abbildung 25:
Überbandmagnetabscheider
an einer Förderanlage im Braunkohletagebau



Wegen der hohen magnetischen Streufelder in der Nähe dieser Magnetsysteme ist meist eine Gefährdungsbeurteilung für Personen mit aktiven Implantaten erforderlich. Insbesondere ist die Beeinflussbarkeit des Reedkontaktes im Herzschrittmacher zu betrachten. Ferner ist zu beachten, dass z. B. Kreditkarten und Datenträger zerstört werden, wenn diese sich in den Streufeldern der Magnetsysteme befinden.

8.5 Bearbeitungszentren (CNC-Werkzeugmaschinen)

Abbildung 26 zeigt ein Bearbeitungszentrum/eine CNC-Werkzeugmaschine zur automatischen Bearbeitung eines Werkstückes (z. B. Bohren, Drehen, Fräsen und Schleifen). Die wesentlichen Emittenten von elektrischen und magnetischen Feldern sind die in einem Bearbeitungszentrum eingebauten Motore, Spanneinrichtungen sowie die elektrischen Steuer- und Regeleinrichtungen. Mit Ausnahme der Frequenzumrichter und Linearmotore (siehe Abschnitt 8.3.2) dominieren netzfrequente magnetische Felder, d. h. Felder, die auf der Frequenz f = 50 Hz beruhen. Mit Ausnahme der Mess- und Steuereinrichtungen, die in einem Steuerstand eingebaut sind, sind die meisten Feldquellen hinter den Maschinenverkleidungen angeordnet und damit nur für das Wartungspersonal zugänglich. An Bearbeitungszentren können in einem Abstand von 20 cm zur Maschinenoberfläche magnetische Flussdichten von etwa 12 µT (Effektivwert bei f = 50 Hz) auftreten. Hohe magnetische Flussdichten aufgrund der Permanentmagneten von Linearmotoren wurden außerhalb der Bearbeitungszentren nicht festgestellt. Die typischen Werte für das natürliche Erdmagnetfeld wurden bei den Messungen nicht wesentlich überschritten. Im Arbeitsraum der Bearbeitungszentren kann die Flussdichte des magnetischen Gleichfeldes mehr als 500 µT betragen. Dieser Wert ist so hoch, dass zum Schutz für Personen mit aktiven Implantaten (Herzschrittmacher) auf die Gefahr einer Störbeeinflussung beim Aufenthalt im Arbeitsraum hingewiesen werden muss.

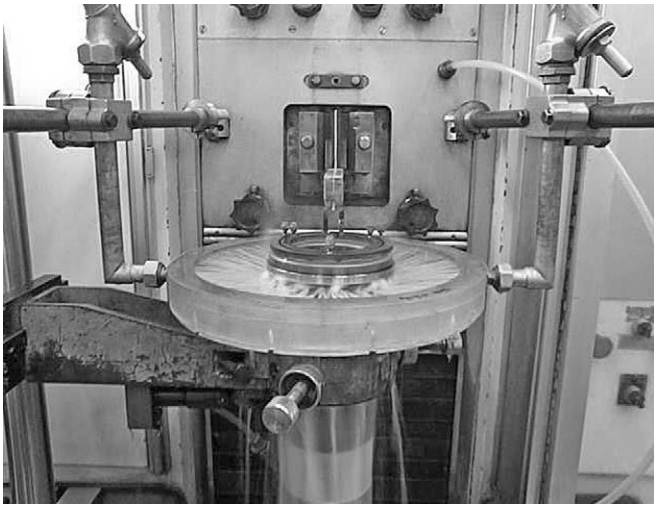
Aufgrund der Versorgungsspannung aus dem Niederspannungsnetz (400 V) ist das elektrische Feld vernachlässigbar.

Abbildung 26:
Bearbeitungszentrum

8.6 Induktions-Erwärmungsanlagen

Bei zahlreichen Fabrikationsprozessen, wie beim Schmelzen, Schweißen, Löten, Ausglühen, Härten oder Anlassen, müssen die Werkstücke oder das Rohmaterial erwärmt werden. Bei elektrisch leitfähigen Werkstoffen erfolgt dies in der Regel in einem magnetischen Wechselfeld. Dieses wird mit einem Wechselstrom erzeugt, der durch eine Spule fließt, die das Werkstück umschließt (siehe Abbildung 27). Das Werkstück wird dadurch zur Sekundärwicklung eines Kurzschlusstransformators. Als Folge des Wechselfeldes werden im Werkstück Wirbelströme induziert, die als Kurzschlussströme das Material durchfließen und somit erwärmen.

Abbildung: 27
Blick auf den Induktor einer Wellen-Induktions-Härtungsanlage



Bei ferromagnetischen Werkstoffen wird der Erwärmungseffekt noch durch die sogenannte Ummagnetisierung verstärkt. Die im Werkstück erzeugte Wärmemenge hängt von der Frequenz des Wechselfeldes sowie von den Eigenschaften und der Größe des Werkstücks ab. Zur Frequenzerzeugung werden heutzutage üblicherweise Frequenzumrichter eingesetzt. Je nach Anwendungsgebiet arbeiten Anlagen zur induktiven Erwärmung im Frequenzbereich von 20 Hz bis etwa 1 MHz und benötigen zur Wärmeerzeugung Nennleistungen von 1 kW bis › 10 MW. Die meisten Anlagen benutzen Frequenzen unterhalb von 10 kHz und setzen hohe Leistungen zur Erwärmung um. Hochfrequente Felder mit Frequenzen f ≥1 MHz werden häufig zum Löten von Werkzeugen genutzt. Ein Beispiel für einen Induktionstiegelofen ist in Abbildung 28 zu sehen. Der Ofen hat ein Fassungsvermögen bis zu 10 t und eine Nennleistung bis 10 MW.

In der Umgebung von Induktions-Erwärmungsanlagen treten hohe magnetische Streufelder meist an der Induktionsspule und den zu- und abgehenden Leitungen auf. Eine Übersicht der aus der Literatur entnommenen magnetischen Flussdichten von Induktions-Erwärmungsanlagen gibt Tabelle 11 [52 bis 55].

Abbildung 28:
Beispiel für einen Tiegelofen

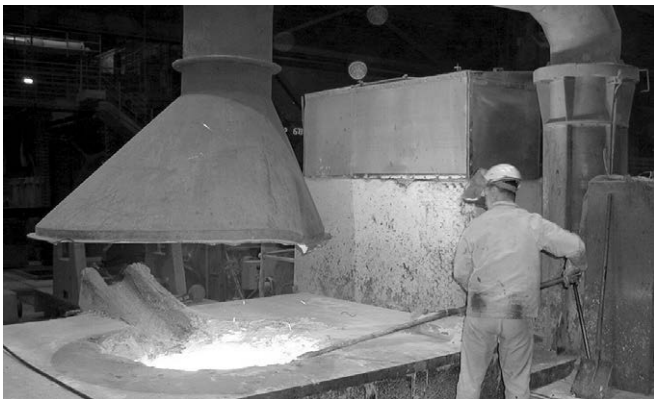


Tabelle 11:
Magnetische Flussdichten von Induktions-Erwärmungsanlagen. Quelle: [52 bis 55]

Anwendung	Messort	Frequenz	Messwert
Lichtbogen-Pfannenofen	Bedienstand	50 Hz	2,3 mT
Pfannenofen	Arbeitsplatz	50 Hz	3,4 mT
Schmelzofen	Aufenthaltsbereich	250 Hz	10 bis 70 µT
		1000 Hz	2,9 mT
		50 Hz	1020 µT
Lötanlage	Arbeitsplatz	9,6 kHz	50 bis 100 µT
	Einlegestelle		500 µT
Lötanlage, gekapselt	Arbeitsplatz	800 kHz	2,5 A/m 20 V/m
Härteanlage	Aufenthaltsbereich	500 kHz	60 bis 200 V/m 1 bis 3 A/m
	Arbeitsplatz	10 kHz	77 µT
	Spule	10 kHz	2,8 mT
Tiegelofen	Plattform	0,9 kHz	11,3 mT
	Plattform	1 kHz	7,4 mT
	Leitung in 3 cm Abstand	50 Hz	25 mT
	Arbeitsplatz	677 Hz	290 µT
Stangenerwärmungsanlage	Entnahmeöffnung	9 kHz	4,6 mT bei 3 cm Abstand, 36 µT bei 0,5 m Abstand
Probenerwärmungsanlage	Beobachtungsstand	10 kHz	1 mT
Schweißnaht-Glühen	Abstand 0,3 m zur Spule	10 kHz	2,2 mT
Durchlauferwärmungsanlage	Arbeitsplatz	770 Hz	› 10 mT

8.7 Induktionskochfelder

In Großküchen, aber auch im privaten Bereich, wird das Prinzip der induktiven Erwärmung zum Garen von Speisen eingesetzt (Induktionskochfelder). Eine unter dem Boden eines Topfes angeordnete Flachspule (Spirale) erzeugt hierzu ein magnetisches Wechselfeld im Frequenzband von 20 bis 100 kHz. Im elektrisch leitenden Topfboden bewirkt dieses Magnetfeld einen Wirbelstrom, der den Boden und die Seiten des Topfes erhitzt. Das Magnetfeld, das nicht zur Erhitzung des Topfes beiträgt, wird als Streufeld bezeichnet. Es entsteht insbesondere dann, wenn die Spule unter dem Topf nicht komplett abgedeckt wird. Untersuchungen der Streufelder an Induktionsherden (Abbildung 29) haben gezeigt, dass bei genügend großem Abstand (30 cm) die zulässigen Werte von 6,25 µT der Ratsempfehlung 1999/519/EC (siehe [19]) eingehalten werden [56]. Voraussetzung dafür ist, dass die Kochfelder von genügend großen Töpfen und Pfannen zentriert abgedeckt werden. Bei geringeren Abständen kann eine Grenzwertüberschreitung nicht ausgeschlossen werden. Ungünstige Betriebsbedingungen können auftreten, wenn die Spule unter dem Topf nur soweit abgedeckt wird, dass das Kochfeld gerade nicht abschaltet. Dies kann dazu führen, dass direkt am Kochfeld auftretende Magnetfelder bis zum Zehnfachen über den zulässigen Werten liegen [56]. Um die Gefährdung von Personen gering zu halten, sollte die Topfgröße der des Kochfeldes entsprechen, der Topf auf dem Kochfeld zentriert

sein und zwischen Person und Kochfeld ein Abstand von 20 cm nicht unterschritten werden.

Abbildung 29:
Messung der magnetischen Flussdichte an einem Induktionskochfeld

Beim Arbeiten an Induktionsfeldern kann beim Berühren eines Topfes ein hochfrequenter elektrischer Strom durch Finger, Hand, Rumpf und Füße des menschlichen Körpers zum Boden fließen. Voraussetzung dafür ist, dass der Topf über der Induktionsspule steht und diese eingeschaltet ist. Ursache für diesen Vorgang sind Kapazitäten, die zwischen Topfboden und Induktionsspule entstehen. Der Strom, der über den menschlichen Körper zum Boden fließt, wird Ableitstrom genannt. Nach der Norm DIN EN 60335 darf dieser Strom bei Großküchengeräten je angeschlossenem Kilowatt Leistung 1 mA ohne Maximumbegrenzung betragen [57].

8.8 Magnetische Felder an Schweißeinrichtungen

8.8.1 Lichtbogenschweißanlagen

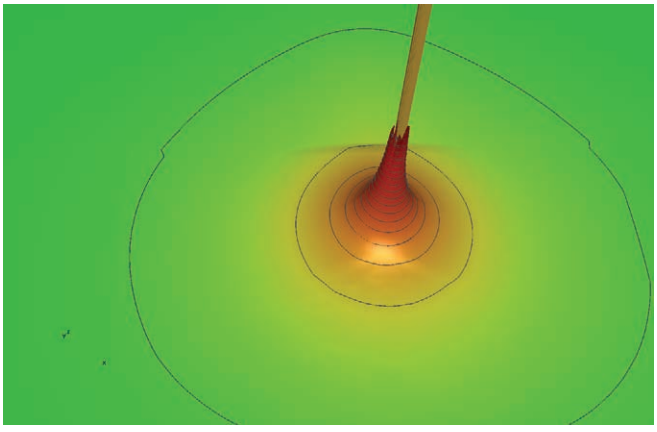
Schweißen ist im Stahl- und Maschinenbau ein Verfahren, mit dem unlösbare Verbindungen hergestellt werden können. Zu den gängigsten Schweißverfahren zählen die Lichtbogenschweißverfahren. Am bekanntesten sind das Metall-Lichtbogenschweißen (Elektroden-Handschweißen), Schutzgasschweißen (MIG-, MAG- (Abbildung 30) und WIG-Schweißen) und Unterpulverschweißen. Bei diesen Verfahren bildet sich an der Schweißstelle ein Lichtbogen zwischen einer Elektrode und dem Werkstück. Zur Aufrechterhaltung des Schweißvorgangs fließen elektrische Ströme mit Stromstärken von annähernd 100 bis zu 1000 A von der Schweißstromquelle über die Schweißkabel und den Schweißbrenner zur Schweißstelle. Eine typische MAG-Schweißstromquelle zeigt Abbildung 30.

Das Schweißverfahren, das Werkstück, die Elektrode und der Lichtbogen bestimmen die Höhe des elektrischen Stroms. Geschweißt wird mit Gleichstrom, meist ein ungeglätteter, gleichgerichteter Wechselstrom, oder pulsierenden Strömen. Da ein elektrischer Strom stets ein magnetisches Feld zur Folge hat, treten in der Nähe der schweißstromführenden Teile der Schweißanlage in Abhängigkeit von der Schweißstromstärke überwiegend magnetische Felder auf. Zur Abschätzung der magnetischen Flussdichte an den Schweißkabeln kann Gl. (11) angewendet werden (siehe Abschnitt 8.1). Von den stromführenden Komponenten der Schweißeinrichtung (Kabel, Schweißbrenner) ausgehend ändert sich die magnetische Flussdichte mindestens umgekehrt proportional zum Abstand. Beispielhaft ist in Abbildung 31 die magnetische Flussdichte an einem Schweißkabel dargestellt.

Die Skalierung der magnetischen Flussdichte verläuft im Bild von blau über grün, gelb nach rot, d. h. von niedrigen zu hohen Flussdichtewerten. Wie Abbildung 31 zeigt, kann bei hohen Schweißstromstärken nicht ausgeschlossen werden, dass Körperteile in der Nähe der Schweißkabel und des Schweißbrenners einer hohen Exposition ausgesetzt sind. Bei einem Schweißstrom mit einer Stromstärke von etwa 250 A beträgt die magnetische Flussdichte am Schweißkabel etwa 650 µT. Aufgrund der niedrigen elektrischen Schweißspannung können die elektrischen Feldstärken vernachlässigt werden.

Abbildung 30:
Beispiel für eine MAG-Schweißstromquelle

Abbildung 31:
Verlauf der magnetischen Flussdichte am Schweißkabel einer Lichtbogenschweißanlage



Eine Reduzierung der Exposition kann nach [38; 58] erreicht werden, wenn

- Schweißkabel (Hin- und Rückleitung) möglichst nahe aneinander verlegt werden
- große Abstände der Person zum Schweißstromkreis eingehalten werden
- Schweißkabel niemals um den Körper (z. B. über die Schulter) gewickelt oder gelegt werden
- sich der Körper des Schweißers nicht zwischen den Schweißkabeln befindet
- das Schweißkabel am Werkstück, möglichst nahe an der Schweißstelle angebracht wird
- der Aufenthalt in der unmittelbaren Nähe, das Sitzen auf der oder das Lehnen an die Schweißstromquelle vermieden wird.

Für Personen mit aktiven und passiven Implantaten (z. B. Herzschrittmacher, metallene Körperteile) muss aufgrund der hohen Exposition mit einer Störbeeinflussung der Implantate gerechnet werden. Im Rahmen einer einzelfallbezogenen Expositionsbeurteilung sind darüber hinausgehende Schutzmaßnahmen auszuarbeiten. Je nach Höhe der magnetischen Flussdichte und den individuellen Eigenschaften des Implantates können diese z. B. zur Einhaltung von Sicherheitsabständen oder zu einem generellen Aufenthaltsverbot an Lichtbogenschweißanlagen führen. Am Arbeitsplatz sollte in einem solchen Fall ein Verbotszeichen für Herzschrittmacher auf die Gefährdung hinweisen. Sind Sicherheitsabstände einzuhalten, ist der Abstand auf einem Zusatzschild anzugeben.

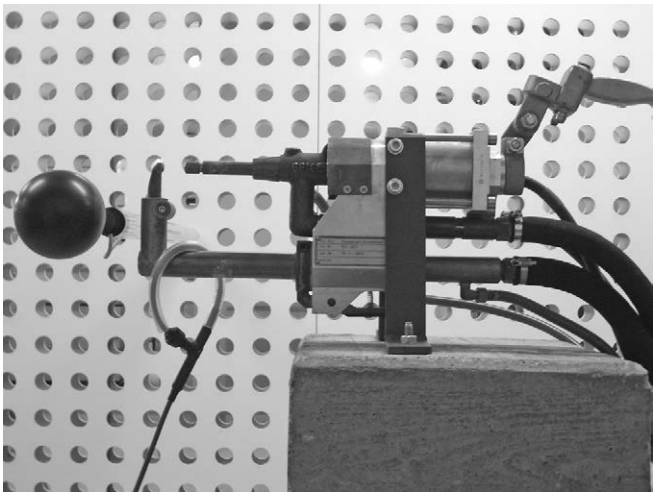
8.8.2 Widerstandsschweißeinrichtungen (Punktschweißzangen)

An Punktschweißzangen (Abbildung 32) treten beim Schweißen hohe impulsförmige magnetische Felder auf. Die Felder sind die Folge von kurzzeitig fließenden Strömen mit hohen Stromstärken von bis zu einigen Kiloampere. Bei Schweißern, die sich während des Schweißens in der Nähe der Schweißzange aufhalten, muss man mit einer hohen Exposition gegenüber magnetischen Feldern rechnen.

Im Metall verarbeitenden Handwerk und in der Industrie, insbesondere der Automobilindustrie, werden zum Schweißen von dünnen Stahlblechen häufig handgeführte Punktschweißzangen eingesetzt. Die Funktion derartiger Schweißzangen beruht auf dem Prinzip des Widerstandsschweißens. In der manuellen Fertigung sind handbedienbare Punktschweißzangen weit verbreitet. Sie werden als Transformatorzangen oder als Kabelzangen ausgeführt. Geschweißt wird mit Gleich- oder Wechselstrom. Je nach verwendetem Werkstück fließt während des Schweißens über die Schweißstelle kurzzeitig (meist mehrere 100 ms) ein elektrischer Strom.

Da mit dem elektrischen Strom immer ein magnetisches Feld verbunden ist, können an den Strom durchflossenen Komponenten einer Punktschweißzange hohe magnetische Felder auftreten. Die Expositionen der Schweißer gegenüber magnetischen Feldern können je nach Arbeitsposition und Stellung der Punktschweißzange sehr hoch sein. Besonders hohe magnetische Feldstärken bzw. Flussdichten treten immer dann auf, wenn die Schweißzange körpernah gehalten wird und das Zangenfenster dabei nahezu parallel zum Kopf oder Rumpf steht.

Abbildung 32:
Beispiel für eine handgeführte Punktschweißzange mit getrennter 50-Hz-Wechselstromquelle



In der Abbildung 33 ist für die Mitte eines Zangenfensters die Verteilung der magnetischen Flussdichte in horizontaler Ebene dargestellt. Zu erkennen ist, dass die magnetische Flussdichte mit zunehmendem Abstand zum Zangenfenster, zu den Elektroden und den Schweißkabeln schnell abnimmt. Extrem hohe magnetische Flussdichten treten an den Schweißelektroden und Elektrodenarmen sowie an den Schweißkabeln auf. In einem Abstand von 10 bis 20 cm wurden hier magnetische Flussdichten zwischen 10 und 35 mT ermittelt. Diese Werte sind so hoch, dass die zulässigen Werten für den Expositionsbereich 1 (3,6 mT) und den Bereich erhöhter Exposition (6,8 mT) der BGV B11, Abschnitt 3 überschritten werden. Hinweise zur Bewertung magnetischer Felder enthält die BGI 5011 [37].

Da eine Überschreitung der abgeleiteten zulässigen Werte nicht automatisch eine Überschreitung der Basiswerte der BGV B11 bedeutet, kann deren Einhaltung durch zusätzliche Untersuchungen oder Berechnungen nachgewiesen werden.

Hierzu ist eine detaillierte Analyse der Wirkungen der Magnetfelder im menschlichen Körper, z. B. durch Feldsimulation in einem Körpermodell, erforderlich. Eine solche Analyse stellt jedoch hohe Anforderungen an das Körpermodell, das Feldsimulationsprogramm und an den Bewertenden. Nur wenn alle Bedingungen erfüllt werden, kann anhand der Ergebnisse die Exposition ausreichend genau beurteilt werden. Für eine handgeführte Punktschweißzange werden im Folgenden die berechneten induzierten Körperstromdichten beispielhaft für die Rumpfmitte des Körpermodells bei frontaler Exposition gezeigt. Das Rechenmodell hierzu ist in Abbildung 34 und die berechneten induzierten Körperstromdichten sind in Abbildung 35 dargestellt.

Abbildung 33:
Beispiel für eine in horizontaler Ebene gemessene Feldverteilung an der Punktschweißzange

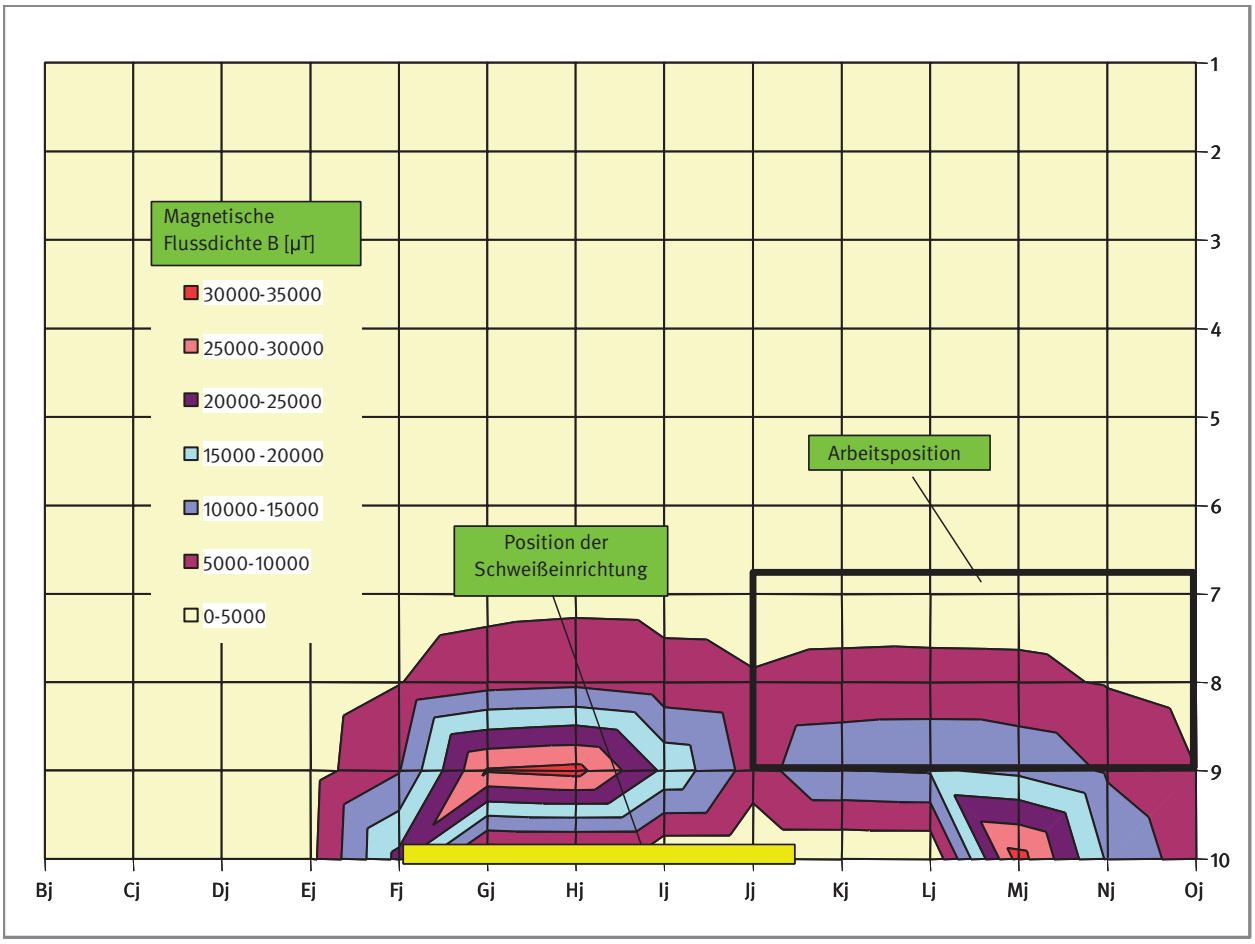


Abbildung 34:
Verlauf der induzierten Stromdichte in der Rumpfmitte des Körpermodells

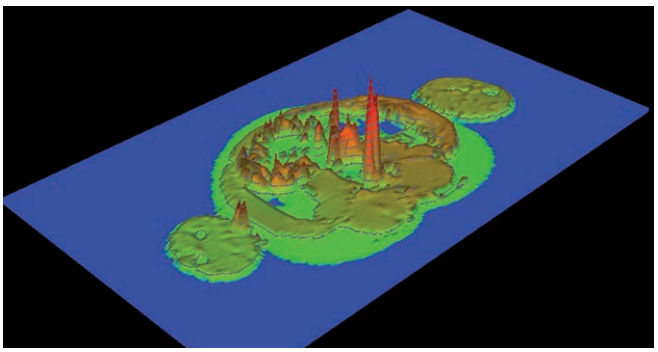


Abbildung 35:
Ausschnitt aus Abbildung 34 im Bereich des ZNS

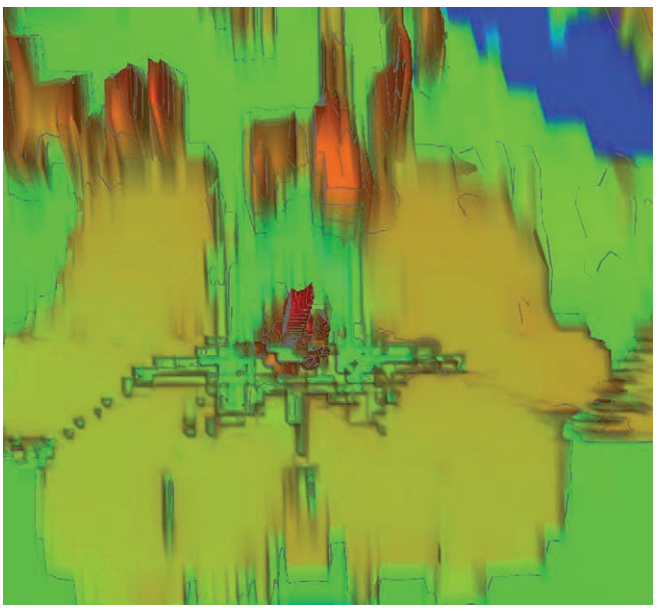


Abbildung 34 zeigt für einen transversalen Schnitt durch den Rumpf des Körpermodells die Verteilung der Stromdichte. Die Skalierung von niedrigen zu hohen Werten der elektrischen Stromdichten verläuft von blau über grün und gelb nach rot. Abbildung 35 zeigt einen Ausschnitt der Feldverteilung aus Abbildung 34 im Bereich des ZNS und gibt einen Blick in den Spinalkanal. Ein Bereich niedriger elektrischer Stromdichten wird hier von hohen Stromdichten nahezu kreisförmig umschlossen. Die hohen Stromdichten (rot) treten in der Rückenmarkflüssigkeit auf und die niedrigen im Nervengewebe (grün).

Die unterschiedlichen Stromdichten in den beiden Gewebearten sind auf deren unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit zurückzuführen. Entsprechend den Gabrielparametern [41] hat das Nervengewebe mit 0,02 S/m² eine um den Faktor 100 geringere Leitfähigkeit als die Rückenmarkflüssigkeit mit 2 S/m².

Untersuchungen im IFA an handgeführten Punktschweißzangen mit getrennter 50-Hz-Wechselstromquelle haben gezeigt, dass bei einem Schweißstrom von 10 kA der Grenzwert der Körperstromdichte für eine Ganzkörperexposition (10 mA/m^2 nach BGV B11) nicht überschritten wird. Dies trifft auch für einen Aufenthalt in unmittelbarer Nähe des Zangenfensters zu, wenn die Schweißkabel nicht körpernah geführt werden und das Zangenfester nicht in Kopfhöhe gehalten wird [59]. Aufgrund der hohen Expositionswerte müssen Implantatträger große Sicherheitsabstände eingehalten werden.

8.9 Kapazitiv wirkende Erwärmungsanlagen

Bei kapazitiven Erwärmungsanlagen werden zur Erwärmung eines Werkstoffes elektrische Felder verwendet. Der zu erwärmende Werkstoff ist meist ein Isolierstoff, der als Dielektrikum zwischen die Platten eines Kondensators gebracht wird und sich infolge seiner dielektrischen Verluste erwärmt. Die in Wärme umgesetzte Leistung ergibt sich aus Gleichung (14).

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta \qquad (14)$$

mit

P	=	Leistung in VA
U	=	Spannung an den Elektroden in V
ω	=	Kreisfrequenz der Wechselspannung $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ in s^{-1}
C	=	Kapazität des Kondensator in As/V (Farad)
tan δ	=	Verlustfaktor des Isoliermaterials im Kondensator

Diese Gleichung zeigt, dass bei der Wärmeerzeugung in einem Isoliermaterial, das als Dielektrikum eines Kondensators wirkt, verschiedene Faktoren zu berücksichtigen sind. Wesentlich ist, dass die Leistung proportional mit der Frequenz und mit dem Quadrat der Spannung steigt [60]. Um genügende Energiemengen in Wärme umsetzen zu können, werden hohe Spannungen und Frequenzen eingesetzt. Beschränkungen bei der Spannungshöhe gibt es aufgrund der begrenzten Spannungsfestigkeit des Werkstoffs und bei der Frequenz aufgrund der international festgelegten Frequenzen für Industrie, Forschung und Medizin, den sogenannten ISM-Frequenzen (frequencies for industrial, scientific and medical use). Tabelle 12 zeigt die international festgelegten ISM-Frequenzbereiche, die von Hochfrequenzgeräten und Hochfrequenzanlagen in Deutschland genutzt werden dürfen. Beispiele hierfür sind Funkenerosions-, Kunststoffschweiß- und Trocknungsanlagen in verschiedenen Industriebereichen.

Tabelle 12:
ISM-Frequenzbereiche

ISM-Frequenzbereiche		
6 765 bis 6 795 kHz	40,66 bis 40,70 MHz	24 bis 24,25 GHz
13 553 bis 13 567 kHz	433,05 bis 434,79 MHz	61 bis 61,50 GHz
26 957 bis 27 283 kHz	2 400 bis 2 500 MHz	122 bis 123 GHz
	5 725 bis 5 875 MHz	244 bis 246 GHz

Die meisten dieser Anwendungen nutzen als Arbeitsfrequenzen die Frequenzbereiche um 13 MHz, 27 MHz oder 2,4 GHz bis 2,5 GHz. Zur Frequenzerzeugung dienen aufgrund der umzuformenden hohen Leistung, Spannung und Frequenz überwiegend Röhrengeneratoren.

Hergestellt werden kapazitiv wirkende Erwärmungsanlagen in offener, geschlossener und/oder geschirmter Bauweise. Für die offene Bauform muss am Arbeitsplatz mit hohen elektrischen Streufeldern gerechnet werden. Diese können zu den im Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder führen. Darüber hinaus können im Frequenzbereich zwischen 10 und 110 MHz durch Hochfrequenz eingekoppelte Körperableitströme auftreten. Deren Höhe darf die in der BGV B11, Anlage 1, Tabelle 12 aufgeführten Werte nicht überschreiten.

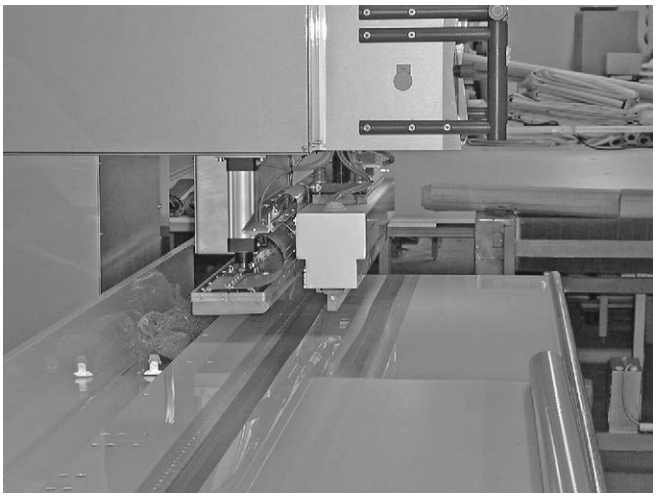
Die Beispiele und Messergebnisse in den Abschnitten 8.9.1 bis 8.9.4 zeigen charakteristische industrielle Anwendungen und mögliche Expositionen in Aufenthaltsbereichen und an Arbeitsplätzen.

8.9.1 Kunststoffschweißmaschine

Abbildung 36 zeigt eine offene, manuell positionierbare Maschine zum Verschweißen von Kunststoffbahnen. Die Schweißelektroden befinden sich im beweglichen Ober- und stationären Unterteil der Maschine. Zum Schweißen werden die Kunststoffbahnen zwischen beide Elektroden gelegt, die Elektroden zusammengepresst und die Hochfrequenzenergie zugeschaltet. Zwischen den Elektroden entsteht dann ein hochfrequentes elektrisches Feld, das die Werkstücke soweit erwärmt, dass sie miteinander verschmelzen. Je nach Schweißfläche (Elektrodengröße) wird zum Schweißen eine HF-Leistung von mehr als 20 kW in Wärme umgewandelt. Der Schweißvorgang selbst dauert in der Regel nicht mehr als einige Sekunden. Danach müssen die Elektroden neu positioniert und ggf. neue Werkstücke zugeführt werden. Da derartige Maschinen in der Regel nicht in eine Produktionslinie integriert sind, ist von einer Kurzzeitexposition auszugehen, d. h. das Bedienpersonal wird in einem Expositionsintervall weniger als sechs Minuten exponiert. Die Exposition ist je nach Aufenthaltsort an derartigen Maschinen sehr unterschiedlich. So kann an einer 27-MHz-Schweißmaschine in der Nähe der Elektroden der effektive Spitzenwert

der elektrischen Feldstärke mehr als 1000 V/m und die magnetische Feldstärke mehr als 0,3 A/m betragen. Am Arbeitsplatz an einer solchen Maschine, etwa 500 mm von den Elektroden entfernt, ist die Exposition deutlich niedriger. Gemessen wurden hier Spitzenwerte von 100 V/m und 0,2 A/m. Ob bei einer Mittelung dieser Werte über eine Zeit von sechs Minuten die zulässigen Werte der BGV B11 überschritten werden, wird im Wesentlichen von der Anzahl der Schweißvorgänge und dem Expositionsort bestimmt (siehe hierzu auch [61]).

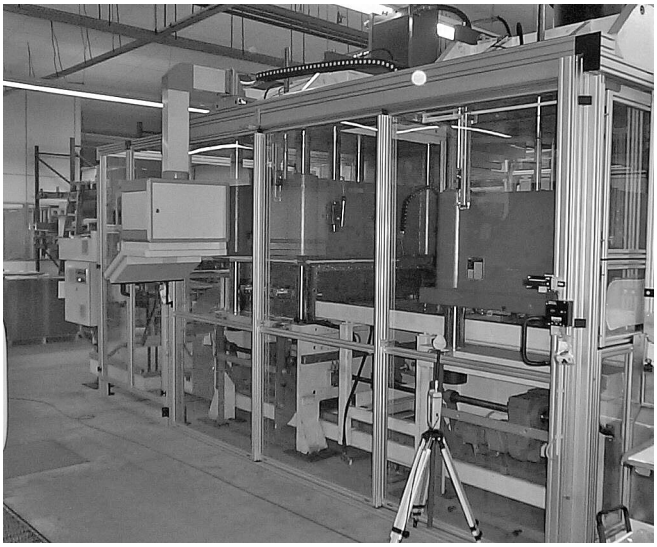
Abbildung 36:
Hochfrequenzschweißmaschine
zum Verschweißen von Markisenbahnen



8.9.2 Stanzautomat

Abbildung 37 zeigt eine prinzipiell gleichartige, aber geschlossene Maschine mit automatischer Zuführung und manueller Entnahmemöglichkeit.

Abbildung 37:
Hochfrequenzstanzmaschine mit
automatischer Zuführung



Sie besteht aus zwei Stanzwerken. In einem Stanzwerk werden unter Einwirkung von Hochfrequenzenergie (PN = 25 kW; f = 27,12 MHz) in einer Kunststofffolie Faltkanten für Kunststoffschachteln eingebrannt. Das Oberteil des Stanzwerkes enthält dazu eine auf die zu fertigende Faltschachtel abgestimmte, auswechselbare Elektrode mit entsprechenden Faltumrissen. Die Gegenelektrode befindet sich im stationären Unterteil des Stanzwerkes. Der Brennvorgang dauert nur einige Sekunden. Im geschlossenen Zustand der Stanze wird der verbleibende Spalt zwischen der oberen und der unteren Elektrode mit Abschirmblechen völlig abgedeckt. Die Bleche sind dazu an beiden Elektroden so angeordnet, dass sie sich bei geschlossener Stanze großflächig überlappen. Dies bewirkt eine deutliche Reduzierung der abgestrahlten elektromagnetischen Felder. Die von der Maschine emittierten effektiven Spitzenwerte, gemessen im Abstand von 20 cm senkrecht zur Maschinenoberfläche an den Abschrankungen, betragen 6 V/m und 0,09 A/m. Der über eine Zeit von sechs Minuten gemittelte Wert liegt damit, unabhängig vom Takt der Stanze, noch unterhalb dieser Werte. Bei einem Taktverhältnis von 1 : 1 sind die gemittelten Werte etwa 50 % niedriger.

8.9.3 Trockner

Abbildung 38 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Hochfrequenztrockners für Spulenkörper mit offener Zufuhr- und Entnahmestation, Abbildung 39 einen Blick in den Hochfrequenztrockner.

Die Zuführung der Spulenkörper erfolgt automatisch. Zum Trocknen werden diese mit langsamer Geschwindigkeit zwischen die beiden Platten eines Plattenkondensators transportiert. Dort (Plattenabstand ca. 0,5 m, Kondensatorspannung ca. 6 kV) sind sie einem hochfrequenten elektrischen Feld mit einer Frequenz von 13,55 MHz ausgesetzt, sodass die Spulenkörper einen Teil der im Kondensator gespeicherten elektromagnetischen Energie absorbieren und in Wärme umgewandeln. Diese Wärme bewirkt, dass die im Spulenkörper gespeicherte Feuchtigkeit entweicht und der Spulenkörper trocknet.

Der Trocknungsvorgang erfolgt kontinuierlich. Es ist davon auszugehen, dass das Personal nur zur Entnahme der Spulenkörper und zur Störungsbeseitigung in den Prozessablauf eingreift. Die Exposition kann dabei sehr unterschiedlich sein. So wurden an der Ein-/Auslauföffnung und an den Bedienständen effektive Spitzenwerte der Feldstärken von 75 bis 150 V/m und 0,08 bis 0,22 A/m gemessen. Im Aufenthaltsbereich um den Trockner, gemessen im Abstand von ca. 0,2 m senkrecht zur Maschinenoberfläche, waren die Feldstärken deutlich niedriger. Gemessen wurden effektive Spitzenwerte von 8 bis 15 V/m und von 0,01 bis 0,08 A/m. Ob die zulässigen Werte der UVV BGV B11 überschritten werden, wird durch die Aufenthaltsdauer an den einzelnen Aufenthaltsorten bestimmt.

Abbildung 38:
Prinzipieller Aufbau eines Hochfrequenztrockners für Garnspulen

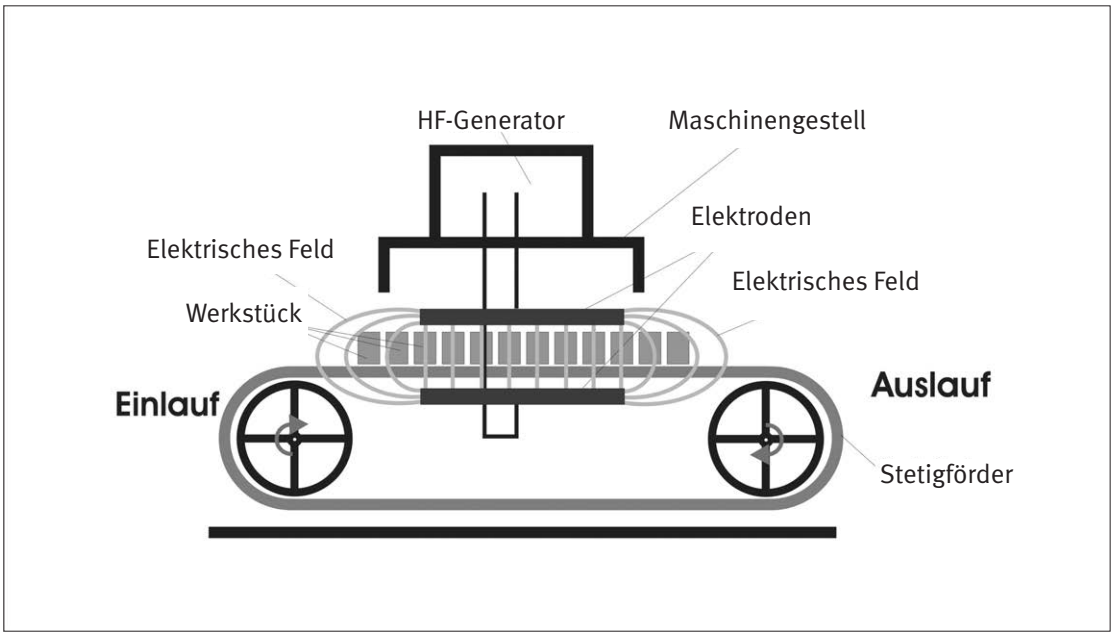
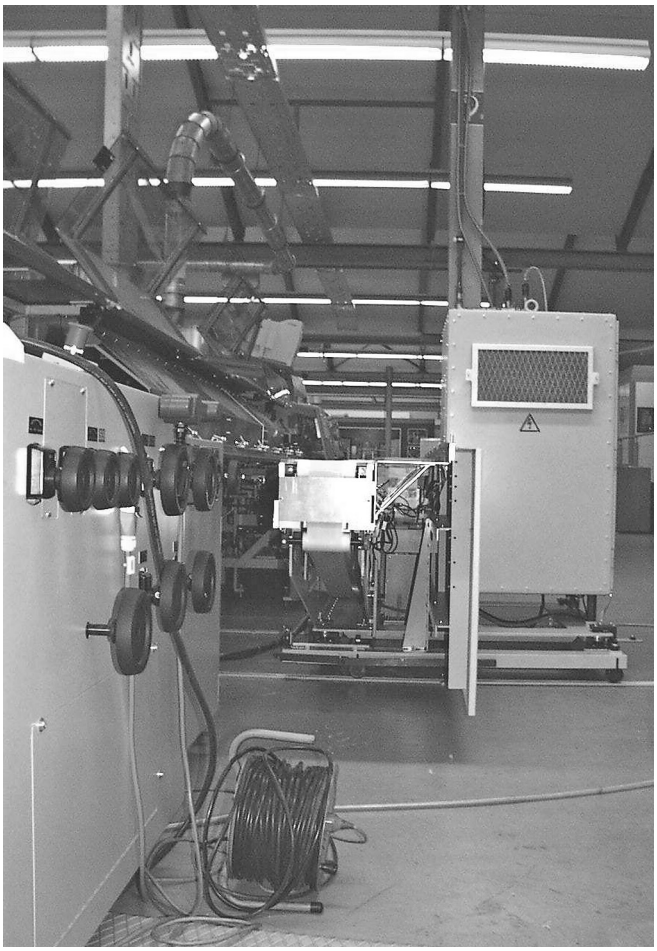


Abbildung 39:
Blick in einen Hochfrequenztrockner

Abbildung 40:
Hochfrequenzklebebinder zur Trocknung von Buchrücken



8.9.4 Klebebinder

Abbildung 40 zeigt eine verkettete Anlage, in der die einzelnen Seiten eines Buches zu einem Buchrücken zusammengefasst, verleimt und getrocknet werden. Zur Trocknung transportiert eine integrierte Fördereinrichtung die verleimten Seiten zwischen zwei ca. 3 m langen, im Abstand von 20 cm nahezu parallel zueinander verlaufenden Elektroden. Sie sind über einen Hochfrequenzübertrager mit einer HF-Feldquelle verbunden. In Abhängigkeit von der Anzahl der zu trocknenden Seiten beträgt die Elektrodenspannung 2 bis 4 kV. Als Hochfrequenzquelle dient ein 10-kW-Schwingkreis mit einer Frequenz von 27,12 MHz. Außerhalb der Anlage wurden im Abstand von 20 cm zur Maschinenoberfläche als effektive Spitzenwerte 10 V/m und 0,015 A/m gemessen.

8.10 Büroarbeitsplätze

Quellen für elektrische und magnetische Felder an Büroarbeitsplätzen (Abbildung 41) sind in der Regel an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Abgesehen von den Geräten zur drahtlosen Bürokommunikation (siehe Abschnitt 8.11) erzeugen die meisten Geräte hauptsächlich Felder, die im Zusammenhang mit der Netzfrequenz von 50 Hz stehen.

Aufgrund der meist verwendeten Versorgungsspannung der öffentlichen Energieversorgungsunternehmen von 400 V/230 V dominieren bei den meisten Geräten die magnetischen Felder. Hohe magnetische Felder treten am häufigsten in der unmittelbaren Nähe von Kleintransformatoren für die Raumbeleuchtung oder für Tischlampen auf. Die elektrischen Felder sind normalerweise vernachlässigbar. Die Feldstärke beträgt in der Regel weniger als 500 V/m. Damit werden weniger als 10 % des Wertes der BGV B11 für den Expositionsbereich 2 (6,6 kV/m) ausgeschöpft.

In Tabelle 13 sind für den Niederfrequenzbereich beispielhaft eine Reihe von Feldquellen und deren Feldemissionen in verschieden Abständen angegeben. Anhand dieser Werte kann die Relevanz möglicher Feldquellen beurteilt werden. Ferner ist eine Unterscheidung zwischen wesentlichen und unwesentlichen Feldquellen möglich.

Zur Bewertung der Messwerte können die zulässigen Werte aus Tabelle 8 für eine Frequenz von f = 50 Hz herangezogen werden (siehe Abschnitt 4.7.1 in DIN EN 12198).

Tabelle 13:
Beispiele für niederfrequente elektrische und magnetische Felder von Elektrogeräten [62; 63] an Büroarbeitsplätzen

Gerät	Frequenz in Hz	Abstand in cm	Elektrische Feldstärke in V/m	Magnetische Flussdichte in µT
Uhr (Netzbetrieb)	50	3	-	300
		30	30	2,25
		100	-	< 0,01
Computer (PC)	50	3	-	0,5 bis 3,0
		30	-	< 0,01
PC-Monitor	-	3	-	0,5 bis 10
		30	-	0,45 bis 1,0
		100	-	< 0,01 bis 0,03
Kaffeemaschine	50	3	-	1 bis 25
		30	60	0,1 bis 0,2
Wasserkochtopf (1 kW)	-	3	-	5,4
		30	-	0,08
		100	-	< 0,01
Ladestation für Handfunkgeräte	50	30	-	1,5
Leuchtstofflampe	-	3	-	10 bis 400
		30	27	0,5 bis 2
		100	-	0,02 bis 0,25
Beamer	-	3	-	240
		30	-	4,5
		100	-	0,15
Heizlüfter	-	30	-	10 bis 20
Halogenlampe (Niedervolt)	-	3	-	25 bis 80
		30	-	0,6 bis 1,7
Luftbefeuchter	-	30	-	10 bis 20
Tischlampe (60 W)	-	3	-	0,1 bis 0,2
		30	5	0,01

Abbildung 41:
Typischer Büroarbeitsplatz

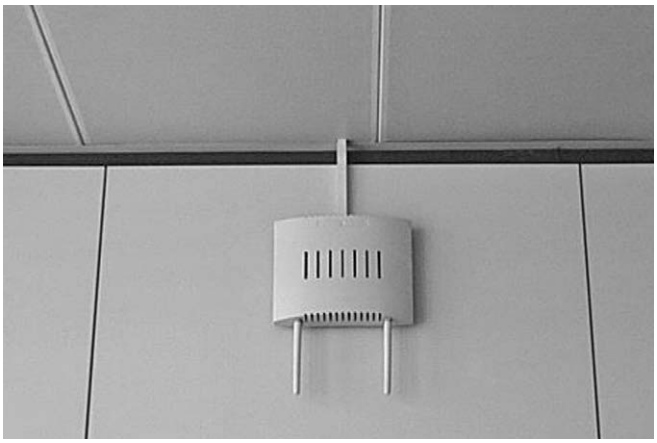
bei Nahbereichsanwendung (ca. 10 m) bis zu 1 mW und bei Anwendungen für größere Reichweiten (› 100 m) maximal 1 Watt. Untersuchungen, die im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm durchgeführt wurden haben gezeigt, dass unter üblichen Nutzungsbedingungen die über ein 6-Minuten-Intervall gemittelten Immissionen deutlich unter 0,1 % der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG liegen.

Zeitliche und räumliche Spitzenwerte der Immissionsgrößen können aber um zwei bis drei Größenordnungen höher liegen. Höhere Expositionswerte können nur bei körpernahem Betrieb auftreten. Bei einer Sendeleistung von 100 mW EIRP (EIRP = Equivalent Isotropic Radiated Power) können unter ungünstigsten Bedingungen lokale SAR-Werte von 1 W/kg auftreten (10-g-Mittelwert). Bei einer üblichen Nutzung sind die SAR-Werte um ein bis zwei Zehnerpotenzen geringer. Weitere Informationen findet man in [64 bis 66].

8.11 Drahtlose Bürokommunikationseinrichtung

Neben den schon seit einigen Jahren vorhandenen Schnurlostelefonen (DECT-Systeme) ersetzen inzwischen auch im Bereich der Datennetzwerke und Datenverarbeitung drahtlose Technologien in vielen Betrieben an Büroarbeitsplätzen die kabelgebundenen Techniken (siehe Abbildung 42).

Abbildung 42:
Access-Point für DECT-Telefonanlage (mit E-Feld-Messsystem)



Computer werden über Wireless Local Area Network (WLAN), Bluetooth und neuerdings auch Ultrawideband-(UWB-)Technologien untereinander und mit Peripheriegeräten vernetzt. Bei allen Einrichtungen werden für den Datenaustausch die Eigenschaften von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern genutzt.

Der verwendete Frequenzbereich liegt beim Schnurlostelefon etwa bei 1,8 GHz, bei den Wireless LAN-Netzwerken bei ca. 2,4 GHz, 5,2 und 5,7 GHz bei den Wireless LAN-Netzwerken und den UWB-Technologien zwischen 1,6 GHz und 10,6 GHz mit einer Mindestbandbreite von 50 MHz. Die Obergrenze der Sendeleistung wird von der Netzwerktechnologie bestimmt. Sie beträgt

8.12 Bildschirmgeräte und Monitore

An Bildschirmarbeitsplätzen werden heutzutage überwiegend TFT-Monitore (englisch: Thin Film Transistor) benutzt. Bildschirme, die zur Erzeugung der Bilder eine Kathodenstrahlröhre (englisch: cathode ray tube, kurz CRT) benutzen, sind kaum noch anzutreffen (Abbildung 43).

Abbildung 43:
CRT- und TFT-Monitor

Bei TFT-Monitoren wird zur Bilderzeugung die Lichtdurchlässigkeit einer LCD-Zelle mit Thin-Film-Transistoren gesteuert. Als Lichtquelle dienen neben Leuchtstoffröhren in zunehmendem Maße auch Leuchtdioden (LED, Light-Emitting-Diode).

Elektrostatische Felder sind nur bei CRT-Bildschirmen anzutreffen. Sie werden zur Fokussierung des Elektronenstrahls in der Kathodenstrahlröhre erzeugt. In einem Abstand von 30 cm zur Bildschirmoberfläche kann die elektrische Feldstärke bis zu 7 kV/m begtragen. Nach der Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 darf bei Arbeiten in elektrostatischen Feldern eine elektrische Feldstärke von 20 kV/m nicht überschritten werden. Die an CRT-Bildschirmen gemessenen elektrischen und magnetischen

Wechselfelder liegen je nach Frequenzbereich um mehrere Größenordnungen bzw. Zehnerpotenzen unter den zulässigen Expositonsgrenzwerten [10].

Bei TFT-Bildschirmen werden aufgrund des Prinzips der Bilddarstellung sowie der geringen Netzanschlussleistung nur sehr geringe elektrische und magnetische Feldstärken erzeugt. Wesentliche Emissionen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder treten daher bei TFT-Bildschirmen nicht auf.

Bei CRT-Bildschirmen kommt es häufig zu Flimmerbewegungen und zu Helligkeits- und Farbveränderungen. Ursache hierfür sind fast immer Magnetfelder einer stromdurchflossenen elektrischen Leitung in der Nähe des Bildschirms. Bei empfindlichen Geräten reicht hierzu z. B. bei einer Frequenz von f = 50 Hz eine magnetische Flussdichte von ca. 0,6 µT aus. Bei LCD-Bildschirmen sind Beeinflussungen nicht möglich [10].

8.13 Mikrowellenkochgeräte (Mikrowellenherde)

Mikrowellenkochgeräte setzen zur Erwärmung von Lebensmitteln Hochfrequenzenergie ein (Abbildung 44). Sie wird von den Lebensmitteln absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Im Allgemeinen wird hierzu eine Frequenz von 2 455 MHz verwendet. In privaten Haushalten betragen die Anschlussleistungen 0,5 bis 4 kW bei einem Wirkungsgrad von ca. 50 %. Abschirmmaßnahmen sorgen dafür, dass nur ein geringer Teil der Hochfrequenzenergie aus dem Gerät austreten kann [66].

Abbildung 44:
Mikrowellenkochgerät

Nach Untersuchungen des Bundesamtes für Strahlenschutz liegen die Leistungsdichte-Messwerte für die „Leckstrahlung“ an Haushalts-Mikrowellenherden unter 10 W/m². Im Mittel lag die emittierte Leistungsdichte bei 1 % des zulässigen Emissionsgrenzwertes. Der zulässige Emissionsgrenzwert beträgt nach DIN EN 60335-2-25 [67] in 5 cm Abstand 50 W/m².

Da die emittierte Leistungsdichte mit zunehmendem Abstand abnimmt (in 30 cm Entfernung sind nur noch etwa 5 bis 10 % der an der Oberfläche des Gerätes gemessenen Leistungsdichte wirksam), ist bei einem intakten Gerät sichergestellt, dass die zulässigen Werte der BGV B 11 von 10 W/m² für den Expositionsbereich 2 beim Einsatz eines Mikrowellenherdes nicht überschritten werden. Bei offensichtlichen Defekten in der Abschirmung, z. B. bei defekten Türdichtungen, kann dies jedoch nicht garantiert werden. Daher ist darauf zu achten, dass keine defekten Mikrowellengeräte verwendet werden.

8.14 RFID-Systeme

RFID-Systeme (RFID, engl.: Radio Frequency Identification) sind Einrichtungen, die mittels magnetischer oder elektromagnetischer Felder ruhende oder bewegte Objekte erfassen können. Zu derartigen Systemen zählen elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS-Systeme, Abbildung 45) sowie Systeme zur Identifizierung, Objektortung und Verfolgung. Artikelsicherungssysteme werden in Abhängigkeit von der Frequenz unterschieden in Elektromagnetische Systeme (10 Hz bis 20 kHz), Akustomagnetische Systeme (ftyp. = 58 kHz) und in Radiofrequenz-Systeme (ftyp. = 8,2 MHz). Im Bereich der Identifizierung, Objektortung und Verfolgung nutzen die meisten Systeme Frequenzen in den lizenzfreien ISM-Bändern (ISM = Industrial-Scientific-Medical) im Bereich von 135 kHz, 13,56 MHz, 433 MHz, 868 MHz oder 2,45 GHz.

Untersuchungen an Artikelsicherungs- und Identifikationssysteme haben gezeigt, dass in der Nähe der Antennenträger, aber auch im Durchgang zwischen den Antennen, Feldstärken auftreten können, die über den zulässigen Werten der Ratsempfehlung 1999/519/EG und den zulässigen Werte des Expositionsbereiches 2 der BGV B11 liegen. In Einzelfällen können Expositionen von Personen sogar die zulässigen Werte des Expositionsbereiches 1 der BGV B11 überschreiten. Tabelle 14 gibt Beispiele für gemessene Werte.

Die Expositionszeit bei Artikelsicherungssystemen ist jedoch sehr kurz, gesundheitliche Gefährdungen für Personen sind daher unwahrscheinlich. Störbeeinflussungen von aktiven Implantaten (Herzschrittmachern) können jedoch nicht ausgeschlossen werden (siehe hierzu Abschnitt 5.4) [68 bis 70].

Abbildung 45:
Elektronisches Artikelsicherungssystem am Eingang eines Lagers

Tabelle 14:
Beispiele für an und zwischen den Antennen von Artikelsicherungssystemen gemessene Feldstärken

System	Frequenz	Magnetische Flussdichte/Feldstärke	Elektrische Feldstärke
Elektromagnetisch	75 Hz bzw. 218 Hz	1,2 mT	-
	6,3 kHz	20 A/m	-
Akustomagnetisch	58 kHz	16,4 A/m	-
Radiofrequenz	8,2 MHz	1 A/m	-
	2,45 GHZ	-	16,6 V/m; 4,5 V/m
Identifikationssystem	125 kHz	2,1 A/m	-
	13,56 MHz	13 A/m	-
	868 MHZ	-	31,2 V/m bei 20 cm Abstand

8.15 Anlagen des Mobilfunks

Für die moderne Informations- und Kommunikationstechnik wurde in Deutschland in den letzten Jahren ein System aus festinstallierten und mobilen Funkanlagen aufgebaut.

Die Netzbetreiber, die für Deutschland Mobilfunklizenzen erworben haben, betreiben derzeit rund 62 000 fest installierte Sende- (Abbildung 46) und Empfangsanlagen sowie mehr als 84 Mio. Endgeräte (Handys). Alle diese Anlagen und Geräte arbeiten in unterschiedlichen Kommunikationsnetzen mit verschiedenen Frequenzen und unterschiedlichen Leistungen nahezu flächendeckend zusammen.

Einen Überblick über die verschiedenen Netze und deren charakteristische Daten gibt Tabelle 15. Mobilfunkgeräte (z. B. Handy) arbeiten mit variablen Sendeleistungen. In Fahrzeuge fest eingebaute Mobilfunkgeräte senden mit Sendeleistungen bis zu 8 W, Handys senden mit Spitzenleistungen bis zu 2 W.

Bei der Benutzung von Mobiltelefonen wird ein Teil der Hochfrequenzenergie vom Kopf absorbiert. Wie viel von der Energie im Kopf aufgenommen wird, hängt von der Bauform des Gerätes, der Art der Benutzung, vom Typ der Antenne, von der Position der Antenne zum Kopf, von der Frequenz und von der Sendeleistung ab. Für Mobilfunkgeräte ist heute eine spezifische Absorptionsrate (SAR) von 2 Watt pro Kilogramm einzuhalten. Bei Einhaltung dieses Wertes ist nach heutigem wissenschaftlichen Kenntnisstand nicht mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu rechnen.

Abbildung 46:
Mobilfunksendeanlage

Bei der Aufstellung fest installierter Sende- und Empfangsanlagen muss beachtet werden, dass die Grenzwerte der 26. BImSchV außerhalb der vom Betreiber kontrollierten Bereiche nicht überschritten werden.

Die Einhaltung dieser Werte wird durch die Bundesnetzagentur für Sendeanlagen mit einer abgestrahlten Leistung P ≥ 10 W ERIP kontrolliert und bescheinigt. Grob kann man die Sicherheitsabstände anhand der in Tabelle 16 aufgeführten Formeln abschätzen.

Tabelle 15:
Kommunikationsnetze und charakteristische Daten ortsfester Mobilfunkstationen; Quelle: [71]

Netze des Mobilfunks			
Kommunikationsnetz	**Trägerfrequenz in MHz**	**eingespeiste Antennenleistung in W**	**Bemerkungen**
D-Netz	890 bis 960	10 (typisch) 50 (möglich)	digital gepulst 217 Hz
E-Netz	1 710 bis 1 880	10	digital gepulst 217 Hz
UMTS	1920 bis 2170	20 bis 40	FDMA und TDMA
Tetra (BOS)	380 bis 395	bis 40 ERP	TDMA (vier Zeitschlitze pro Träger)
Tetrapol	70 bis 520	bis 50	Frequenzmultiplex FDMA
Cityruf	470	100	regionale Rufanzeige
Analoger Bündelfunk Öffentlicher Bereich	410 bis 430	bis 200 ERP	geschlossene Benutzergruppen
Digital Mobile Radio (DMR)	136 bis 174 403 bis 470	bis 40	TDMA (zwei Zeitschlitze pro Träger)

ERP = Effective radiated power; FDMA = Frequency Division Multiple Access; TDMA = Time Division Multiple Access

Tabelle 16:
Formeln zur Abschätzung des Sicherheitsabstandes von festinstallierten Funkanlagen; Quelle: [72]

Frequenzbereich	**Sicherheitsabstand r in m**	**Bemerkungen**
30 bis 400 MHz	$r = 0{,}0089 \sqrt{P}$	P = der Antenne zugeführte maximale Leistung in W f = Frequenz in MHz
400 bis 2 000 MHz	$v = 1{,}78 \sqrt{P}/f$	
2 bis 300 GHz	$r = 0{,}04 \sqrt{P}$	

Bei diesem vereinfachten Berechnungsverfahren wird davon ausgegangen, dass die gesamte Sendeleistung gleichmäßig in alle Richtungen ausgesendet wird. Antennen mit rundstrahlender Charakteristik sind beispielsweise Stab-, λ/4-Vertikal-, Drehkreuz-, Ring- und Schmetterlingsantennen sowie Rohrschlitzstrahler. Besteht dagegen die Notwendigkeit, die Feldstärke im Fernfeld einer Feldquelle zu bestimmen, so ist dies z. B. für einen Elementardipol anhand der Gleichungen (15) und (16) möglich [2].

$$E \approx 300 \cdot \frac{\sqrt{P}}{r} \cdot \sin\theta \qquad (15)$$

$$H \approx 0{,}79 \cdot \frac{\sqrt{P}}{r} \cdot \sin\theta \qquad (16)$$

mit

E	=	elektrische Feldstärke in mV/m
P	=	Sendeleistung der Antenne in kW
r	=	Abstand zur Antenne in km
H	=	magnetische Feldstärke in mA/m
sin θ	=	Winkel der Energieströmung vertikal zu den Kugelkoordinaten

8.16 Radaranlagen

Radaranlagen (Abbildung 47) sind Ortungssysteme, die elektromagnetische Felder ausstrahlen und die von Objekten reflektierten Felder wieder empfangen.

Abbildung 47:
Radaranlage

Anhand der reflektierten Felder können Informationen über die Lage, Beschaffenheit oder die Bewegung eines Objektes abgeleitet werden. Radaranlagen können sowohl mobil z. B. als Bordradar auf Schiffen oder Flugzeugen als auch stationär zur Flugüberwachung, Wetterbeobachtung oder zur Verkehrsüberwachung betrieben werden. Sie arbeiten im Frequenzbereich von einigen hundert MHz bis ca. 40 GHz. Die abgestrahlte Leistung variiert zwischen einigen Milliwatt z. B. beim Verkehrsradar und einigen Gigawatt z. B. beim Luftraumüberwachungsradar [73 bis 75]. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die Betriebsfrequenzen und abgestrahlten Leistungen verschiedener Radaranlagen.

Radaranlagen erzeugen einen kurzen hochfrequenten Impuls mit hoher Leistung. Die abgestrahlte Energie ist in einem Strahl gebündelt. Außerhalb des Strahls fällt die HF-Energie schnell ab. In vielen Fällen sind die Werte um mehrere Größenordnungen geringer als im Hauptstrahl. Neben dem Hauptstrahl weisen viele Radaranlagen im Nahbereich der Antennen zahlreiche „Nebenkeulen“ auf, die zu erheblichen Immissionen führen können [76].

Tabelle 17:
Betriebsfrequenzen und abgestrahlte Leistungen von Radaranlagen

Radaranlage	Frequenz in GHz	Abgestrahlte Leistung		Typische Exposition
		Spitze	Mittel	
Luftraumüberwachungsradar	1,25 bis 1,26 1,34 bis 1,35	16 GW	33 MW	-
Schiffsradar	1,55 bis 1,65 3,02 bis 3,10 9,45	250 MW 19 MW 32 MW	250 kW 19 kW 32 kW	-
Ziviles Flughafenradar	1 bis 10	0,2 kW bis 2,5 MW		-
Wetterradar	5,47 bis 5,65 9,3 bis 9,5	0,1 bis 0,25 MW		100 m: 10 W/m² 1 km: 0,1 W/m²
Wasserstraßen-Überwachungsradar	8,83 bis 9,23 34,5 bis 35,2	2 GW 100 MW	2 MW 100 kW	
Verkehrsradar	9,0 bis 35	0,5 bis 100 mW		3 m: 0,25 W/m² 10 m: < 0,01 W/m²

Eine Gefährdung von Personen durch elektromagnetische Felder ist nur in der Nähe der Radaranlage möglich. Im Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 10 GHz dringt die Energie des elektromagnetischen Feldes in Abhängigkeit von der Frequenz in das Gewebe ein. Die dabei absorbierte HF-Energie kann dann zu Gewebeerwärmungen führen. Oberhalb einer Frequenz von 10 GHz und einer Leistungsdichte über 1000 W/m² sind Linsentrübungen der Augen und Hautverbrennungen möglich. Dieser Wert der Leistungsdichte liegt um den Faktor 20 über dem Grenzwert bzw. Basiswert [17]. In den öffentlich zugänglichen Bereichen ist die Feldeinwirkung von Radaranlagen so gering, dass Beeinträchtigungen der Bevölkerung nicht zu erwarten sind. Bei Verkehrs-Radargeräten, die auf Schiffen und im Straßenverkehr verwendet werden, sind auch bei einer geringen Entfernung keine Gefährdungen von Personen zu erwarten.

Maßnahmen zum Schutz für Arbeitnehmer können an Radaranlagen erforderlich werden, wenn z. B. bei Wartungsarbeiten ein Aufenthalt in nicht der Öffentlichkeit zugängliche Bereiche erforderlich ist. Bei Tätigkeiten in der unmittelbaren Umgebung der Anlage ist zunächst die Einhaltung der zulässigen Werte zu prüfen. Werden diese Werte überschritten, sind Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition anzuwenden. Hierfür infrage kommen Abschirmmaßnahmen durch persönliche Schutzausrüstungen, wie Schutzanzüge, Handschuhe und Brillen. Kann auf diesem Weg die Einhaltung zulässiger Werte nicht sichergestellt werden, ist die Anlage abzuschalten.

Bei Arbeiten an der Verstärkeranlage, z. B. an den Verstärkerröhren eines Radars sind Maßnahmen im Sinne der Röntgenverordnung vorgesehen, da hier auch ionisierende Strahlung auftritt.

9 Beurteilung der Ergebnisse

Um festzustellen, ob die in den Richtlinien, Vorschriften, Normen und Regeln festgelegten Anforderungen eingehalten werden, müssen die an den Arbeitsplätzen gemessenen Werte der Feldstärke und Leistungsflussdichte in Beziehung zu den dort genannten zulässigen Werten gesetzt werden.

In Tabelle 18 sind die zulässigen Werte der Expositionsbereiche 1 und 2 aus der BGV B11 den Messwerten für die im Abschnitt 8 aufgeführten Anlagen und Maschinen gegenübergestellt.

Tabelle 18:
Vergleich der Messwerte mit den zulässigen Werten für verschiedene Anlagen und Maschinen

	Anwendung	Frequenz	Zulässige Werte nach der BGV B11 Expositionsbereich		Typische Messwerte am Arbeitsplatz
			1	2	
1	Aluminiumelektrolyse	0 Hz	67,9 mT	21,22 mT	100 mT
2	Galvanikanlagen	0 Hz			4 mT
3	Trafostation	50 Hz			10 bis 100 µT
4	Niederspannungsverteilungsanlagen (NSV)	50 Hz			› 100 µT
5	Stromschiene NSV-Trafo	50 Hz			› 10 mT
6	Hochspannungsanlagen	50 Hz	1,36 mT 21,32 kV/m	0,42 mT 6,66 kV/m	6 bis 300 µT 0,5 bis 15 kV/m
7	Hochspannungskabel	50 Hz			‹ 100 µT
8	Asynchronmotor (900 kW)	50 Hz			120 µT
9	Linearmotor	0 Hz			650 mT
10	Elektrohandwerkzeuge	50 Hz			200 µT bis 3mT
11	Werkzeugmaschinen	0 Hz/50 Hz	67,6/1,36 mT	21,22/0,42 mT	500 µT, ‹ 50 µT
12	Magnetische Spann- und Halteeinrichtungen	0 Hz	67,9 mT	21,22 mT	50 mT bis 1,5 T
13	Lichtbogen-Pfannenofen	50 Hz	1,36 mT	0,42 mT	60 bis 100 µT
14	Induktions-Schmelzofen	250 Hz	0,27 mT	0,085 mT	10 bis 70 µT
15	Lötanlage	9,6 kHz	67,9 µT	21,22 µT	50 bis 500 µT
16	Induktionshärten	500 kHz	1066 V/m 9,8 A/m	333,3 V/m 4,7 A/m	60 bis 200 V/m 1 bis 3 A/m
		10 kHz	67,9 µT	21,22 µT	30,14 µT
		10 kHz	67,9 µT	21,22 µT	2,8 mT
17	Induktionstiegelofen	0,9 kHz	75,44 µT	23,57 µT	11,3 mT
		1 kHz	67,9 µT	21,22 µT	7,4 mT
		50 Hz	1,36 mT	0,42 mT	25 mT
18	Stangenerwärmungsanlage	9 kHz	67,9 µT	21,22 µT	4,6 mT bei 3 cm Abstand; 36 µT bei 0,5 m Abstand
19	Probenerwärmungsanlage	10 kHz	67,9 µT	21,22 µT	1 mT
20	Schweißnaht-Glühen	10 kHz	67,9 µT	21,22 µT	2,2 mT
21	Induktionskochfelder	20 kHz	67,9 µT	21,22 µT	65 µT
22	Lichtbogenschweißen (MIG, MAG, WIG) gepulst	100 Hz	679 µT	212 µT	650 µT
23	Widerstandsschweißen (handgeführt) 50 Hz	50 Hz	1,36 mT √2 · V[1)]	0,42 mT √2 · V[1)]	10 mT bis 35 mT gepulst

[1)] gemäß BGV B11 Anlage 1, Abschnitt 3

	Anwendung	Frequenz	Zulässige Werte nach der BGV B11 Expositionsbereich		Typische Messwerte am Arbeitsplatz
			1	2	
24	Widerstandsschweißen (handgeführt) 1 000 Hz	2 kHz	67,9 µT √2 · V[1)]	21,22 µT √2 · V[1)]	› 1 mT (gepulst)
25	Kunststoffschweißmaschine	27 MHz	61,4 V/m 0,18 A/m	27,5 V/m 0,08 A/m	100 bis 1 000 V/m 0,2 bis 0,3 A/m
26	Stanzautomat	27 MHz	61,4 V/m 0,18 A/m	27,5 V/m 0,08 A/m	6 V/m 0,09 A/m
27	Trockner	13 MHz	61,4 V/m 0,37 A/m	27,5 V/m 0,18 A/m	8 bis 150 V/m 0,08 bis 0,22 A/m
28	Klebebinder	27 MHz	61,4 V/m 0,18 A/m	27,5 V/m 0,08 A/m	10 V/m 0,015 A/m
29	RFID-Systeme	75 Hz 6,3 kHz 8,2 MHz	905 µT 127,3 µT 0,6 A/m	290 µT 21,22 µT 0,28 A/m	1,2 mT 20 A/m 1 A/m

[1)] gemäß BGV B11 Anlage 1, Abschnitt 3

Der Vergleich der Messwerte mit den zulässigen Werten in Tabelle 18 zeigt, dass bei Induktions- und kapazitiven Erwärmungsanlagen sowie Widerstandsschweißeinrichtung die zulässigen Werte zum Teil deutlich überschritten werden. Ferner ist zu erkennen, dass bei den Anlagen und Maschinen mit hochfrequenten Feldquellen (f › 91 kHz) die typischen Werte für das elektrische und das magnetische Feld unterschiedlichen Expositionsbereichen zugeordnet werden müssten (Lfd. Nr. 26 und 27). Da dies nicht erlaubt ist, gilt stets der Kritischere der beiden Bereiche. Bei den Anlagen und Maschinen der lfd. Nr. 10, 15 bis 25, 27 und 29 können die zulässigen Werte des Expositionsbereiches 1 teilweise erheblich überschritten werden.

Aus diesem Grund sollte man zur Bewertung der Messergebnisse auch die notwendige Aufenthaltsdauer des Personals an den Anlagen und Maschinen einbeziehen.

Ist die Expositionsdauer im Bereich niederfrequenter Felder ≤ 2 h/Tag und bei hochfrequenten Feldern ‹ 6 min, dann können gegenüber den zulässigen Werten des Expositionsbereiches 1 erhöhte Werte angewendet werden (siehe hierzu BGV B11 und BGI 5011). Liegt die zu erwartende Expositionsdauer über diesen Zeiten, besteht diese Möglichkeit einer besonderen Bewertung nicht und es müssen Maßnahmen zur Herabsetzung der Exposition getroffen werden.

10 Schutzmaßnahmen

10.1 Technische Maßnahmen

Für Personen, die in Bereichen arbeiten müssen, in denen die zulässigen Werte überschritten werden, sind besondere Maßnahmen erforderlich, mit denen die Expositionen auf eine vertretbare Höhe reduziert werden. In der Regel zielen die Maßnahmen darauf ab, den Abstand zur Feldquelle zu vergrößern oder die Feldquelle so zu kapseln oder abzuschirmen, dass die emittierten Feldstärken ausreichend reduziert werden. Bei niederfrequenten magnetischen Feldern ist dies in der Regel mit einem vertretbaren Aufwand nicht möglich, hier sollten ausreichende Sicherheitsabstände gewählt werden.

Bei hochfrequenten Feldern ist die optimale Abschirmung eine allseitig geschlossene elektrisch leitfähige Kugel. In realen Anwendungen lässt sich dieser Idealfall jedoch nicht erreichen. Trotzdem muss eine Schirmungsmaßnahme unter Beachtung der Randbedingungen wie Maße und Geometrie in ihrer Wirkung der geschlossenen Kugel möglichst nahe kommen, um hohe Schirmungsdämpfungswerte zu erreichen.

Damit eine geschlossene leitfähige Hülle entstehen kann, müssen die an der Schirmung beteiligten Einzelteile an den Kontaktstellen leitend miteinander verbunden sein. Dabei ist darauf zu achten, dass der Kontakt auch langfristig gut leitend ist. Dies kann erreicht werden, wenn

- die Kontaktkraft einer kraftschlüssigen Verbindung so groß ist, dass an der Kontaktstelle eine gut leitende elektrische Verbindung entsteht
- die zu verbindenden Metallteile anhand der elektrochemischen Spannungsreihe so gewählt werden, dass die sich ergebenen Potentialdifferenzen klein sind.

Ferner ist darauf zu achten, dass eventuell auftretende Schlitze und Spalten nicht länger sein dürfen als 1/10 der Wellenlänge des abzuschirmenden elektromagnetischen Feldes. Wenn Öffnungen nicht vermieden werden können, weil z. B. Leitungen und Kabel in eine Schirmhülle eingeführt werden müssen, können solche Durchbrüche z. B. durch angeflanschte „Kamine“ HF-dicht gemacht werden. Dies sind spezielle Kabelkanäle, bei denen die Eigenschaften von Hohlleitern ausgenutzt werden: Elektromagnetische Wellen, die kleiner sind als die kritische Frequenz eines Hohlleiters, sind nicht ausbreitungsfähig und erfahren eine aperiodische Dämpfung [77; 78]. Für einen eckigen Hohlleiter kann diese Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz nach Gleichung (17) berechnet werden.

$$D(f) = 27{,}3 \cdot \frac{\ell}{a} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \qquad (17)$$

mit

D	=	Dämpfung in dB
f	=	Frequenz in s^{-1}
ℓ	=	Länge des Hohlzylinders in m
a	=	größte Öffnungsweite des Hohlzylinders in m
fc	=	kritische Frequenz in s^{-1}

Die kritische Frequenz hängt von der Öffnungsweite ab. Sie wird bestimmt nach Gleichung (18).

$$f_c = \frac{c_0}{2a} \qquad (18)$$

mit

f_c	=	kritische Frequenz in s^{-1}
c_0	=	Lichtgeschwindigkeit in m/s
a	=	größte Öffnungsweite des Hohlzylinders in m

10.2 Persönliche Schutzausrüstung

Lassen sich weder technische noch organisatorische Schutzmaßnahmen anwenden, dann müssen Persönliche Schutzausrüstungen eingesetzt werden. Im hochfrequenten elektromagnetischen Feld kann als Persönliche Schutzausrüstung eine Hochfrequenz-Schutzkleidung getragen werden. Hochfrequenz-Schutzkleidung (kurz: HF-Schutzkleidung) schwächt die Intensität des elektromagnetischen Feldes so weit ab, dass im Innern die Grenzwerte eingehalten werden können. Abbildung 48 zeigt die Anwendung einer solchen HF-Schutzkleidung auf einem Sendeturm.

Abbildung 48:
Anwendung von HF-Schutzkleidung

HF-Schutzkleidung (Abbildung 49) wirkt wie ein Faraday-Käfig. Aus einem vollständig von einem elektrischen Leiter umschlossenen Raum wird das elektromagnetische Feld verdrängt. Um dies zu gewährleisten, muss die Schutzkleidung aus einem leitenden Material bestehen und den Körper vollständig umschließen. Realisieren lässt sich solch eine Kleidung z. B. in Form eines Arbeitsoveralls, an dem eine Kopfhaube angebracht ist, und der zusammen mit Handschuhen und Socken getragen wird.

Abbildung 49:
Hochfrequenz-Schutzkleidung

Das Anzugsmaterial ist durch metallische Beschichtung oder das Einweben von Metallfäden leitfähig. Das Gesichtsfeld der Kopfhaube kann aus einem Drahtgitter bestehen, sodass neben der ausreichenden Schirmwirkung auch ein ausreichender Luftdurchsatz zum Atmen gewährleistet ist [79 bis 81].

Zur Auswahl und zum Einsatz von HF-Schutzkleidung gibt die BGI 844 [82] Auskunft. Sie definiert einen HF-Schutzfaktor, der aus der elektromagnetischen Schirmdämpfung einer HF-Schutzkleidung berechnet werden kann. Der erforderliche Schutzfaktor ergibt sich aus dem Vergleich der maximalen an der Arbeitsstelle ermittelten Feldstärken mit dem nach [17] für den Expositionsbereich 1zulässigen Werten. Nur wenn der Schutzfaktor der Schutzkleidung einen Wert von $F \leq 10$ aufweist, kann diese benutzt werden. Hat der Schutzfaktor einen Wert > 10, dann darf aus Sicherheitsgründen keine HF-Schutzkleidung verwendet, d. h. das HF-Feld nicht betreten werden. Diese Beschränkung wurde eingeführt, damit beim Aufenthalt in sehr starken elektromagnetischen Feldern nicht unmittelbare Gefahren, z. B. durch Arcing (Lichtbogen), Entflammen oder beim Zerreißen der Schutzkleidung, entstehen können. In solch starken Feldern ist die Verwendung von Persönlicher Schutzausrüstung keine geeignete Maßnahme. Ferner ist darauf zu achten, dass der erforderliche Schutzfaktor in dem Frequenzbereich erreicht wird, in dem die Feldquellen am Einsatzort emittieren. Darüber hinaus ist vor dem Einsatz der Schutzkleidung zu prüfen, ob sie für die Arbeitssituation und die individuellen Erfordernisse des Trägers geeignet ist, d. h. es ist auch zu prüfen, ob sich die Schutzkleidung mit anderen Schutzausrüstungen kombinieren lässt (z. B. Absturzsicherung, Schutzhelm und Schutzschuhe). Weitere für den Einsatz von HF-Schutzkleidung notwendige Bedingungen z. B. zur Pflege können [82; 83] entnommen werden.

11 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der vorliegende Report zeigt, dass an einer Vielzahl von Arbeitsplätzen die Beschäftigten hohen Expositionen gegenüber elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sein können. Kommt zur Bearbeitung eines Werkstückes wie beim Schweißen und Erwärmen von Metallen und Kunststoffen elektrische Energie ohne weitere Umwandlung zum Einsatz, kann die Exposition besonders hoch sein, sodass Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition notwendig sind. In der Regel ist es dann ausreichend, einen bestimmten Sicherheitsabstand einzuhalten. Weiterhin zeigt der Report, dass es durchaus Arbeitsplätze gibt, an denen die Exposition der Beschäftigten keine große Bedeutung hat. Dies trifft beispielsweise für Büroarbeitsplätze zu. Ein besonderes Problem, dessen Bedeutung zunimmt, stellt die Gruppe der Implantatträger dar. Nach einer Implantation ist dieser Personenkreis aus medizinischer Sicht meist wieder voll belastbar, aber aufgrund der Implantateigenschaften können oftmals Gesundheitsgefährdungen unterhalb der für die Allgemeinbevölkerung zulässigen Werte nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin zeigt der Report, dass sich anhand der derzeitigen Regelungen die Gefährdung gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern an Arbeitsplätzen abschätzen und beurteilen lässt. Insbesondere die Regelungen der Unfallversicherungsträger zur Beurteilung der Exposition gegenüber gepulsten niederfrequenten Feldern ermöglichen die Beurteilung komplexer Felder (siehe Abschnitt 8.8.2). Neue Regelungen, die für die nächsten Jahre vorgesehen sind, wie die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder, müssen sich daher an den bestehenden Regelungen orientieren, diese ggf. verbessern und vorhandene Lücken schließen.

Literatur

[1] *Brüggemeyer, H.; Dickob, H.; Eggert, S.; Fischer, M.; Friederich, G.; Möbius, U.; Reidenbach, H.D.; Ruppe, I.; Wolf, F.:* Leitfaden Nichtionisierende Strahlung, Elektromagnetische Felder. Hrsg.: Fachverband für Strahlenschutz, Köln 2005

[2] *Armbrüster, H.; Grünberger, G.:* Elektromagnetische Wellen im Hochfrequenzbereich. Hüthig und Pflaum, München 1978

[3] *Hoffmann, E.; Schwetz, P.:* Der Mensch im elektrischen und magnetischen Erdfeld. ETZ (1995) Nr. 6-7, S. 52-58

[4] *Haubrich, H.J.:* Der Mensch im elektrischen und magnetischen Niederfrequenzfeld. ETZ (1994) Nr. 3, S. 128-133

[5] *Tobisch, R.; Irnich, W.:* Mobilfunk im Krankenhaus. Schiele und Schön, Berlin 1999

[6] *Börner, F.; Brüggemeyer, H.; Eggert, S.; Fischer, M.; Heinrich, H.; Hentschel, K.; Neuschulz, H.:* Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz (Forschungsbericht F 400). Hrsg.: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Bonn 2010

[7] *Bernhardt, J. H.:* Hochfrequenzstrahlung: Mechanismen der Wechselwirkung; Biologische Wirkungen und Risikobewertung. In: Tagungsband EMV 90, Karlsruhe 13.-15. März 1990. Hrsg.: VDE, Berlin 1990, S. 1-18

[8] Elektromagnetische Felder (M470) Sicherheit Kompakt; Hrsg.: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Wien 2002

[9] *Hennies, K.; Neitzke, H.-P.; Voigt, H.:* Mobilfunk und Gesundheit; Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes. Hrsg.: ECOLOG-Institut, Hannover 2000

[10] Innenraumarbeitsplätze, Vorgehensempfehlung für die Ermittlungen zum Arbeitsumfeld. Report der gewerblichen Berufsgenossenschaften, der Unfallversicherungsträger der öffentlichen Hand und des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz — BGIA. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2005

[11] *Fischer, M.; Pechoc, W.; Seibel, D.:* Elektrische Gefährdungen Kommentierung TRBS 2131, Kommentierung der Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln 2010

[12] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and elektro-magnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74 (1998) Nr. 4, S.494-522

[13] Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. Health Phys. 96 (2009) Nr. 4, S. 504-514

[14] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 99 (2010) Nr. 6, S. 818-836

[15] *Bernhardt, J. H.:* Grundsätze der ICNIRP-Aktivitäten zum Schutz vor Nichtionisierender Strahlung. In: 31. Jahrestagung für Strahlenschutz – NIR 99. 27. September bis 1. Oktober 1999. TÜV-Verlag, Köln 1999, S. 321-333

[16] *Bernhardt, J. H.:* Entwicklung und praktische Umsetzung der EMF-Richtlinien. 31. Jahrestagung für Strahlenschutz – NIR 99. 27. September bis 1. Oktober 1999. TÜV-Verlag, Köln 1999, S. 435-442

[17] BGV B11: Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2001

[18] BGR B11: BG-Regeln Elektromagnetische Felder. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2001

[19] 1999/519/EG: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz-300 GHz). ABl. EG (1999) Nr. L 199, S. 59-70

[20] Richtlinie 2004/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (18. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). ABl. EU 47 (2004) Nr. L 159, S. 1-26

[21] Richtlinie 2008/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2008 zur Änderung der Richtlinie 2004/40/EG über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder). ABl. EU 51 (2008) Nr. L 114, S. 88-89

[22] *Fischer, M.:* EU-Richtlinie/2004/40/EG, Elektromagnetische Felder, Handlungshilfen und betriebliche Umsetzung. Monografie, 13. Vortragsveranstaltung Elektrotechnik, Nürnberg 30. und 31. Mai 2006. Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln

[23] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). ABl. EU 49 (2006) Nr. L 157, S. 24-86

[24] 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder — 26. BImschV). BGBl. I (1996) Nr. 66, S. 1966-1968

[25] *Fischer, M.:* Zulässige Werte nach der neuen Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11). In: 31. Jahrestagung für Strahlenschutz – NIR 99. 27. September bis 1. Oktober 1999. TÜV-Verlag, Köln 1999, S. 335-391

[26] *Fischer, M.:* Die neue berufsgenossenschaftliche Vorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11). 31. Jahrestagung für Strahlenschutz – NIR 99. 27. September bis 1. Oktober 1999, Köln

[27] *Fischer, M.; Scholmann, J.:* Messtechnische Auswirkungen der neuen BG-Vorschrift „Elektromagnetische Felder“. GIT Sicherheit + Management (1999) Nr. 5, S. 500-504

[28] DIN EN 12198: Sicherheit von Maschinen, Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung. Teil 1: Allgemeine Leitsätze (10.00). Teil 2: Messverfahren für die Strahlenemission (E 01.00). Teil 3: Verminderung der Strahlung durch Dämpfung oder Abschirmung (01.00). Beuth, Berlin 2000

[29] E DIN VDE 0848-3-1: Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern — Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz (05.02). Beuth, Berlin 2002

[30] *Eggert, S.; Siekmann, H.:* KAN-Bericht 9, Normung im Bereich der nichtionisierenden Strahlung. Hrsg.: Kommission Arbeitsschutz und Normung, Sankt Augustin 2000

[31] DIN EN 50499, VDE 0848-499: Verfahren für die Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern gegenüber elektromagnetischen Feldern. Beuth, Berlin 2009

[32] DIN EN 50519, VDE 0848-519: Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern von industriellen induktiven Elektrowärmeanlagen. Beuth, Berlin 2010

[33] DIN EN 50496, VDE 0848-496: Ermittlung der Exposition von Arbeitnehmern gegenüber elektromagnetischen Feldern und Bewertung des Risikos am Standort eines Rundfunksenders. Beuth, Berlin 2009

[34] BGI 5111: BG-Information Beeinflussung von Implantaten durch elektromagnetische Felder, eine Handlungshilfe für die betriebliche Praxis. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2009[

[35] *Fischer, M.:* Neue BGI 5111: Beeinflussung von Implantaten durch elektromagnetische Felder – Eine Handlungshilfe für die betriebliche Praxis. Brücke (2009) Nr. 6, S. 13-15

[36] DIN EN 50413, VDE 0848-1: Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz), Deutsche Fassung EN 50413: 2008. Beuth, Berlin 2009

[37] BGI 5011: BG-Information Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen. Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln November 2006

[38] *Molla-Djafari, H.; Rabisch, G.; Neubauer, G.; Giczi, W.; Cecil, S.; Gonter, J.; Lamedschwandner, K.:* Belastungen von Schweißern durch elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz. Report Nr. 46. Hrsg.: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Wien 2008. www.auva.at/mediaDB/529369_R46.pdf

[39] Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn, 2005

[40] DIN EN 62311 (VDE 0848-211): Bewertung von elektrischen und elektronischen Einrichtungen in Bezug auf Begrenzungen der Exposition von Personen in elektromagnetischen Feldern (0 Hz-300 GHz) (IEC 62311:2007, modifiziert), Deutsche Fassung EN 62311:2008. Beuth, Berlin 2008

[41] *Gabriel, S.; Lau, R. W.; Gabriel, C.:* The dielectric properties of biological tissue: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Biol. (1996), S. 2271-2293

[42] Empire XCcel, THE MORE EFFECTIVE 3D EM SIMULATION TOOL, IMST GmbH

[43] *Krause, N.:* Niederfrequente elektromagnetische Felder, Grenzwerte und Sicherheit, EG-Richtlinienvorschlag „Physikalische Einwirkungen“. 7. Vortragsveranstaltung „Elektrotechnik”. Nürnberg 1993

[44] Elektrische und magnetische Felder im Alltag. Kapitel 3: Elektromagnetische Felder in der Umwelt des Menschen. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/e-smog/kap-03.htm

[45] *Bauer, H.; Bohn, T.:* Magnetfeldbelastung durch Transformatorenstationen. EMC-Kompendium (1999), S. 296-300

[46] *Bauer, H.:* Maßnahmen gegen Starkstrombeeinflussungen von Geräten. Handbuch Elektromagnetische Verträglichkeit. Verlag Technik, Berlin 1992

[47] *Gonschorek, K.-H.:* EMV-Messungen an elektroenergetischen Anlagen. EMC-Journal (2000) Nr. 3, S. 44-50

[48] *Plotzke, O.; Stenzel, E.:* Niederfrequente Energieanlagen, Umsetzung der 26. BImSchV mit Hilfe von Modellierungs-, Optimierungs- und Dokumentationsmethoden. EMC-Kompendium (1998), S. 290-293

[49] *Plotzke, O.:* Magnetische Flussdichte an Niederspannungsverteilungen. EMC Kompendium (2002), S. 203-205

[50] *Plotzke, O.; Pfister, K.:* Magnetische Flussdichte an Netzstationen. EMC Journal (1998) Nr. 4, S. 64-66

[51] *Schneider, K. H.:* Wirkungen niederfrequenter Felder auf den Menschen. Elektrizitätswirtschaft (1994) Nr. 17, S. 991-1002

[52] *Eder, H.:* Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz. Ergebnisse einer Messreihe des LfAS. Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik (LfAS), München

[53] *Mülbauer, A.:* Magnetische Streufelder in der Umgebung von Induktionsanlagen. EMC-Kompendium (1999), S. 85

[54] *Müller, R., Rudolph, W.:* BGI 839, Elektromagnetische Felder in Metallbetrieben. Hrsg.: Vereinigung der Metallberufsgenossenschaften, Köln 2003

[55] EMF – Data 2000, Expositionsdatenbank nach BGV B11. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln

[56] *Viellard, C.; Romann, A.; Lott, U.; Kuster, N.:* B-Field exposure from induction cooking appliances. Hrsg.: Foundation for Research in Information Technology in Society, Zürich 2006

[57] DIN EN60335-2-6, VDE 0700-6: Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke — Teil 2-6: Besondere Anforderungen für ortsfeste Herde, Kochmulden, Backöfen und ähnliche Geräte (IEC 60335-2-6:2002, modifiziert + A1:2004 + A2:2008); Deutsche Fassung EN 60335-2-6:2003 + A1:2005 + Cor. :2007 + A2:2008 + A11:2010. Beuth, Berlin 2011

[58] M666 Sicherheit Kompakt, Elektromagnetische Felder beim Schweißen. Hrsg.: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Wien 2010

[59] *Börner, F.:* BGIA-Report 2/2009, Elektromagnetische Felder an handgeführten Punktschweißzangen (BGIA-Report 2/2009). Hrsg.: BGIA — Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz, Sankt Augustin 2009

[60] *Rose, G.:* Fundamente der Elektronik. Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1969

[61] *Brüggemeyer, H.:* Elektrische und magnetische Felder an Arbeitsplätzen mit Plastikschweißmaschinen. Hrsg.: Niedersächsisches Sozialministerium, Hannover 1996

[62] Strahlenthemen – Mobilfunk und Sendetürme. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz

[63] Der EMF Messdienst. Info CD 6. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln 2003

[64] Funkanwendungen im Alltag, Handys, WLAN, Bluetooth und andere. Hrsg.: VBG Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, Hamburg 2007

[65] *Schmid, G.; Lager, D.; Preiner, P.; Überbacher, R.; Neubauer, G.; Cecil, S.:* Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn 2005

[66] Weitere Anwendungen. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz, München. www.bfs.de/de/elektro/hff/anwendungen/WeitereAnwendungen.html

[67] DIN EN 60335-2-25, VDE 0700-25: Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke — Teil 2-25: Besondere Anforderungen für Mikrowellenkochgeräte und kombinierte Mikrowellenkochgeräte (IEC 61B/384B/CDV:2008); Deutsche Fassung FprEN 60335-2-25:2008. Beuth, Berlin 2009

[68] RFID, das kontaktlose Informationssystem. Hrsg.: Bundesnetzagentur, Bonn. http://emf2/bundesnetzagentur.de/pdf/RFID-BNetzA.pdf

[69] *Schmid, G.; Cecil, S.:* Bestimmung der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern, die durch den Einsatz von RFID Technologien entstehen. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter 2009

[70] Warensicherungsanlagen. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter. www.bfs.de/de/elektro/papiere/warensich.html/printversion

[71] Informationszentrum Mobilfunk. www.izmf.de

[72] *Dormagen, H.-G.; Kerber, J.:* Arbeiten in elektromagnetischen Feldern. Gesundheitsgefahren — Schutzmaßnahmen. Bau-BG Rheinland und Westfalen (1999) Nr. 4, S. 164-168

[73] Electromagnetic fields and public health: radars and human health. Fact sheet Nr. 226. Hrsg.: World Health Organization (WHO), Genf 1999

[74] EMF Handbuch, Elektromagnetische Felder: Quellen, Risiken, Schutz. Ecolog-Institut, Ort 2006

[75] Strahlenschutz bei Radio und Mikrowellen. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter. www.bfs.de/de/bfs/druck/strahlenthemen/radio_mikrowellen.html

[76] *Wuschek, M.:* Messung der hochfrequenten Immissionen von leistungsstarken Pulsradaranlagen zur Luftverkehrskontrolle. In: Tagungsband EMV 2008 — Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit. 19. bis 21. Februar 2008, Düsseldorf

[77] *Haag, V.:* EMV-gerechtes Gehäusedesign. VDE, Berlin 1998

[78] *Reiser, P.:* Flexible Kabeleinführungen für Gehäuse. EMC-Kompendium (2000), S. 169-171

[79] *Scholmann, J.; Siekmann, H.:* Hochfrequenz-Schutzkleidung — Eine neue Persönliche Schutzausrüstung. Die BG (1999) Nr. 10, S. 564-572

[80] *Siekmann, H.; Scholmann, J.:* Prüfkriterien für Schutzkleidung gegen hochfrequente elektromagnetische Felder. Forschungsbericht Fb 809, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1998

[81] *Siekmann, H.:* Schutzkleidung für hochfrequente elektromagnetische Felder. In: Arbeit und Gesundheit — Jahrbuch 2000. Universum, Wiesbaden 1999

[82] BGI 844: BG-Information Einsatz von Schutzkleidung gegen Einwirkung durch hochfrequente elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 80 MHz-1 GHz. Hrsg.: Fachausschuss Elektrotechnik, Oktober 2002

[83] DIN 32780-100: Schutzkleidung — Teil 100: Schutz gegen hochfrequente elektro-agnetische Felder im Frequenzbereich 80 MHz bis 1 GHz; Anforderung und Prüfung. Beuth, Berlin 2002