



Elektromagnetische Felder im Alltag

Aktuelle Informationen über Quellen, Einsatz und Wirkungen

IMPRESSUM

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt 86177 Augsburg, www.lfu.bayern.de
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Ulrich Ratzel, Martin Hoffmann – Referat 34 Technischer Arbeitsschutz, Lärmschutz LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt Clemens Mehnert, Dr. Thomas Kurz – Referat 28 Elektromagnetische Felder und Freizeitlärm StMUG Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit Dr. Evi Vogel – Referat 77 Lärm und Erschütterungen, nichtionisierende Strahlen
REDAKTION UND LAYOUT	ÖkoMedia Public Relations Kulturpark Berg, Teckstraße 56, 70190 Stuttgart, www.oekomedia-pr.de
BEZUG	Die Broschüre ist als gedruckte Version und als PDF-Version kostenlos erhältlich: Baden-Württemberg: www.lubw.de > Publikationen > Suche: Elektromagnetische Felder im Alltag > Warenkorb/Bestellen Bayern: www.bestellen.bayern.de > Elektrosmog BAYERN DIREKT: 089 / 122220
ISBN	978-3-88251-352-3
STAND	Oktober 2010, 2. überarbeitete Auflage (17.000)
DRUCK	AZ Druck und Datentechnik GmbH, Heisinger Straße 16, 87437 Kempten Gedruckt auf Recyclingpapier
BILDNACHWEIS	Seite 143

GEFÖRDERT DURCH

Vorwort

Tagtäglich benutzen wir privat wie beruflich elektrische Geräte. Sie alle verursachen mehr oder weniger starke elektromagnetische Felder. Die im Wohnbereich und in der Umwelt auftretenden Felder bleiben weit unter den Grenzwerten, die in der Verordnung über elektromagnetische Felder zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen festgelegt sind. Akute Gesundheitseffekte können daher nicht auftreten. Die Frage möglicher Langzeitwirkungen schwacher Felder ist noch nicht restlos geklärt, wird aber weiterhin intensiv erforscht.

Die seit vielen Jahren geführte Diskussion über mögliche Beeinträchtigungen, vor allem durch den Mobilfunk, hat mancherorts zu Besorgnissen geführt. Mit dieser Broschüre stellen wir der interessierten Öffentlichkeit den aktuellen Stand der Kenntnisse über die Eigenschaften und Wirkungen elektromagnetischer Felder zur Verfügung. Die Darstellung orientiert sich an gesicherten Fakten und ist allgemein verständlich gehalten. Sie bietet in einem fachlichen Teil Möglichkeiten zur Vertiefung. Offene Fragen werden in den wissenschaftlichen Zusammenhang eingeordnet. Dadurch ist ein hohes Maß an objektiver Information gewährleistet.

Die Umweltschutz-Kompetenzzentren von Baden-Württemberg und Bayern geben diese Broschüre gemeinsam heraus. Sie führen damit die in beiden Ländern gesammelten Erfahrungen mit nationalen und internationalen Erkenntnissen zusammen.



Margareta Barth

Präsidentin der Landesanstalt
für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg



Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle

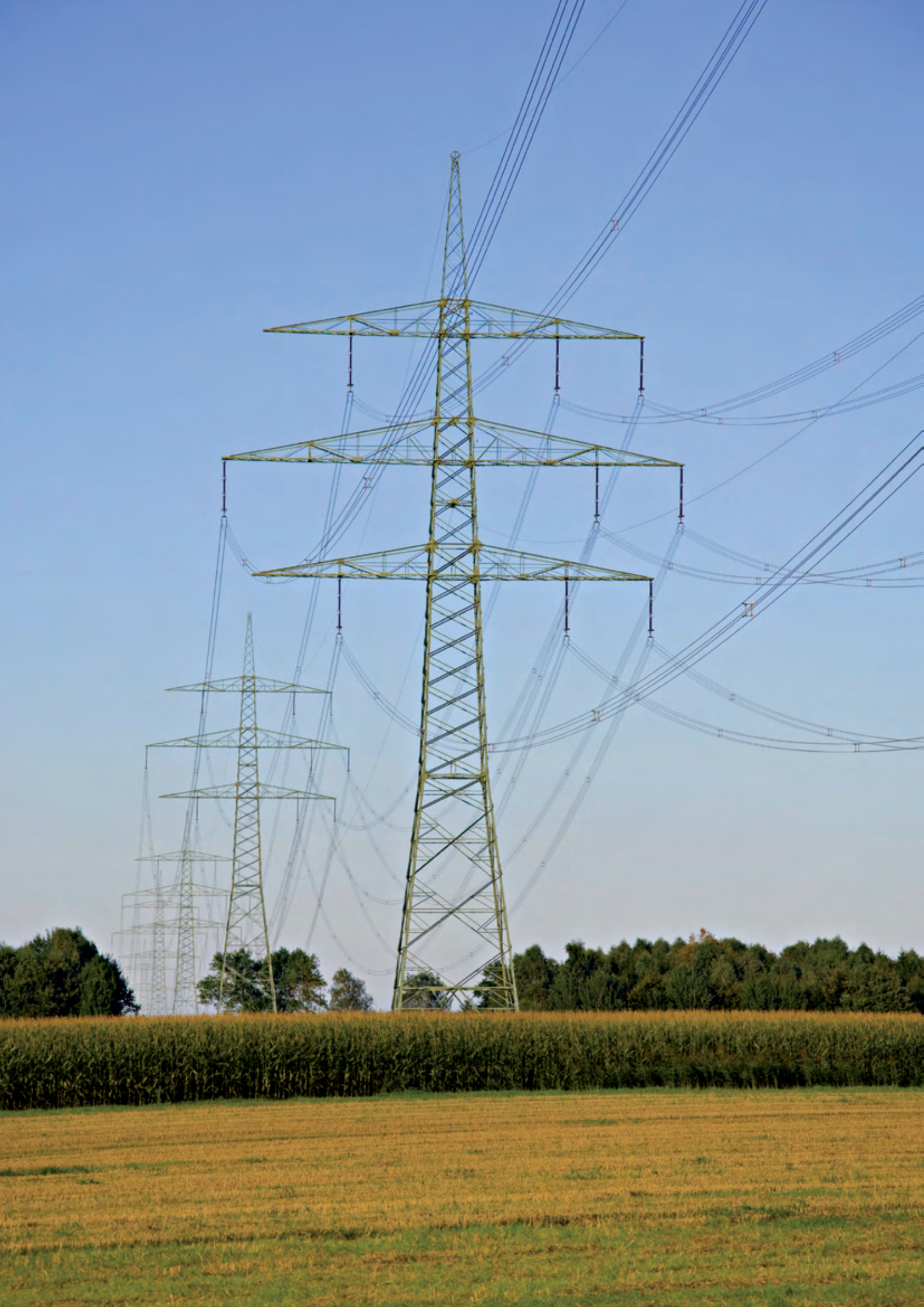
Präsident des Bayerischen Landesamtes
für Umwelt

INHALTSVERZEICHNIS

I.	AUF EINEN BLICK	7
	QUELLEN	8
	EINSATZ	14
	WIRKUNGEN	32
	GRENZWERTE	42
II.	NÄHER BETRACHTET	45
	1. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	46
	1.1 Elektrische und magnetische Felder	46
	1.2 Schwingungen und Wellen	48
	1.3 Elektromagnetisches Spektrum	50
	2. NATÜRLICHE ELEKTROMAGNETISCHE FELDER	52
	2.1 elektrisches Feld in der Atmosphäre	52
	2.2 Magnetfeld der Erde	52
	2.3 Weitere natürliche Felder	54
	2.4 Licht und Wärmestrahlung	55
	3. NIEDERFREQUENTE UND STATISCHE FELDER	56
	3.1 Elektrische und magnetische Gleichfelder	56
	3.2 Niederfrequente Felder	58
	3.2.1 Bahnstrom 16,7 Hz	58
	3.2.2 Öffentliche Stromversorgung 50 Hz	61
	3.2.3 Felder im Haushalt	66
	4. HOCHFREQUENTE FELDER	72
	4.1 Grundlagen und Messgrößen	72
	4.2 Zulassung und Überwachung von Funksendeanlagen	75
	4.3 Mobilfunk	76
	4.3.1 Der Mobilfunk-Boom	76
	4.3.2 Netzstruktur	77
	4.3.3 Immissionen einer Mobilfunkanlage	78
	4.3.4 Bauformen von Mobilfunkantennen	79
	4.3.5 Abstrahlung einer Antenne	80
	4.3.6 Berechnung der Leistungsflussdichte	82
	4.3.7 Messungen an Mobilfunksendestationen	83
	4.3.8 Immissionen eines Handys	84
	4.3.9 Tipps zur Vorsorge	86
	4.4 Rundfunk und Fernsehen	86
	4.5 BOS-TETRA-Digitalfunk	89
	4.6 Stationäre Internet-Funklösungen	90

INHALTSVERZEICHNIS

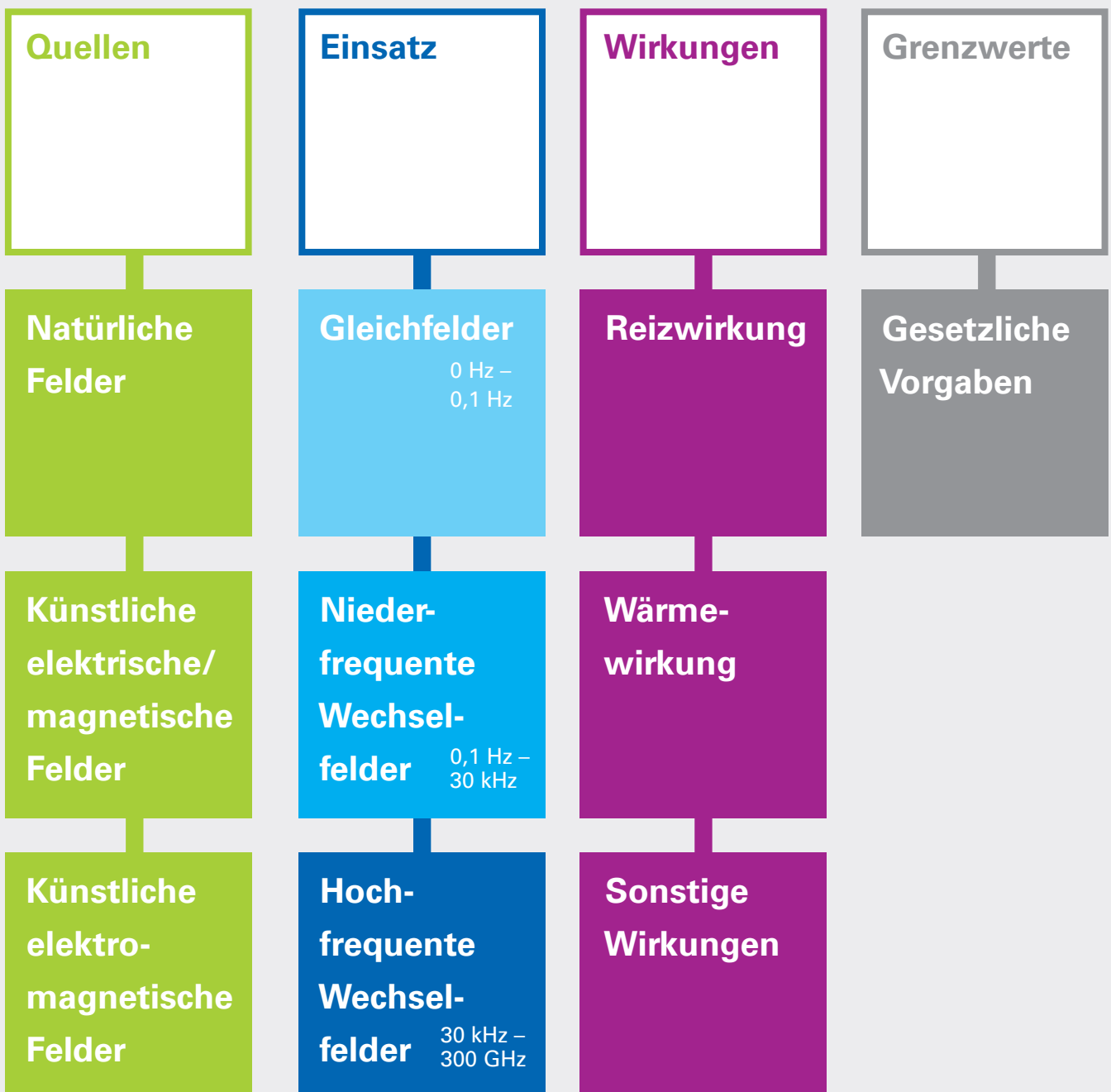
4.7	Richtfunk und Satelliteninternet	91
4.8	Amateurfunk	92
4.9	Artikelsicherungs- und Artikelerkennungsanlagen	93
4.10	Quellen im Haushalt	94
4.10.1	Mikrowellenherde	94
4.10.2	Schnurlostelefone (DECT)	95
4.10.3	Drahtlose Heimnetzwerke (WLAN)	95
4.10.4	Bluetooth	96
4.10.5	Babyfone	96
4.11	EMF-Monitoring in Bayern und Baden-Württemberg	97
4.11.1	Programme Bayern	98
4.11.2	Programme Baden-Württemberg	99
4.11.3	Vergleich der Untersuchungen	101
5.	BIOLOGISCHE WIRKUNGEN	102
5.1	Einführung	102
5.2	Akute Wirkungen niederfrequenter Felder	103
5.2.1	Reizwirkungen	104
5.2.2	Indirekte Wirkungen	106
5.2.3	Weitere Wirkungen	107
5.3	Akute Wirkungen hochfrequenter Felder	108
5.3.1	Wärmewirkung	108
5.3.2	Hochfrequenztherapie	110
5.3.3	Absorption hochfrequenter Strahlung	110
5.3.4	Weitere Wirkungen	112
5.4	Langzeitwirkungen	113
5.4.1	Niederfrequente Felder und Krebs	113
5.4.2	Hochfrequente Felder und Krebs	115
5.4.3	Weitere Langzeitwirkungen hochfrequenter Felder	116
5.5	Befindlichkeitsstörungen	117
5.6	Beeinträchtigungen bei Implantaten und Körperhilfen	118
5.7	Ausgewählte Einzelstudien	120
6.	GRENZWERTE	124
6.1	Empfehlungen der Europäischen Union	125
6.2	Regelungen in Deutschland	126
6.3	Situation im Ausland	129
III.	ANHANG	131
	ABKÜRZUNGEN UND ERLÄUTERUNGEN	132
	LITERATUR UND INTERNETQUELLEN	137
	BILDNACHWEIS	143



I. Auf einen Blick

Elektromagnetische Felder im Alltag

Ob beim Handy oder bei der Mikrowelle – elektromagnetische Felder begleiten uns im Alltag, stehen aber auch immer wieder in der Diskussion. Auf den folgenden 36 Seiten erhalten Sie einen Überblick über die in diesem Heft behandelten Themen. Ab Seite 45 können Sie einzelne Aspekte näher betrachten.



Quellen

Natürliche Felder

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 52–55

Elektromagnetische Felder kommen ganz natürlich auf der Erde vor.

Elektrisches Feld der Erde (Bild links)

Feldlinien des Erdmagnetfelds (Bild rechts)

Wie entstehen elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder?

BLITZE, SONNE, ERDMAGNETFELD

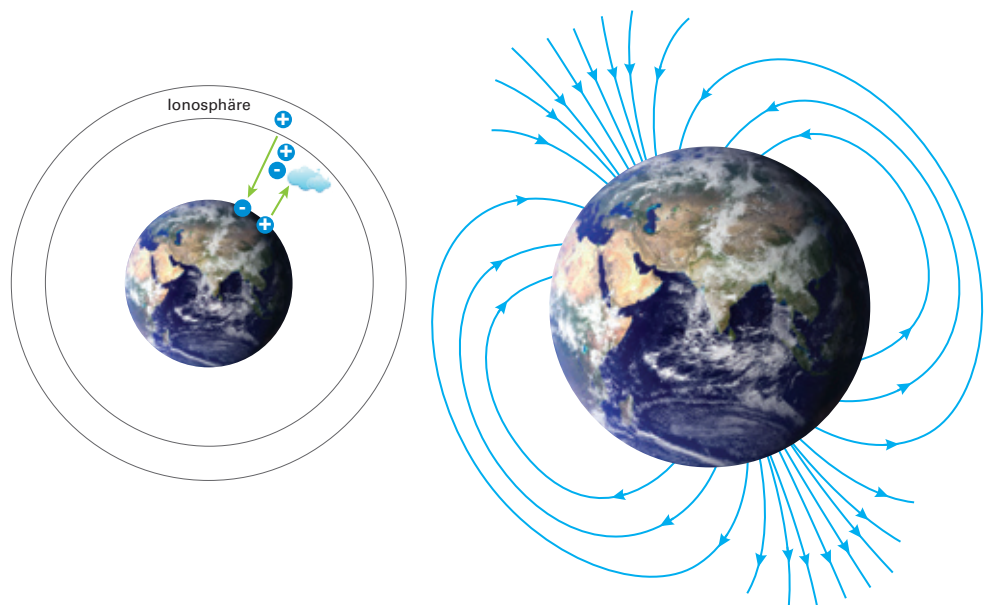
Elektromagnetische Felder (EMF) sind seit jeher Bestandteil der natürlichen Umwelt des Menschen.

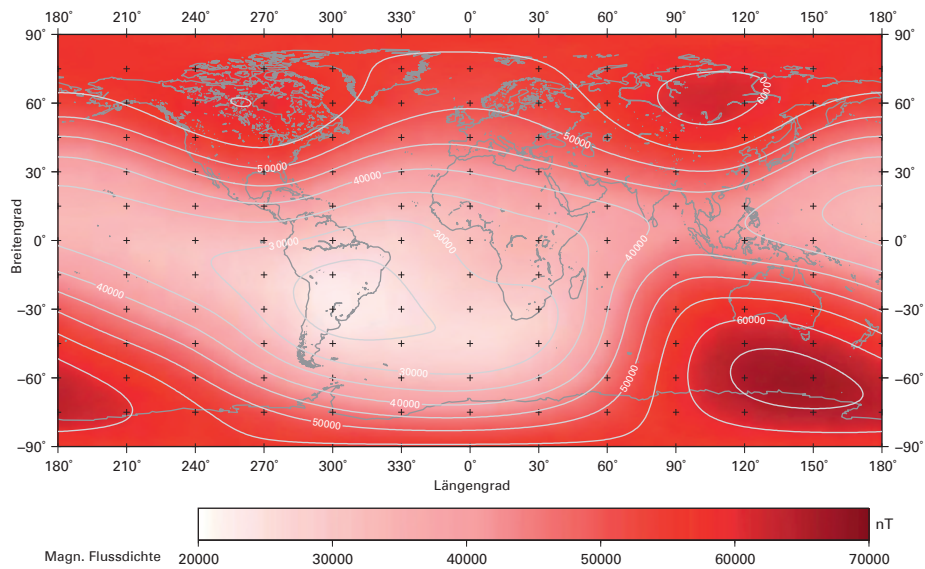
Das Erdmagnetfeld ist ein statisches Magnetfeld, das die ganze Erde vom Südpol bis zum Nordpol umgibt (Abbildung unten). An den Polen ist es etwa doppelt so stark wie am Äquator. Die Feldlinien verlaufen am Äquator parallel und an den Polen senkrecht zur Erdoberfläche. In Mitteleuropa treten die Linien schräg in den Erdboden ein. Das Magnetfeld der Erde wird fast ausschließlich von elektrischen Strömen im flüssigen Erdkern verursacht.

Auch elektrische Felder kommen auf der Erde vor. Sie treten vor allem zwischen dem Erdboden und höheren Atmosphärenschichten (Ionosphäre) auf und werden hauptsächlich durch die Sonnenstrahlung und den Sonnenwind verursacht. Bei wolkenlosem Himmel kann im freien Gelände ein elektrisches Gleichfeld von 130 bis

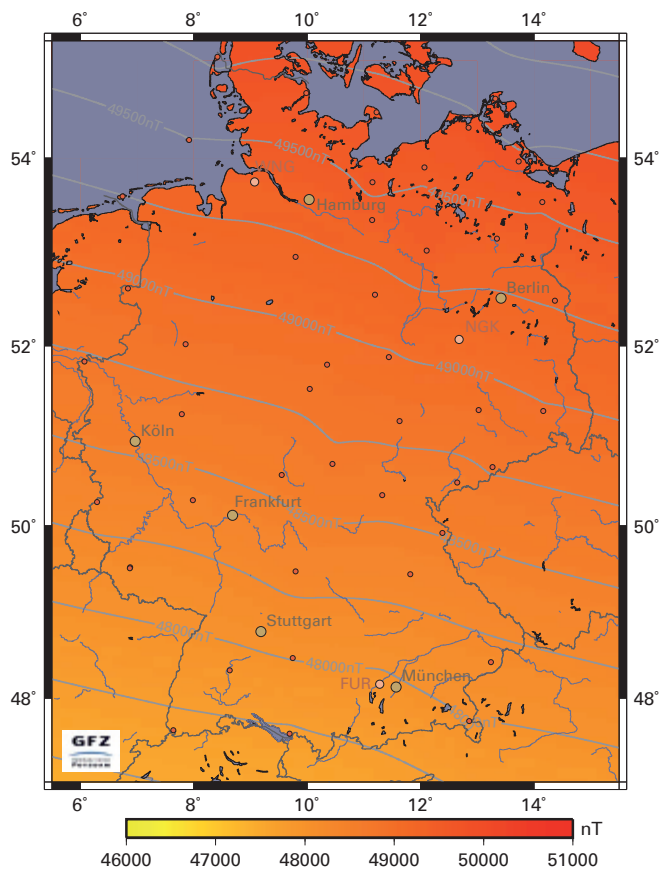
270 V/m gemessen werden. Zudem erzeugen durch Sonnenstrahlung erwärmte feuchtwarme Luftmassen in Gewitterwolken sehr große elektrische Feldstärken. Bei der plötzlichen Entladung durch Blitze entstehen elektromagnetische Impulse (Sferics), die noch in weiter Entfernung messbar sind. Natürliche elektromagnetische Strahlung tritt hauptsächlich in Form von Wärmestrahlung (Infrarot), sichtbarem Licht und ultravioletter Strahlung der Sonne auf. Auch Feuer und Blitze sind Quellen natürlicher elektromagnetischer Strahlung.

Es gibt auch Lebewesen, die in der Lage sind, elektrische Felder zu erzeugen. Sie besitzen zudem einen „Elektrosinn“ zur Wahrnehmung von Feldern und Feldänderungen. So nutzt etwa der Nilhecht schwache elektrische Felder zur Ortung von Beute und Hindernissen in trübem Wasser. Manche Zugvögel besitzen einen „Magnetkompass“ und orientieren sich an der Neigung des Erdmagnetfeldes.





Das Magnetfeld der Erde hat am Äquator eine Flussdichte von ca. 30 μ T, an den Polen ist sie etwa doppelt so groß.
Quelle: GeoForschungs-Zentrum Potsdam, Stand 2006



Magnetische Flussdichte in Deutschland
Quelle: GeoForschungs-Zentrum Potsdam, Stand 2006

Quellen

Künstliche elektrische/magnetische Felder

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 46–49

Zwischen elektrischen und magnetischen Feldern besteht ein enger Zusammenhang.

ELEKTROGERÄTE UND VERKABELUNG

Elektrische Felder entstehen überall dort, wo Spannungsdifferenzen auftreten, beispielsweise bei der Hausverkabelung oder bei Elektrogeräten. Dabei spielt es keine Rolle, ob Strom fließt oder nicht. Sobald Strom fließt, entsteht zusätzlich ein magnetisches Feld. Die Stärke des Magnetfeldes hängt von der Stromstärke ab und nimmt wie beim elektrischen Feld mit dem Abstand zur Quelle ab.

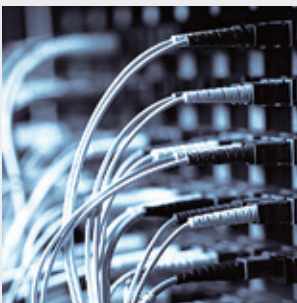
- Maß für die Stärke eines elektrischen Feldes: **Elektrische Feldstärke E** , gemessen in Volt pro Meter (V/m)
- Maß für die Stärke eines Magnetfeldes: **Magnetische Flussdichte B** , gemessen in Tesla (T)

Ein elektrisches Feld kann relativ einfach abgeschirmt werden. Innerhalb eines Gebäudes ist von einem außerhalb erzeugten elektrischen Feld kaum mehr etwas zu messen. Ebenso dringt von einem innen erzeugten elektrischen Feld nur wenig nach außen. Das Magnetfeld dagegen kann die meisten Materialien mühelos durchdringen. Eine Abschirmung ist nur mit großem Aufwand und teuren Spezialwerkstoffen zu erreichen.

Elektrische und magnetische Felder stehen in einem engen Zusammenhang: Elektrische Felder bewegen elektrische Ladungen, bewegte elektrische Ladungen erzeugen magnetische Felder und magnetische Wechselfelder erzeugen (induzieren) wiederum elektrische Felder.



Elektrische und magnetische Felder treten z. B. bei Freileitungen, der Hausverkabelung und Elektrogeräten auf.



Quellen

Künstliche elektro- magnetische Felder

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 46–49

Ab einer Frequenz von 30 kHz spricht man von elektromagnetischen Wechselfeldern.

RADIO, TV, MOBILFUNK, MIKROWELLE

Bei elektrischen Wechselfeldern ändert sich die Polarität (+/-) des Feldes mit der Zeit. Die häusliche Stromversorgung beispielsweise erfolgt durch Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hertz (Hz), d. h. die Polarität wechselt in einer Sekunde 100-mal (vgl. S. 15).

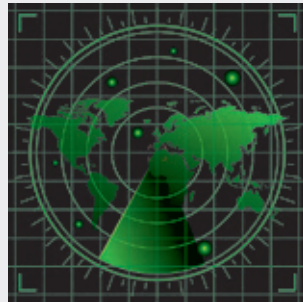
Die wechselseitige enge Verknüpfung von elektrischem und magnetischem Feld ist umso stärker, je höher die Frequenz ist. Bei Frequenzen über 30 Kilohertz (kHz) können die beiden Felder nicht mehr getrennt betrachtet werden. Man spricht nun von elektromagnetischen Feldern oder Wellen.

Elektromagnetische Felder können sich von der Quelle, z. B. einer Antenne, lösen und über große Entfernungen ausbreiten. Das erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit, und zwar mit rund 300.000 km/s. Diese Eigenschaft

wird zur Informationsübertragung bei Radio, Fernsehen und Mobilfunk genutzt.

Der Bereich bis 30 kHz wird als Niederfrequenz bezeichnet, der Bereich von 30 kHz bis 300 GHz als Hochfrequenz. Das Frequenzband von 30 kHz bis 300 MHz wird überwiegend für Radioübertragungen genutzt und setzt sich aus Langwellen (LW), Mittelwellen (MW), Kurzwellen (KW) und Ultrakurzwellen (UKW) zusammen. Im Bereich von 300 MHz bis 300 GHz spricht man von Mikrowellen. Den Mikrowellenbereich nutzen zum Beispiel Fernsehsender, Mobilfunknetze, Radaranlagen und Mikrowellengeräte.

Darüber hinaus gibt es noch ionisierende Strahlung wie UV-, Röntgen- oder Gammastrahlen. Diese sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Broschüre.



Elektromagnetische Felder können sich von der Quelle, z. B. einer Antenne, lösen und über große Entfernungen ausbreiten. Das erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit.



Der Einsatz von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Alltag

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf Seite 50

Anhand der Frequenz werden Gleichfelder, niederfrequente sowie hochfrequente Wechselfelder unterschieden.

Grundsätzlich gibt es zwei Größen, anhand derer die untersuchten Felder kategorisiert werden können: die Frequenz, mit der ein elektrisches oder magnetisches Feld seine Polarität ändert, und die Wellenlänge, mit der sich die Wellen von ihrer Quelle her ausbreiten.

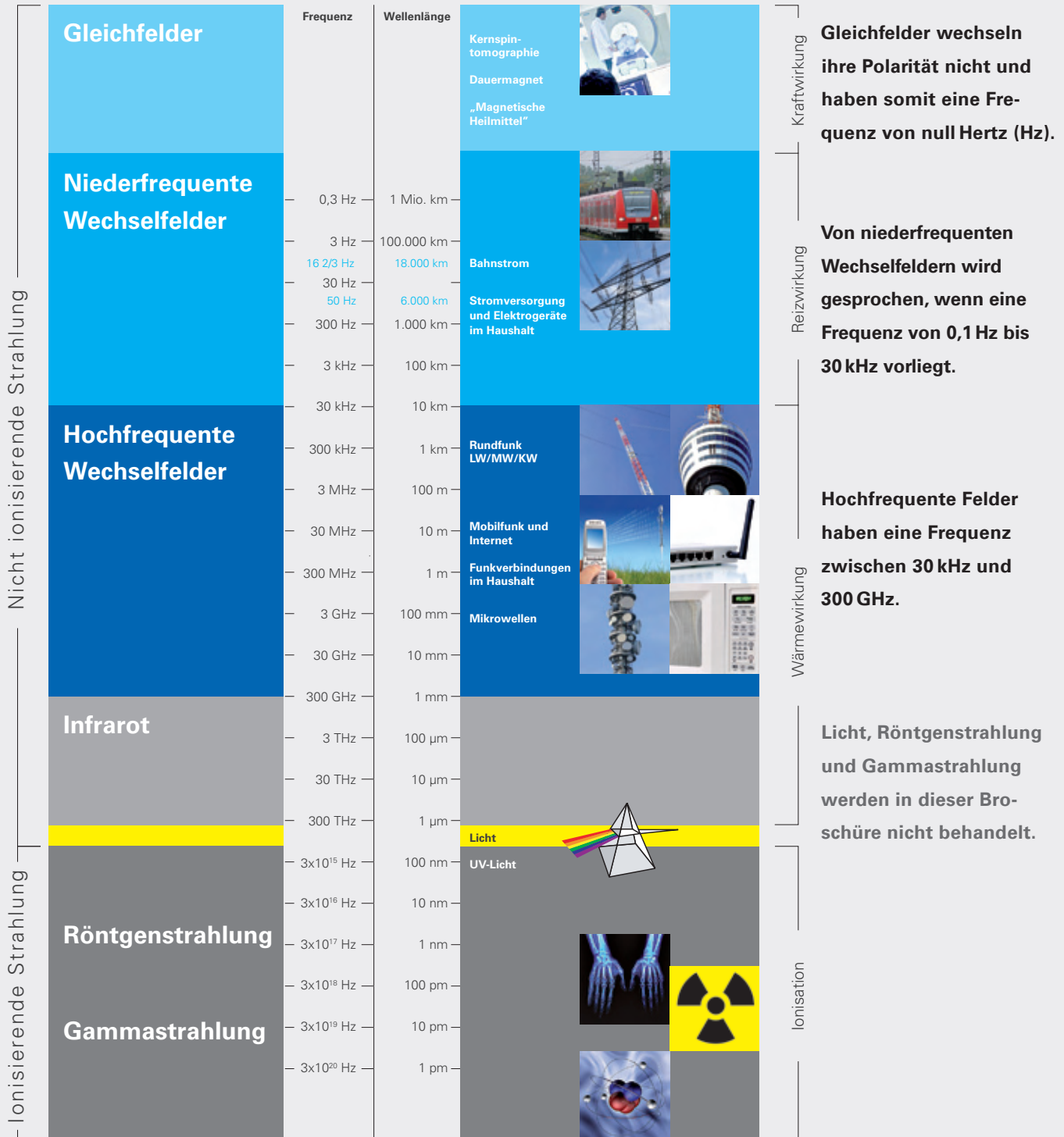
Abhängig von der Frequenz werden die Felder in Gleichfelder, niederfrequente Wechselfelder und hochfrequente Wechselfelder eingeteilt.

Gleichfelder wechseln ihre Polarität nicht und haben somit eine Frequenz von null Hertz (Hz). Von niederfrequenten Wechselfeldern wird gesprochen, wenn eine Frequenz von 0,1 Hz bis 30 kHz vorliegt. Sie umgeben die Bevölkerung im Alltag sehr häufig: So bewirken die Stromversorgung im Haushalt sowie diverse Elektrogeräte derartige Felder. Starke niederfrequente Wechselfelder können Nerven und Muskeln reizen (Reizwirkung).

Hochfrequente Felder haben eine Frequenz zwischen 30 kHz und 300 GHz. Die meisten modernen Informationsmedien, die drahtlos funktionieren, nutzen hochfrequente Wechselfelder, um Daten zu übertragen. Bei entsprechender Stärke können sie in Gliedmaßen, die ihnen ausgesetzt sind, eine Wärmewirkung entfalten.

Wechselfelder mit noch höherer Frequenz, wie die Röntgenstrahlung oder Gammastrahlung, werden in dieser Broschüre nicht weiter behandelt. Sie sind der Gruppe der ionisierenden Strahlung zugeordnet, die sich durch extrem kurze Wellen auszeichnet. Ionisierende Strahlung ist in der Lage, Atome oder Moleküle in elektrisch geladenen Zustand zu versetzen (Ionisation). Ab einer Wellenlänge von weniger als 200 nm liegt ionisierende Strahlung vor.

DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM



Einsatz

Gleichfelder

0 Hz –
0,1 Hz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 56–57

Gleichfelder ändern ihre Polarität nicht oder nur sehr langsam.

Bei Gleichfeldern ändert sich die Polarität nicht oder nur sehr langsam, die Frequenz ist also null oder sehr nahe bei null (kleiner als 0,1 Hz).

NAHVERKEHR UND INDUSTRIE

Elektrische Gleichfelder treten bei vielen Elektrogeräten und Maschinen als Begleiterscheinung auf, meist sind sie jedoch sehr schwach. Im öffentlichen Nahverkehr werden Straßenbahnen, U-Bahnen und Stadtbahnen meist mit 750 V Gleichspannung betrieben. Zwischen der Oberleitung und der Schiene tritt ein elektrisches Gleichfeld auf. Eine wichtige technische Anwendung von elektrischen Gleichfeldern sind Elektronenröhren, wie z. B. die Bildröhre im Fernseher, die Röntgenröhre oder Verstärkerrohre, die vor der Erfindung des Transistors noch in jedem Radio eingebaut waren.

Eine weitere technische Anwendung sind Elektro-Staubabscheider. Hier werden mittels eines starken Gleichfeldes Staubpartikel elektrisch aufgeladen und aus dem Luftstrom abgeschieden z. B. in Kohlekraftwerken.

DAUERMAGNETE UND MEDIZIN-TECHNIK

Magnetische Gleichfelder werden in vielen technischen Anwendungen genutzt. Sie

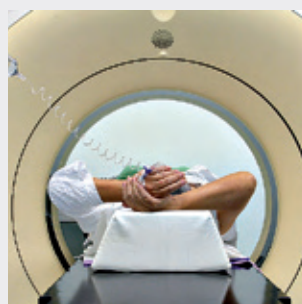
werden entweder mit Permanentmagneten oder Elektromagneten erzeugt. Permanentmagnete bestehen aus Eisen, Kobalt oder Nickel und sind dauermagnetisch. Sie werden z. B. in Elektromotoren, Lautsprechern, und vielen anderen Geräten eingesetzt.

Bei Elektromagneten kann das Magnetfeld im Gegensatz zum Permanentmagnet ein- und ausgeschaltet werden. Anwendungen sind hier z. B. Türverriegelungssysteme, Hubmagnete oder Magnetschwebbahnen (Transrapid). Eine besondere Form von Elektromagneten sind supraleitende Magnete, mit denen extrem hohe magnetische Gleichfelder erzeugt werden können, wie sie für wissenschaftliche oder medizinische Untersuchungen z. B. im Magnetresonanztomographen (MRT, Kernspintomograph) notwendig sind.

Eine Gefährdung geht von elektrischen Gleichfeldern in der Regel nicht aus. Träger von Herzschrittmachern sollten jedoch starke magnetische Gleichfelder meiden. Starke elektrische Gleichfelder setzen jedoch eine hohe Potentialdifferenz (Hochspannung) voraus. Hier besteht bei Berührung die Gefahr eines elektrischen Schlags. An elektrischen Geräten sind deshalb auch Warnschilder angebracht, die davor warnen, das Gerät zu öffnen.



Zwischen Oberleitung
und Schiene tritt bei
Straßenbahnen ein elek-
trisches Gleichfeld auf.



Tafelmagnete,
Kernspintomograph,
Lautsprecher

Einsatz

Nieder- frequente Wechsel- felder

0,1 Hz –
30 kHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 58–65

Magnetfelder schwanken in ihrer Stärke abhängig vom Stromfluss in den Leitern.

WECHSELSTROM 50 HZ

Das öffentliche Stromnetz in Deutschland wird mit 3-Phasen-Wechselstrom bei einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Um große Energiemengen über weite Entfernungen zu transportieren, werden Hochspannungsfreileitungen mit Spannungen von 380 kV, 220 kV und 110 kV eingesetzt.

Stärke und Verteilung der elektrischen und magnetischen Felder im Umfeld einer Freileitung sind von vielen Faktoren abhängig. Die Wesentlichen sind

- die Spannung,
- die Stromstärke,
- die Mastform (Anzahl und Anordnung der Leiterseile) und
- der Durchhang der Leiterseile.

Die Abbildungen zeigen, dass sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld am Boden direkt unter den Leiterseilen am größten ist. Da der Strombedarf im Tagesgang schwankt, variiert auch die magnetische Flussdichte im Tagesverlauf.

Der lokale Stromtransport erfolgt zumeist über Erdkabel. Aufgrund der Abschirmung durch die Erdschicht und der Anordnung der Leiter erzeugen diese keine elektrischen Felder in ihrer Umgebung. Die magne-

tischen Felder der eng beieinander liegenden Erdkabel kompensieren sich deutlich besser als die der Freileitungsseile, die meist einige Meter Abstand zueinander haben. Nur in unmittelbarer Nähe kann das Feld ähnlich groß sein wie unter einer Freileitung. Es nimmt aber mit zunehmendem Abstand sehr rasch ab.

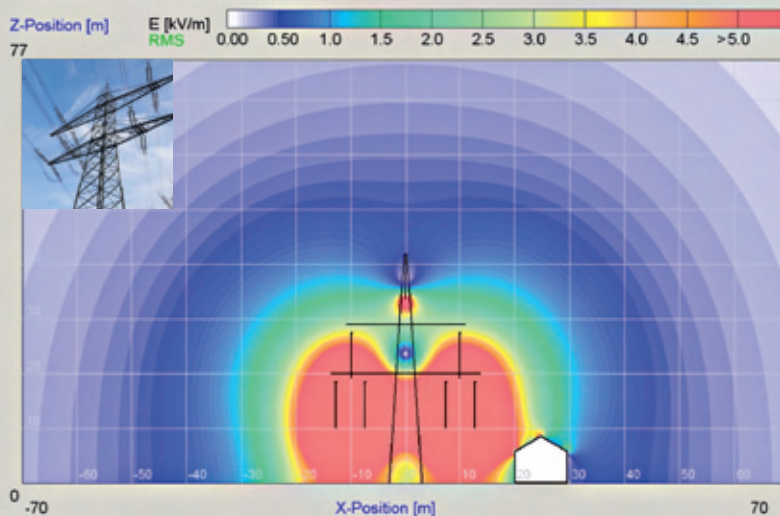
BAHNSTROM 16,7 HZ

Das elektrifizierte Netz der Deutschen Bahn AG (DB) wird mit Wechselstrom der Frequenz 16,7 Hz betrieben. Die Stromversorgung des Zuges erfolgt über die Stromführende Oberleitung, die Rückleitung über die Schienen. Diese sind aus Sicherheitsgründen geerdet. Die Oberleitung erzeugt ein elektrisches Wechselfeld, doch die Metallhülle des Zuges schirmt die Fahrgäste ab. Auch die an Bahnsteigen gemessenen Einwirkungen liegen unter den Grenzwerten.

Die Stärke der Magnetfelder von Bahnstromanlagen unterliegt erheblichen tageszeitlichen Schwankungen. Je mehr Züge auf einer Strecke fahren, desto stärker ist das Magnetfeld. Beschleunigungsvorgänge lassen den Stromverbrauch und damit die Magnetfeldstärke ansteigen. Wenn keine Züge fahren ist das Magnetfeld gleich null.

Elektrische Feldstärke der 380-kV-Freileitung im Schnitt

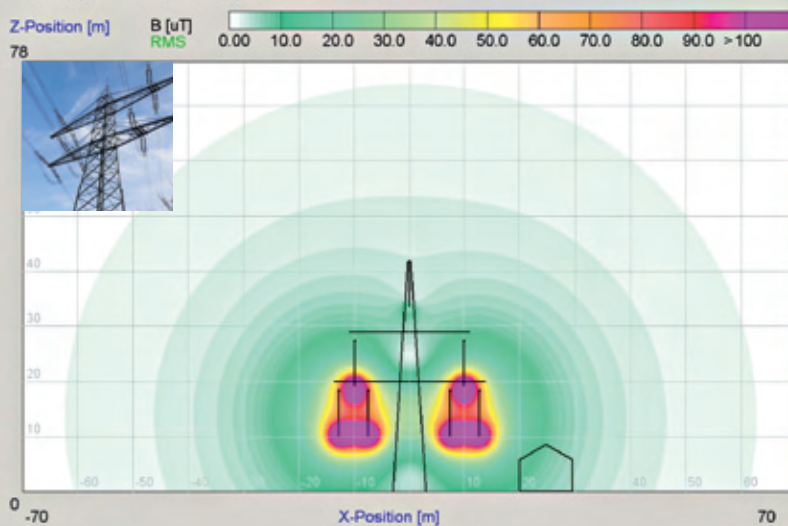
Phasenlage: 123 123, Belastung: 2 x 1000 A



Verlauf der elektrischen
Feldstärke in der Umge-
bung einer 380 kV-Frei-
leitung

Magnetische Flussdichte der 380-kV-Freileitung im Schnitt

Phasenlage: 123 123, Belastung: 2 x 1000 A



Verlauf der magne-
tischen Flussdichte in
der Umgebung einer 380
kV-Freileitung

Einsatz

Nieder- frequente Wechsel- felder

0,1 Hz –
30 kHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 66–70**

**In Großstädten ist die
Magnetfeldexposition
nur wenig höher als in
ländlichen Gebieten.**

ELEKTROGRÄTE IM HAUSHALT

Bei Kabeln der elektrischen Hausinstallation liegen Phase (Stromzuleitung) und Neutralleiter (Stromableitung) dicht nebeneinander. Die elektrischen und magnetischen Felder kompensieren sich so weitgehend. Die mit Abstand stärksten Felder entstehen an Geräten mit Elektromotoren oder Transformatoren, da ihre Funktion auf magnetischen Feldern beruht. Die höchsten Werte misst man in wenigen Zentimetern Abstand vom Gerät; mit zunehmendem Abstand nehmen sie schnell ab. Bei kontinuierlichem Betrieb sollte auf genügend Abstand (rund 1 m) zu Daueraufenthaltsorten geachtet werden.

1998 wurde in Bayern bei fast 2.000 Personen die Magnetfeldexposition im Haushalt und bei der Arbeit ermittelt. Dabei wurde ein 24-Stunden-Mittelwert für alle untersuchten Personen von $0,10 \mu\text{T}$ festgestellt. Für Großstädter ergaben sich geringfügig höhere Werte als für Bewohner ländlicher Gebiete. Auch bei Menschen, die in der Umgebung von Hochspannungsleitungen wohnen, ergaben sich kaum erhöhte Werte.

Energiesparlampen besitzen ein elektronisches Vorschaltgerät, das die Netzspannung in eine interne Betriebsspannung mit einer Frequenz zwischen 25 und 70 kHz umwandelt. Körpernahe Lampenanordnungen ohne geerdeten Schirm (Schreibtisch, Leselampe) können Werte bis zu 70 % der zulässigen internationalen Grenzwerte

für die elektrische Feldstärke erreichen. Eine Alternative besonders für körpernahe Lampen sind strahlungsarme Energiesparlampen, die eine spezielle Beschichtung des Glaskolbens und besondere elektronische Komponenten besitzen. Ihr elektrisches Feld ist um 80 % bis 90 % kleiner.

Bei **Induktionskochherden** wird die Wärme durch Magnetfelder erzeugt. Diese dringen in die Metallböden von Kochtöpfen und Pfannen ein und verursachen dort durch elektrische Wirbelströme Wärme. In der direkten Umgebung des Herdes gibt es teilweise höherfrequente Magnetfelder mit einer Frequenz von 20 bis 100 kHz. Daher wird für Schwangere vorsorglich ein Mindestabstand von 20 bis 30 cm zur Kochzone empfohlen. Personen mit elektronischen Implantaten sollten die Sicherheitshinweise der Hersteller beachten und die Verwendung von Induktionskochherden mit ihrem Arzt besprechen. Bei korrektem Verhalten ist die Wahrscheinlichkeit einer Störung des Implantats aber sehr gering.

Photovoltaikanlagen wandeln Lichtenergie in elektrische Energie um. Die erzeugte Gleichspannung wird mittels Wechselrichter in die erforderliche 50-Hz-Wechselspannung umgewandelt. Dabei entstehen höherfrequente Felder im kHz-Bereich. Beim Aufbau der Anlage sollte daher beachtet werden, dass die Wechselrichter nicht in unmittelbarer Nähe von Daueraufenthaltsbereichen liegen.



Im Haushalt entstehen die höchsten magnetischen Flussdichten an Geräten mit Elektromotoren und Transformatoren.

TABELLE: MAGNETISCHE FLUSSDICHTEN IN MIKROTESLA IN DER NÄHE VON ELEKTRISCHEN HAUSHALTSGERÄTEN (50HZ-ANWENDUNGEN)

Gerät	in 3 cm Abstand	in 30 cm Abstand	in 1 m Abstand
Elektroherd	1-50	0,15-8	0,01-0,04
Kühlschrank	0,5-2	0,01-0,3	0,01-0,04
Kaffeemaschine	1-10	0,1-0,2	0,01-0,02
Handmixer	60-700	0,6-10	0,02-0,25
Toaster	7-20	0,06-1	0,01-0,02
Haarfön	6-2000	0,1-7	0,01-0,3
Elektrorasierer	15-1500	0,08-9	0,01-0,3
Bohrmaschine	400-800	2-3,5	0,08-0,2
Elektrosäge	250-1000	1-25	0,01-1
Staubsauger	200-800	2-20	0,1-2
Waschmaschine	0,08-50	0,15-3	0,01-0,15
Wäschetrockner	0,3-8	0,1-2	0,02-0,1
Bügeleisen	8-30	0,1-0,3	0,01-0,03
Radiowecker	3-60	0,1-1	0,01-0,02
el. Heizdecke	bis 30		
Fernseher	2,5-50	0,04-2	0,01-0,15
el. Fußbodenheizung		0,1-8	
el. Heizofen	10-180	0,15-5	0,01-0,25

Je näher man sich am Gerät aufhält, desto höher ist die magnetische Flussdichte.

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 72–77**

**Hochfrequente Wech-
selfelder werden zur
Informationsübertragung
flächendeckend genutzt.**

MOBILFUNK

Elektromagnetische Wellen zur Übertragung von Radio, Fernsehen und Mobilfunk werden mit Sendeantennen verbreitet. Beim Mobilfunk strahlt die Antenne nicht gleichmäßig in alle Richtungen (isotrop) ab. Die Strahlung wird vielmehr mit Hilfe von Reflektoren gebündelt. Das funktioniert wie bei einem Scheinwerfer, bei dem durch die Bündelung das Licht in Hauptstrahlrichtung viel heller ist als bei einer Lampe ohne Reflektor. Dafür strahlt er in die meisten Richtungen kein Licht ab. Dadurch lassen sich der Energieverbrauch und die Immissionen in der direkten Umgebung merklich senken.

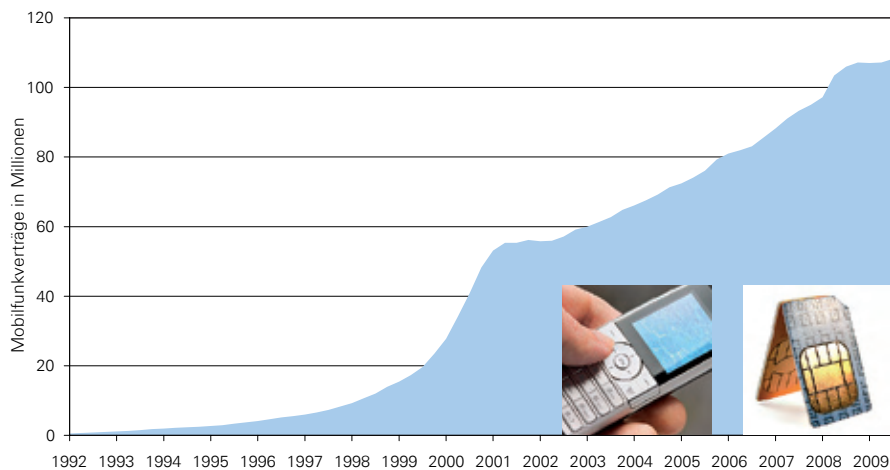
Funksendeanlagen dürfen nur mit einer Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur betrieben werden. Der Betreiber meldet der Bundesnetzagentur die geplante Sendeleistung sowie Art, Ausrichtung, Aufstellort und Montagehöhe der Antennen. Daraus resultieren für diesen Standort bestimmte Sicherheitsabstände, außerhalb derer die gesetzlichen Grenzwerte sicher eingehalten werden.

Weltweit lag die Zahl der Mobilfunkverträge Mitte 2010 bei fünf Milliarden. In Deutschland gab es Mitte 2010 über 110 Mio. Mobilfunkverträge und rund 68.000 Standorte mit Mobilfunksendern, an denen ca. 540.000 Sendeantennen installiert waren. Die heutigen Handys arbeiten überwiegend nach dem GSM-Standard. Seit 2001 werden in Deutschland UMTS-

Netze ausgebaut, um mobiles Internet-Surfen mit hoher Geschwindigkeit zu ermöglichen. Deutlich jünger sind die LTE-Netze, die seit 2010 zusätzlich aufgebaut werden und noch höhere Übertragungsgeschwindigkeiten zulassen. In Folge des steigenden Angebots und der starken Nachfrage nach Mobilfunkdiensten nehmen die Einwirkungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder in der Umwelt zu.

Ein Mobilfunknetz ist zellulär und flächendeckend aufgebaut. Aufgrund der geringen Sendeleistung der Handys überzieht ein Netz von kleinräumigen Funkzellen das Land. Damit ein Telefonat während einer Autofahrt nicht abreißt, müssen sich diese teilweise überlappen, um eine Gesprächsübergabe von einer Funkzelle in die nächste zu ermöglichen.

Die meisten Mobilfunkzellen sind jedoch nicht reichweiten-, sondern kapazitätsbegrenzt. Jede Basisstation kann nur 20 bis 90 Gespräche gleichzeitig übertragen. Beim mobilen Internetsurfen kann die Zahl auf 2 bis 20 sinken. In Innenstadtbereichen sind die Mobilfunkbasisstationen deshalb in Abständen von wenigen hundert Metern aufgestellt, während in Kleinstädten und im ländlichen Raum größere Abstände ausreichen. Auf der Internetseite der Bundesnetzagentur sind alle genehmigungspflichtigen Sender in der EMF-Datenbank (Internet <http://emf.bundesnetzagentur.de>) verzeichnet.



Die Mobilfunknutzung in Deutschland nimmt seit Jahren stetig zu. Seit 2010 gab es mehr als 110 Mio. Anschlüsse. Daten: Bundesnetzagentur, Stand Oktober 2009, Quelle: LfU.



Standorte genehmigungspflichtiger Mobilfunkstationen in der Münchner Innenstadt, Kartenausschnitt ca. 4,5 km x 3 km. Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung Quelle: Landeshauptstadt München, LfU.

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 78–86

Mobiltelefone erzeugen hauptsächlich während eines Telefongesprächs oder einer Datenverbindung elektromagnetische Felder.

STRAHLUNG DER HANDYS

Ein Handy steht nur bei Gesprächen, Datenverbindungen und Kurzmitteilungen (SMS) in einer aktiven Sendeverbindung. Zudem sendet es kurze Signale, wenn es z. B. bei einer Autofahrt die Funkzelle wechselt und Kontakt zur neuen Basisstation aufnimmt. Ein Mobiltelefon, das örtlich nicht bewegt wird, also in der gleichen Funkzelle bleibt, hat zur Anwesenheitskontrolle alle ein bis zwölf Stunden Funkkontakt mit der Basisstation, der etwa eine Sekunde dauert. Die Sendeleistung des Handys ist von der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation abhängig. Sie erreicht im GSM-900-Netz max. 2 Watt, im GSM-1800-Netz max. 1 Watt, jeweils in der Spitze. Die maximal erreichbaren Mittelwerte bei der Sprachübertragung liegen bei 250 mW bzw. 125 mW. UMTS-Mobiltelefone senden kontinuierlich mit maximal 125 mW mittlerer Leistung, können diese aber wesentlich effizienter reduzieren als GSM-Mobiltelefone.

Zur Minimierung der Einwirkungen durch die Handynutzung können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Strahlungsarme Handys verwenden
- Lange Telefonate nur bei guter Netzversorgung führen (alle Empfangsbalken werden angezeigt)
- Handy nicht an den Kopf halten, sondern Freisprecheinrichtung oder kabelgebundenes Headset benutzen
- UMTS-Handys im UMTS-Modus (3G) verwenden

STRAHLUNG DER

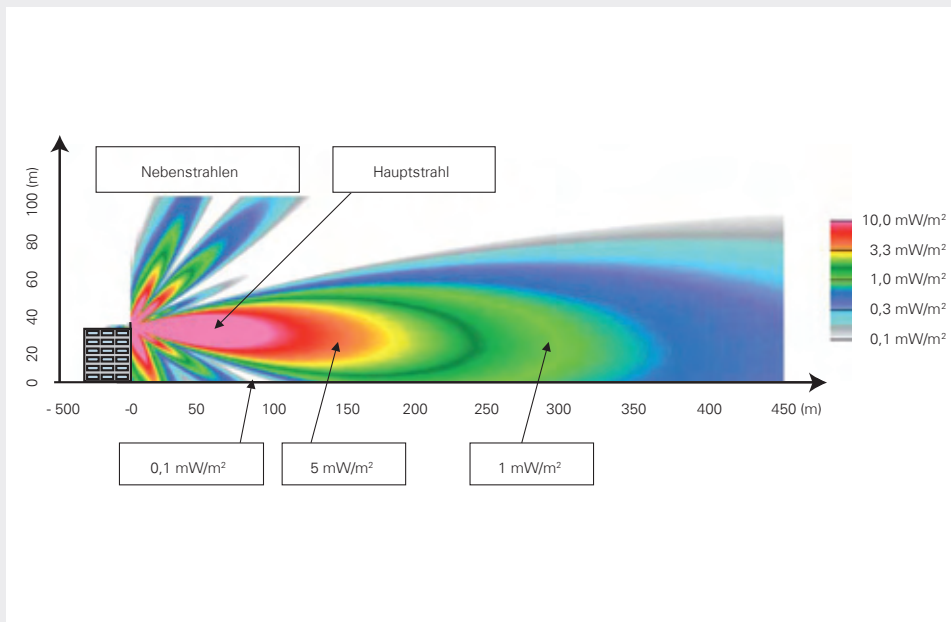
MOBILFUNKANTENNEN

Es gibt zwei Typen von Antennen für Mobilfunkbasisstationen:

- Rundstrahlantennen strahlen horizontal in alle Richtungen ab und bündeln nur vertikal. Sie sind sehr dünn und optisch unauffällig. Die Übertragungskapazität ist gering (20 bis 30 Telefonate gleichzeitig).
- Sektorantennen bündeln den Strahl horizontal und vertikal. Meistens werden drei Sektorantennen an einem Masten befestigt. Sie versorgen jeweils einen Sektor von 120°. Die Übertragungskapazität beträgt bei gleicher Sendeleistung des Gesamtsystems 60 bis 90 Gespräche. Sektorantennen werden gezielt in eine bestimmte Richtung ausgerichtet. Die starke vertikale Bündelung bewirkt, dass der Bereich unterhalb der Antenne wesentlich weniger hochfrequenten elektromagnetischen Wellen ausgesetzt ist, als man dies von der Entfernung her erwarten würde.

Die Stärke der Strahlung ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Sendeleistung
- Strahlbündelung der Antenne
- Abstand zur Antenne
- Montagehöhe und Hauptstrahlrichtung der Antenne
- Hindernisse zwischen Antenne und Betrachtungsort
- Tageszeit
- Wetter



Die Simulation zeigt, wie sich die Sendeleistung einer Mobilfunkantenne räumlich verteilt. Außer dem Hauptstrahl, der den Fernbereich abdeckt, treten in bestimmten Winkeln Nebenstrahlen auf. Quelle: LfU



Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 86–90**

**Ein Rundfunksender kann
ein deutlich größeres
Gebiet abdecken als ein
Mobilfunksender.**

RUNDFUNK (RADIO UND FERNSEHEN)

Hochfrequente elektromagnetische Wellen werden auch für Radio- und Fernsehübertragungen genutzt. Beides wird unter dem Begriff Rundfunk zusammengefasst. Anders als beim Mobilfunk mit seinen rund 68.000 leistungsschwachen Sendemasten, die oft nur ein Gebiet von einem Quadratkilometer bedienen, arbeitet der Rundfunk mit wenigen leistungsstarken Grundnetzsendern, die Gebiete mit einem Radius von oftmals mehr als 100 km versorgen.

Die Sendeanlagen sind häufig auf hohen Bergen oder lokalen Fernsehtürmen installiert. Die Sender strahlen in der Regel horizontal in alle Richtungen ab, in vertikaler Richtung werden die Strahlen wie beim Mobilfunk gebündelt. Aufgrund der hohen Sendeleistungen sind große Sicherheitsabstände zum Sender erforderlich, die bisweilen mehrere hundert Meter betragen können. Für den Sender Wendelstein (UKW, DVB-T) weist die Bundesnetzagentur beispielsweise einen Sicherheitsabstand von 320 m in Hauptstrahlrichtung aus. Hohe Grenzwertausschöpfungen treten in Wohngebieten nur in Ausnahmefällen auf. In Städten liegt die Grenzwertausschöpfung des Rundfunks gewöhnlich in derselben Größenordnung wie beim Mobilfunk.

STATIONÄRE INTERNET- FUNKLÖSUNGEN

Da viele Häuser zu weit von der nächstgelegenen Telefonvermittlungsstelle entfernt liegen, steht dort keine oder nur eine langsame DSL-Verbindung zur Verfügung. Ab einer Kupferkabellänge von 5 bis 6 km wird das Signal für eine DSL-Verbindung zu schwach. Der Verlegung von Glasfasern und dem Aufbau von Minivermittlungsstellen stehen oft hohe Kosten entgegen. Gerade in wenig besiedelten Gebieten kann mit einer Funklösung schnelles Internet einfach und kostengünstig zur Verfügung gestellt werden, ohne Glasfaserkabel verlegen zu müssen. Da mit kleinen Sendeleistungen Entfernungen bis zu 30 km überbrückt werden müssen, sind meist Richtfunkantennen bei den Nutzern notwendig, die wie kleine Satellitenantennen an Balkonen, Hauswänden oder Dächern befestigt werden.

Für Privatanutzer werden heute Systeme zwischen 2 und 20 MBit/s inklusive VoIP-Telefonanschluss angeboten, deren Leistungsfähigkeit sich teilweise von normalem DSL nicht mehr unterscheidet. Die Immis-sionen von Funk-DSL-Basisstationen sind aufgrund der geringen Sendeleistung etwa 1.000-mal geringer als beim Mobilfunk und damit vernachlässigbar. Alternativ können Minivermittlungsstellen per Richtfunk angebunden werden. Die einzelnen Nutzer werden dann über die Telefonleitung mit schnellen DSL-Verbindungen versorgt.



Standorte von Radio- und Fernsehsendern in Baden-Württemberg und Bayern mit einer installierten Gesamtsendeleistung von mindestens 25 kW.

Quelle: LfU, LUBW



Verschiedene Informationstechnologien benötigen unterschiedliche Sendeleistung und deswegen unterschiedlich starke elektromagnetische Wellen.

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den
Seiten 94–96**

FUNKVERBINDUNGEN IM HAUSHALT

Drahtlose Heim-Netzwerke (WLAN) ermöglichen einen drahtlosen Internetzugang und die Vernetzung mehrerer Computer. WLAN-Basisstationen senden mindestens 10-mal pro Sekunde Signalisierungsinformationen, so ergibt sich eine mittlere Sendeleistung von 0,5 mW im Ruhebetrieb. Die mittlere Sendeleistung liegt im normalen Betrieb sowohl bei der Basis als auch bei den Mobilteilen unter 10 mW, die maximale Sendeleistung ist auf 100 mW beschränkt.

Schnurlose Telefone basieren fast ausschließlich auf dem digitalen DECT-Standard und senden bei Frequenzen um 1.900 MHz. Die maximale Sendeleistung beträgt 250 mW, die mittlere Sendeleistung etwa 10 mW. Im Ruhebetrieb sendet die Basisstation 100-mal pro Sekunde Systeminformationen an das Mobilteil.

Wer seine persönlichen Immissionen minimieren möchte, sollte die Basisstation nicht an Orten aufstellen, an denen man sich häufig aufhält, z. B. nicht direkt am Bett oder auf dem Schreibtisch. Inzwischen gibt es besonders strahlungsarme DECT-Telefone, die ihre Sendeleistung im Ruhebetrieb grundsätzlich abschalten (ECO DECT).

Bluetooth dient wie WLAN der drahtlosen Datenübertragung, meist zwischen Computer und Peripheriegeräten (Maus, Tastatur), zwischen Handy und Headset oder zwischen Spielkonsolen und Controllern. Da Bluetooth noch sparsamer arbeitet als WLAN, ist es sehr gut für den Batteriebetrieb geeignet.

Babyfone dienen der akustischen Überwachung von Säuglingen und Kleinkindern. Sender und Empfänger werden entweder über ein eigenes Kabel, das Hausstromnetz oder über Funk miteinander verbunden.

Geräte, die über das Stromnetz verbunden sind, erzeugen keine nennenswerten elektromagnetischen Felder. Bei den Funk-Babyfonen sind diejenigen zu bevorzugen, die nur dann senden, wenn ein Geräusch vorhanden ist. Aus Vorsorgegründen empfiehlt es sich bei allen Geräten, einen Mindestabstand von 2 m zum Kind einzuhalten.

MIKROWELLENHERDE

Mikrowellenherde arbeiten mit elektromagnetischen Wellen hoher Leistung bei Frequenzen um 2.450 MHz. Sie sind jedoch gut abgeschirmt, so dass das Feld außerhalb sehr schwach ist. Beim Öffnen der Tür wird die Energiezufuhr sofort abgeschaltet.



Bei schnurlosen Telefonen, WLAN-Stationen und Babyfonen sollte zur Minimierung der Einwirkungen genügend Abstand zu Daueraufenthaltsorten eingehalten werden. Empfohlen werden mindestens 2 m.



Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 89–94

Artikelsicherungsanlagen erkennen anhand von elektromagnetischen Feldern, ob beim Bezahlen das Etikett entwertet wurde.

ARTIKELSICHERUNGS- UND -ERKENNUNGSANLAGEN (RFID)

Auch Artikelsicherungsanlagen an Kassen und Kaufhausausgängen arbeiten mit elektromagnetischen Feldern. Dabei kommen unterschiedliche Frequenzen zwischen 10 Hz und 3 GHz zum Einsatz. Bei einem Verfahren sendet eine der beiden Standsäulen magnetische Impulse aus. Gerät ein nicht entwertetes Sicherungsetikett in das Feld, reagiert es auf die magnetischen Impulse. Dies erkennt die gegenüberliegende Standsäule und löst Alarm aus. Dieses System funktioniert ohne Elektronik im Sicherungsetikett, kann dafür aber auch nur erkennen, ob ein solches Etikett entwertet wurde oder nicht. Bei Warensicherungsanlagen kann es im Überwachungsbereich zu einer Überschreitung der empfohlenen Referenzwerte kommen. Da die Expositionsdauer in der Regel sehr kurz ist, besteht keine gesundheitliche Gefährdung für die allgemeine Bevölkerung durch die Warensicherungsanlagen. Träger aktiver oder passiver Körperhilfen (wie z. B. Herzschrittmacher, Infusionspumpen oder metallische Implantate) sollten sich beim behandeln den Arzt darüber informieren, ob bei ihrem Gerät eine Beeinflussung durch Warensicherungsanlagen möglich ist.

Artikelerkennungsanlagen mit RFID-Technologie können Artikel, Menschen und Tiere kontaktlos mittels elektromagnetischer Felder eindeutig identifizieren und erfassen. Ein RFID-System besteht aus kleinen Transpondern an jedem Artikel und einem Lese-

gerät zum Auslesen der Transponder. Gelangt ein Transponder in die Nähe eines Lesegeräts, wird er von dessen Feld aktiviert. Der Transponder enthält einen elektronischen Speicherchip und sendet die darauf gespeicherten Daten an das Lesegerät. Diese Technik wird z. B. bei Klebeetiketten, Scheckkarten, Reisepässen, Autoschlüsseln, Ohrmarken und der LKW-Maut eingesetzt.

BOS-TETRA-DIGITALFUNK

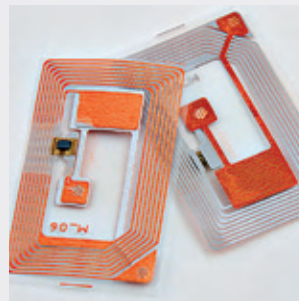
Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie Feuerwehren, Rettungsdienste und Polizei werden zukünftig deutschlandweit über ein gemeinsames digitales Funknetz verfügen, das auf dem internationalen TETRA-Standard basiert. In Bayern und Baden-Württemberg ist der Aufbau von rund 1.650 Basisstationen geplant. Im Gegenzug werden rund 6.000 analoge BOS-Funkanlagen abgebaut.

Erhebliche Unterschiede zu öffentlichen digitalen Mobilfunksystemen wie GSM oder UMTS bestehen in den Möglichkeiten der Alarmierung, einer GPS-unterstützten Einsatzsteuerung sowie der Gruppenkommunikation. Hinzukommt die Abhörsicherheit durch Verschlüsselung. Zudem gibt es für kritische Einsatzsituationen z. B. von Feuerwehren oder Polizei eine Notruffunktion mit GPS-Ortung.

Die Einwirkungen von TETRA-Basisstationen sind deutlich geringer als die von Mobilfunkbasisstationen; die Einwirkungen der Endgeräte sind vergleichbar.



Artikelsicherungsanlagen
senden sehr starke
elektromagnetische
Wellen aus.



Innenleben einer
RFID-Karte

Wirkungen

Wechselwirkungen mit dem Körper

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 102–103

Es müssen direkte und indirekte Auswirkungen sowie akute und Langzeitwirkungen der Strahlungen unterschieden werden.

Die Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder im menschlichen Körper

Elektromagnetische Felder können mit biologischen Systemen auf unterschiedliche Art und Weise wechselwirken. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen folgenden Arten:

- Ionisierende Strahlung, wie z. B. energiereiche Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung, die Bindungen zwischen Atomen und Molekülen im Körper zu lösen vermag (d. h. Ionen erzeugen kann)
- Nichtionisierende Strahlung, deren Energiegehalt zu gering ist, um Ionen zu erzeugen, wie z. B. Radiowellen oder Mikrowellen

Ionisierende Strahlung aller Art gilt als krebserregend. Die in dieser Broschüre dargestellten technischen Anwendungen fallen jedoch nicht in den Frequenzbereich ionisierender Strahlung. Nichtionisierende Strahlung wirkt auf den Körper

- direkt, z. B. durch Reizwirkung an Nervenbahnen oder Erwärmung des Gewebes oder
- indirekt, z. B. über die Beeinflussung eines Herzschrittmachers.

Eine Wirkung kann dabei sofort (akute Wirkung) oder erst nach längerer Zeit (Langzeitwirkung oder chronische Wirkung) auftreten.

In folgenden Frequenzbereichen sind akute Wirkungen belegt:

■ Gleichfelder (0 Hz)

Bei starken elektrischen Gleichfeldern kommen durch die Kraftwirkung Effekte wie Aufrichten der Haare, Blitzentladung und elektrischer Schlag vor. Starke magnetische Gleichfelder wechselwirken mit bewegten Ladungen (z. B. Ionen im Blut) und mit magnetischen Implantaten. Künstlich erzeugte Gleichfelder, die stark genug sind, um gesundheitlich relevant zu sein (z. B. bei der Kernspintomographie), kommen in der Alltagswelt nicht vor, sie werden daher nicht weiter betrachtet.

■ Niederfrequente Felder (0,1 Hz–30 kHz)

Hier dominieren die Reizwirkungen auf Sinnes-, Nerven- und Muskelzellen. Auslöser sind die durch elektrische und magnetische Felder im Gewebe hervorgerufenen Ströme.

■ Hochfrequente Felder (30 kHz–300 GHz)

Hier sind die thermischen Wirkungen vorherrschend, d. h. eine Erwärmung des Körpers bzw. bestimmter Körperteile.



Kurzwellentherapie:
Hochfrequente Felder (27,12 MHz) erwärmen die behandelten Körperteile auch in der Tiefe.



Mikrowellentherapie:
Mikrowellen (2450 MHz) verursachen eine oberflächennahe Erwärmung.

Weitere Informationen finden Sie auf Seite 110.

Wirkungen

Reizwirkung

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 103–107

Niederfrequente Strahlung kann Nerven und Muskeln reizen.

AKUTE WIRKUNGEN

NIEDERFREQUENTER FELDER

Niederfrequente elektrische Felder dringen nur schlecht in den Körper ein. Die Feldstärke im Körper beträgt nur ein Millionstel der Stärke des äußeren Feldes.

Niederfrequente magnetische Felder dagegen dringen praktisch ungestört in den Körper und erzeugen dort über Induktion elektrische Felder.

REIZWIRKUNGEN

Die durch äußere Felder im Körper erzeugten elektrischen Ströme können zu einer Reizung von Nerven und Muskeln führen, wenn bestimmte Schwellenwerte überschritten werden.

Bei elektrischen Feldern dient die Körperstromdichte als Grundlage für die Ableitung von Basisgrenzwerten. Diese Basisgrenzwerte betragen im Frequenzbereich von 4 Hz bis 1 kHz

- für die allgemeine Bevölkerung 2 mA/m^2
- bei beruflicher Exposition 10 mA/m^2 und
- bei überwachter Exposition in der medizinischen Diagnostik oder im Rahmen einer Therapie 100 mA/m^2 .

In der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, 26. BImSchV) sind Feldstärkegrenzwerte zum Schutz der Bevölkerung festgelegt.

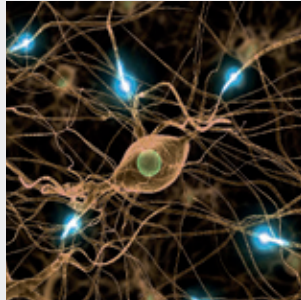


TABELLE: WIRKUNGEN VERSCHIEDENER KÖRPERSTROMDICHTEN DURCH VON AUSSEN EINWIRKENDE ELEKTROMAGNETISCHE FELDER NACH WHO

Wirkungen	Körperstromdichte am Wirkungsort in mA/m ²
Deutliche Gesundheitsgefahren (Störung des Herzrhythmus, Herzkammerflimmern, Überschreiten der Loslassschwelle)	> 1.000
Mögliche Gesundheitsgefahren (Veränderungen in der Erregbarkeit der Zellen, Reizschwellen werden erreicht)	100–1.000
Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens möglich, Einfluss auf Knochenwachstum	10 – 100
Subtile biologische Effekte beim Menschen	1–10
Keine gesicherten Effekte	< 1

Die Tabelle zeigt die Reaktionen des Körpers bei verschiedenen Stromdichten im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 300 Hz.

Wirkungen

Wärme- wirkung

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 108–112

Hochfrequente Strahlen werden im Körper in Wärme umgewandelt.

AKUTE WIRKUNGEN

HOCHFREQUENTER FELDER

Die Absorption von Hochfrequenzstrahlung durch den menschlichen Körper ist stark frequenzabhängig. Bis etwa 30 MHz dringt die Strahlung wenig gehindert in den Körper ein. Bei 70 bis 100 MHz haben die Körperabmessungen und die Wellenlänge etwa dieselbe Größenordnung, daher wird viel Strahlung absorbiert. Bei geduckter Haltung oder bei Kindern ist die Resonanzfrequenz höher. Bei Frequenzen oberhalb 300 MHz ist die Wellenlänge und damit die Eindringtiefe wesentlich kleiner als der menschliche Körper; hier kommt es zur Teilkörperabsorption und schließlich zur Oberflächenabsorption. Die eindringende Strahlungsenergie wird in biologischem Gewebe durch verschiedene Mechanismen letztlich in Wärme umgewandelt.

Die Spezifische Absorptionsrate (SAR) ist die Energie, die pro Zeiteinheit im Gewebe absorbiert wird. Sie wird in Watt pro Kilogramm (W/kg) angegeben. Beim Ganzkörper-SAR-Wert wird die absorbierte Leistung über den ganzen Körper gemittelt. Teilkörper-SAR-Werte werden verwendet, wenn nur Teile des Körpers der Strahlung ausgesetzt sind oder unterschiedliche Körpergewebe betrachtet werden.

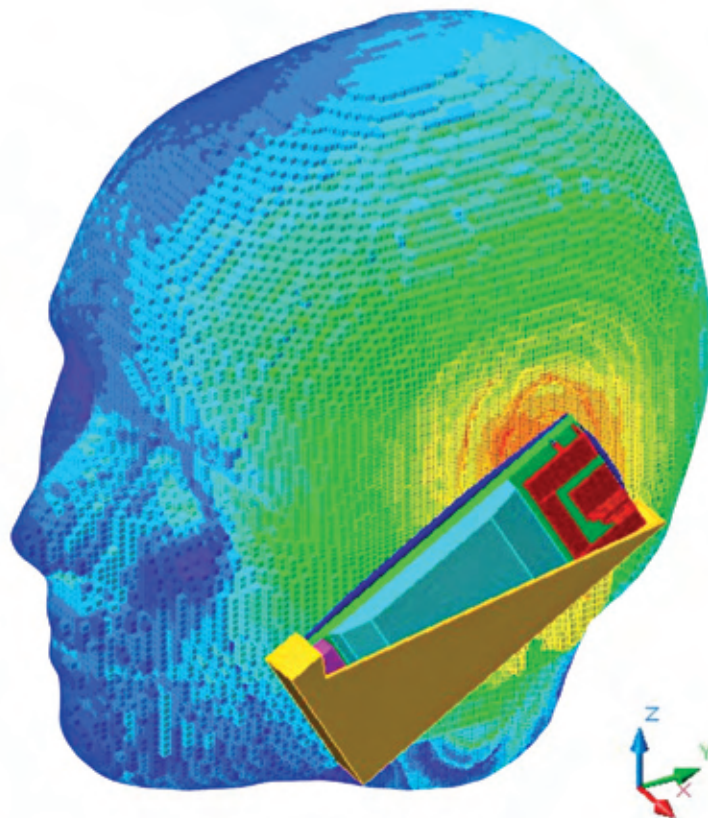
Ganzkörper-SAR-Werte von 1 bis 4 W/kg führen bei Erwachsenen zu einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von weniger als 1 °C. Körperliche Arbeit oder

sportliche Betätigung kann eine wesentlich stärkere Erwärmung hervorrufen. Beträgt der Energieumsatz eines Menschen im Ruhezustand ungefähr 1 W/kg, erhöht er sich beim Gehen auf etwa 3 bis 5 W/kg. Dabei kann es zur Erwärmung um mehr als 2 °C kommen, ohne dass bei einem gesunden Menschen Beeinträchtigungen auftreten.

Den Basisgrenzwerten im Hochfrequenzbereich liegt ein Ganzkörper-SAR-Wert von 0,08 W/kg zu Grunde. Damit wird sichergestellt, dass es auch für Ältere, Kranke oder Kinder nicht zu gesundheitlich beeinträchtigenden Temperaturerhöhungen kommen kann.

Dasselbe gilt für Teilkörper-SAR-Werte. Zum Schutz der einzelnen Körperteile muss die Feldeinwirkung so begrenzt werden, dass sich keine Stelle am Körper um mehr als 1 °C erwärmt. Der Grenzwert beträgt daher sicherheitshalber 2 W/kg, gemittelt über 10 g Körpergewebe.

Der Basisgrenzwert wird in Feldstärken elektromagnetischer Felder außerhalb des Körpers umgerechnet. Diese Feldstärken dürfen durch die Einwirkungen von Geräten, z. B. eines Handys, nicht überschritten werden. In der Medizin werden lokale Temperaturüberhöhungen gezielt genutzt, um einen therapeutischen Effekt zu erzielen. Dabei werden Teilkörper-SAR-Werte von 10 bis über 50 W/kg angewendet.



Quelle: IMST GmbH, Kamp-Lintfort, 2001

Exposition des Menschen durch die hochfrequenten elektromagnetischen Felder eines Handys.

Wirkungen

Sonstige Wirkungen

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 113–116

Bisher wurde kein Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und Krebs nachgewiesen.

LANGZEITWIRKUNGEN NIEDER- UND HOCHFREQUENTER FELDER

Viele Studien untersuchen eine mögliche Beziehung zwischen elektromagnetischen Feldern und Krebs. Nationale und internationale Expertenkommissionen haben bei der Bewertung der Gesamtheit der Studien jedoch bisher keinen Zusammenhang gefunden. Es gibt jedoch epidemiologische Studien, die auf mögliche Zusammenhänge hinweisen und daher bei der Bewertung genau betrachtet werden müssen.

NIEDERFREQUENTE FELDER UND KREBS

In ihrer fünf Stufen umfassenden Skala hat die Internationale Agentur für Krebsforschung (International Agency for Research on Cancer, IARC) niederfrequente 50-Hz-Felder aufgrund der Ergebnisse epidemiologischer Studien zu Leukämie bei Kindern als „möglicherweise krebserregend“ (2b) eingestuft. Auch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hält Magnetfelder für „möglicherweise kanzerogen“. Ein Zusammenhang mit kindlicher Leukämie wird allerdings nur im geringen Maße gesehen. Weitere gesundheitliche Beeinträchtigungen wie Depressionen, Herz-Kreislauf-

Erkrankungen oder Entwicklungsstörungen ergeben sich laut WHO nicht.

HOCHFREQUENTE FELDER UND KREBS

Hauptquelle für Hochfrequenzfelder sind starke Radio- und Fernsehsender. Nach Bewertung verschiedener Studien kommt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zum Schluss, dass es keinen ursächlichen Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzstrahlung von Rundfunksendern und Krebs gibt.

Die internationale Interphone-Studie, an der 13 Länder teilnehmen, untersucht mögliche Zusammenhänge zwischen der Handynutzung und dem Risiko, an einem Tumor im Kopfbereich zu erkranken. Im Mai 2010 wurden erste zusammengefasste Ergebnisse aus der INTERPHONE-Studie über mögliche Langzeitfolgen der Mobilfunknutzung veröffentlicht. Der Auswertung zufolge konnte kein erhöhtes Risiko von Hirntumoren durch Handynutzung nachgewiesen werden. Damit bestätigt die Studie die Ergebnisse des vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) durchgeführten Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms.



TABELLE: SKALA DER IARC ZUR EINSTUFUNG VERSCHIEDENER UMWELT-AGENZIE

Gruppe 1 – „für Menschen krebserregend“	ca. 100 Stoffe, z. B. Asbest, Cadmium, Radon und seine Zerfallsprodukte
Gruppe 2a – „für Menschen wahrscheinlich krebserregend“	über 50 Stoffe, z. B. Acrylamid (entsteht bei starkem Anbraten), Bitumendämpfe und Abgase von Dieselmotoren
Gruppe 2b – „für Menschen möglicherweise krebserregend“	über 200 Stoffe, z. B. konserviertes saures Gemüse und Kaffee, niederfrequente elektromagnetische Felder
Gruppe 3 – „nicht klassifizierbar“	ca. 500 Stoffe, z. B. Tee und Saccharine
Gruppe 4 – „für Menschen wahrscheinlich nicht krebserregend“	Caprolactam (kristalliner Feststoff)

Niederfrequente Felder werden als möglicherweise krebserregend eingestuft.

Wirkungen

Sonstige Wirkungen

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 117–119

Implantate wechselwirken besonders stark mit elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern.

BEFINDLICHKEITSSTÖRUNGEN

Manche Menschen schreiben ihre gesundheitlichen Beschwerden dem Einfluss elektromagnetischer Felder zu. Die Symptome dieser so genannten elektrosensiblen Personen sind unspezifisch und können stark variieren. Nach mehreren Studien zu Befindlichkeitsbeeinträchtigungen schließt das BfS jedoch einen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und den Beschwerden elektrosensibler Personen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus. Auch die WHO sieht keinen Zusammenhang zwischen den bestehenden Symptomen und Feldern.

BEEINTRÄCHTIGUNGEN VON IMPLANTATTRÄGERN

Aktive Implantate wie Herzschrittmacher, Nervenstimulatoren, Insulinpumpen oder Hörprothesen, die mit elektronischen Schaltkreisen ausgestattet sind, können durch niederfrequente und hochfrequente Felder gestört werden. Metallische Prothesen können sich in seltenen Fällen in starken Hochfrequenzfeldern erwärmen und so zu einer Schädigung des umliegenden Gewebes führen.

Träger technischer und insbesondere aktiver Implantate sollten daher Fragen zur elektromagnetischen Verträglichkeit auf jeden Fall mit ihrem behandelnden Arzt abklären. Es gibt nur wenige Quellen niederfrequenter Felder, die imstande sind, die Funktion von Herzschrittmachern und anderen aktiven

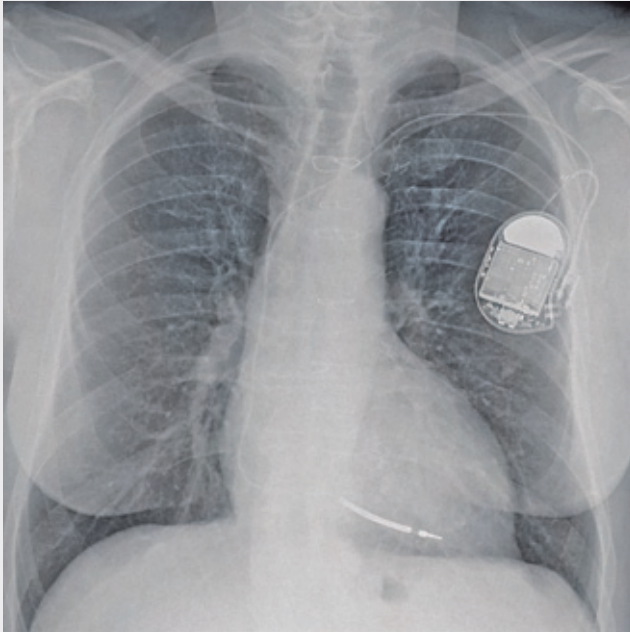
Implantaten zu beeinträchtigen. Störungen sind z. B. nicht ausgeschlossen

- unmittelbar unter einer 380-kV-Hochspannungsfreileitung
- im Überwachungsbereich von Artikelsicherungsanlagen und Metalldetektoren und
- bei der körpernahen Verwendung von Geräten mit starken Motoren wie z. B. Bohrmaschinen.

Im Allgemeinen reicht bei Haushaltsgeräten mit kleinem Elektromotor, beispielsweise Mixer oder Fön, ein Sicherheitsabstand von 20 cm aus. Von den Feldern der üblichen Hochspannungs- und Stromversorgungsleitungen geht in der Regel keine Gefahr für Implantatträger aus.

Für den Bereich der hochfrequenten Felder ist festzuhalten, dass der Aufenthalt in unmittelbarer Nähe starker Rundfunk- und Fernsehsender gefährlich sein kann. Wo nötig, werden Warnschilder aufgestellt. Implantatträger sollten generell solche Bereiche mit starken Feldern meiden.

Die Felder von Handys können keine Störungen auslösen, wenn die betriebsbereiten Geräte in einem Abstand von mehr als 20 cm vom Implantat gehalten werden. In manchen Krankenhäusern ist die Mobilfunknutzung in Bereichen untersagt, wo empfindliche medizinische Geräte und Patienten mit Implantaten gestört werden könnten.



Aktive Implantate wie Herzschrittmacher, Nervenstimulatoren, Cochlea-implantate oder Hörprothesen, die mit elektronischen Schaltkreisen ausgestattet sind, können durch niederfrequente und hochfrequente Felder gestört werden.

Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern

Gesetzliche Vorgaben

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 108 und 124–129

Die gesetzlichen Regelungen beinhalten Grenzwerte mit hohem Sicherheitsfaktor.

Das Gesetz zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NiSG) gilt für den Betrieb von Anlagen zur medizinischen Anwendung sowie wirtschaftlich genutzte Anlagen mit Anwendungen außerhalb der Medizin. Für den Schutz der Allgemeinheit vor der Einwirkung nichtionisierender elektromagnetischer Felder sind in der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, 26. BImSchV) Grenzwerte festgelegt. Man unterscheidet zwischen Basisgrenzwerten und Referenzgrenzwerten.

Basisgrenzwerte beruhen auf gesicherten Schwellenwerten der im Gewebe wirksamen Einflussgrößen. Im Niederfrequenzbereich ist dies die Stromdichte in mA/m^2 , im Hochfrequenzbereich die Spezifische Absorptionsrate (SAR) im Gewebe in W/kg . Da die Basisgrenzwerte messtechnisch nicht direkt zu ermitteln sind, werden Referenzgrenzwerte abgeleitet, die in der Umgebung des Menschen leicht gemessen werden können. Messbare Größen sind zum Beispiel die elektrische Feldstärke, die magnetische Flussdichte und die Leistungsflussdichte.

Der empfohlene Basisgrenzwert für die Stromdichte bei niederfrequenten Feldern im Körper beträgt generell 2 mA/m^2 . Im Hochfrequenzbereich werden ein Ganzkörper-SAR-Wert von $0,08 \text{ W/kg}$ und ein Teilkörper-SAR-Wert von 2 W/kg empfohlen.

Für beruflich exponierte Menschen gelten höhere Grenzwerte, da sie den elektromagnetischen Feldern unter kontrollierbaren Bedingungen für die Dauer von 8 h pro Arbeitstag ausgesetzt sind. Hier liegen die Grenzwerte bei 10 mA/m^2 (Stromdichte) bzw. $0,4 \text{ W/kg}$ (Ganzkörper-SAR-Wert) und 10 W/kg (Teilkörper-SAR-Wert).

Die Basisgrenzwerte liegen um einen Sicherheitsfaktor 50 unterhalb der Schwellenwerte, bei denen akute Wirkungen nachgewiesen werden konnten. Damit wird den Umgebungsbedingungen, der individuellen Empfindlichkeit, dem Alter und dem Gesundheitszustand von Einzelpersonen in der Bevölkerung Rechnung getragen.

Die 26. BImSchV enthält zudem Anforderungen an ortsfeste Anlagen in bestimmten Frequenzbereichen. Im Niederfrequenzbereich sind das die Bahnstromanlagen (16,7 Hz) und die öffentliche Stromversorgung (50 Hz). Im Hochfrequenzbereich fallen Anlagen, die mit Frequenzen zwischen 10 MHz und 300 GHz ausstrahlen und eine bestimmte Sendeleistung überschreiten, unter die Verordnung. Nicht einbezogen sind Rundfunksender der Kurz- und Mittelwelle. Für deren Frequenzbereiche von 100 kHz bis 10 MHz wird auf die Empfehlungen der Europäischen Union zurückgegriffen. Auch Amateurfunkanlagen und nicht ortsfeste Quellen wie Haushaltsgeräte oder Handys werden von der 26. BImSchV nicht erfasst.

GRENZWERTE FÜR NIEDERFREQUENZANLAGEN GEMÄSS DER 26. BIMSCHV

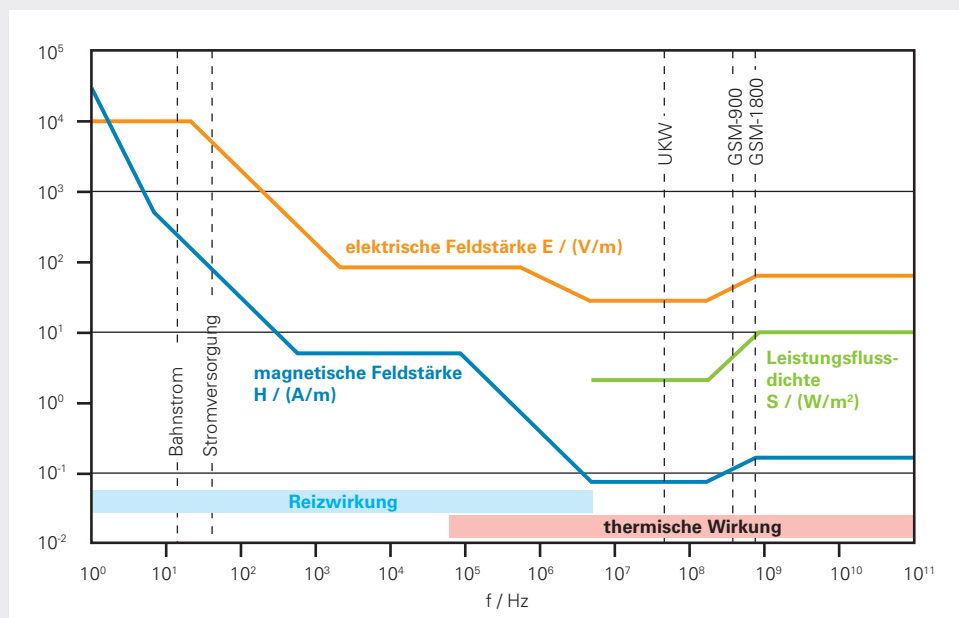
Frequenz in Hz	Elektrische Feldstärke in kV/m	Magnetische Flussdichte in μT
50	5	100
16 2/3	10	300

GRENZWERTE FÜR HOCHFREQUENZANLAGEN GEMÄSS DER 26. BIMSCHV

Frequenz in MHz	Elektrische Feldstärke in V/m	Magnetische Feldstärke in A/m
10 bis 400	27,5	0,073
400 bis 2.000	$1,375 \times \sqrt{f}$	$0,0037 \times \sqrt{f}$
2.000 bis 300.000	61	0,16

Für f ist der Zahlenwert in der Einheit MHz einzusetzen

Der Grenzwert ist teilweise frequenzabhängig (Wurzelfunktion).



Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 1 Hz bis 100 GHz für die Allgemeinbevölkerung (ungestörte Effektivwerte).



II. Näher betrachtet

Elektromagnetische Felder im Alltag

1. Physikalische Grundlagen

1.1 ELEKTRISCHE UND MAGNETISCHE FELDER

Ein **elektrisches Feld** entsteht überall dort, wo aufgrund getrennter Ladungsträger eine elektrische Spannung U vorhanden ist. Dies ist auch dann der Fall, wenn kein Strom fließt.

Die elektrische Spannung wird in Volt (V) gemessen, die elektrische Feldstärke E in Volt pro Meter (V/m). Die Stärke des elektrischen Feldes

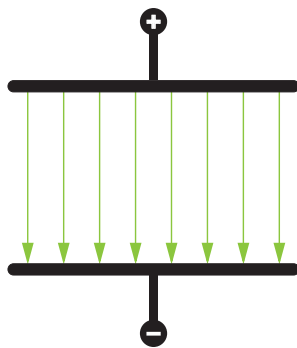
- nimmt mit steigender Spannung zu und
- mit zunehmendem Abstand von der Quelle ab.

Elektrische Felder werden stark durch ihre Umgebung beeinflusst. Jedes leitfähige Objekt erfährt im elektrischen Feld eine Verschiebung der Ladungsverteilung (Influenz); dadurch wirkt es auf die Form des Feldes zurück. Im Innern eines geschlossenen leitfähigen Raumes („Faradayscher Käfig“) wird das elektrische Feld ausgelöscht, da das Feld der Influenzladungen das ursprüngliche Feld mit umgekehrtem Vorzeichen überlagert (s. Abbildung rechts).

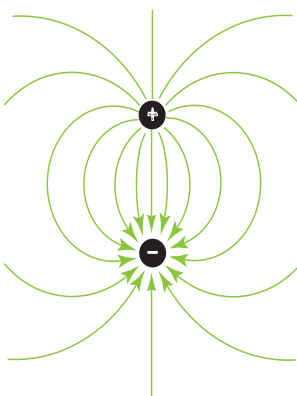
Auch Gebäude schirmen ein von außen einwirkendes elektrisches Feld nahezu vollständig ab, so dass die elektrische Feldstärke im Gebäudeinnern im Vergleich zu den von außen einwirkenden Feldern vernachlässigbar gering ist. Umgekehrt kann auch ein im Innern eines leitfähigen Objektes erzeugtes elektrisches Feld weitestgehend nach außen hin abgeschirmt werden, z. B. bei einem Mikrowellenherd.

Wirkt ein zeitlich sich änderndes elektrisches Feld auf einen elektrisch leitfähigen Körper ein, so führt der ständige Ladungswechsel im Körper zu einem wechselnden Stromfluss. Der Strom wird in der Einheit Ampere (A) gemessen. Die elektrische Stromdichte gibt den Strom pro Fläche (A/m^2) an.

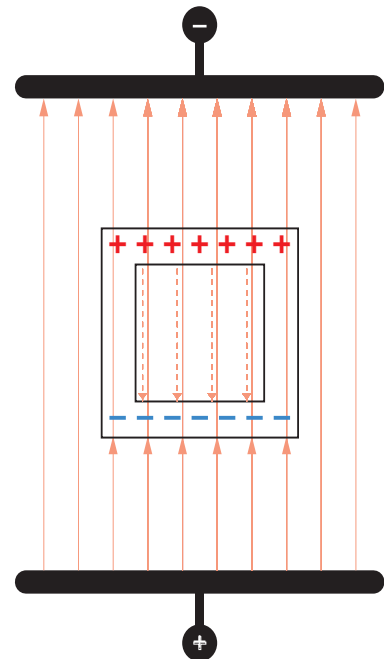
Ein **magnetisches Feld** entsteht überall dort, wo elektrische Ladungen bewegt werden, d. h. wo Strom fließt. Die Stärke des magnetischen Feldes wird in Stromstärke pro Meter (A/m) angegeben und als magnetische Feldstärke H bezeichnet.



Homogenes elektrisches Feld
(Plattenkondensator; idealisiert),
Quelle: LUBW



Inhomogenes elektrisches Feld
zweier Ladungen (Dipol),
Quelle: LUBW



Ein externes Feld führt bei guten Leitern zu einer Ladungsverschiebung. Dadurch wird im Innern ein Gegenfeld erzeugt (im Bild gestrichelt dargestellt). In der Folge neutralisieren sich die Felder.

Quelle: LUBW

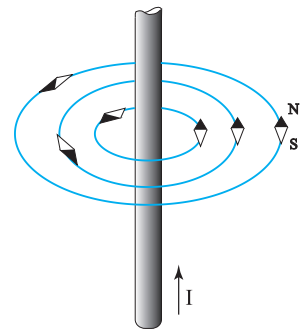
Die magnetische Flussdichte B gibt die Stärke des magnetischen Feldes H in Materie an und wird in Tesla (T) gemessen. Für die magnetische Flussdichte B wird häufig auch der Begriff magnetische Induktion verwendet. In vielen Fällen ist die magnetische Flussdichte mit der magnetischen Feldstärke über eine Materialkonstante, der Permeabilität μ , direkt verknüpft. So entspricht in Luft eine magnetische Feldstärke von 1 A/m einer magnetischen Flussdichte von $1,257 \mu\text{T}$.

Die Stärke des Magnetfeldes

- nimmt mit zunehmender Stromstärke zu und
- mit wachsendem Abstand von der Quelle ab.

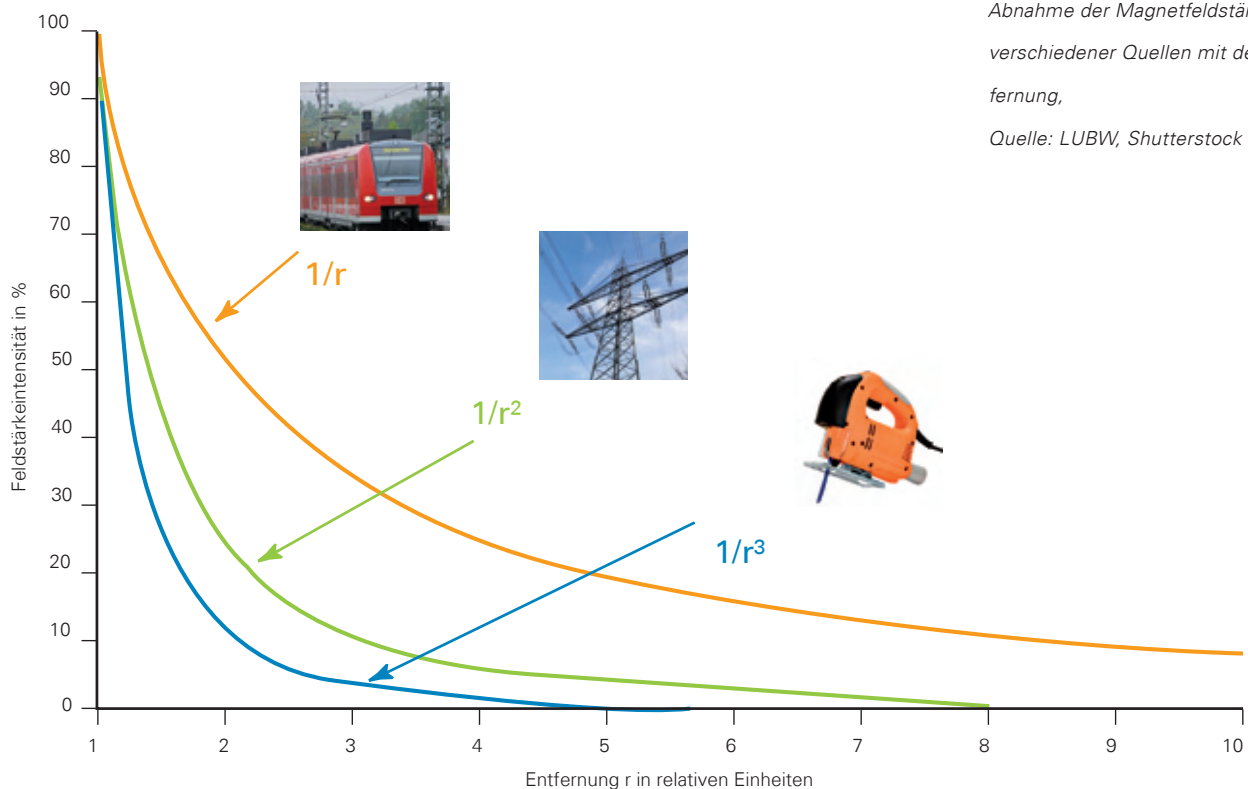
Als Beispiel für ein magnetisches Feld sind in der Abbildung rechts die Magnetfeldlinien eines geraden, stromdurchflossenen Leiters dargestellt.

Das Magnetfeld kann im Gegensatz zum elektrischen Feld die meisten Materialien nahezu unvermindert durchdringen. Eine Abschirmung ist, wenn überhaupt, nur mit großem Aufwand und teuren Spezialwerkstoffen zu erreichen. Wie stark die magnetische Feldstärke mit zunehmender Entfernung von der Quelle abnimmt, hängt auch von der Art des jeweiligen Stromkreises ab (Abbildung unten).



Magnetfeldlinien eines stromdurchflossenen Leiters,

Quelle: LUBW



Abnahme der Magnetfeldstärke verschiedener Quellen mit der Entfernung,

Quelle: LUBW, Shutterstock

$1/r$: Feld eines geraden langen stromdurchflossenen Leiters (z.B. Bahnstromleitung)
 $1/r^2$: Feld durch Überlagerung zweier Leiter mit hin- und rückfließendem Strom
 $1/r^3$: Feld einer Zylinderspule (z.B. Elektromotor)

1.2 SCHWINGUNGEN UND WELLEN

Bei elektrischen Wechselfeldern ändert sich die Polarität (+/-) des Feldes mit der Zeit. Typischer Weise erfolgt dieser Polari-
tätswechsel in Form einer Sinusschwingung, wie sie in der Abbildung unten dargestellt ist.

Am besten geeignet zum Verständnis einer elektrischen Schwingung sind Wellen auf der Wasseroberfläche, die auch Namensgeber für die elektromagnetische Welle waren. Wellen haben Wellenberge und Wellentäler. Der räumliche Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder zwei Wellentälern wird als **Wellenlänge** λ bezeichnet und in Metern gemessen. Beim Mobilfunk liegt die Wellenlänge zwischen 15 und 30 cm.

Wasserwellen wandern mit der Zeit über die Wasseroberfläche; an einem festen Ort schwankt der Wasserstand fortwährend. Ein Schiff, das auf einer festen Stelle ankert, schwingt an dieser Stelle auf und ab. Die Zeitdauer zwischen zwei Wellenbergen

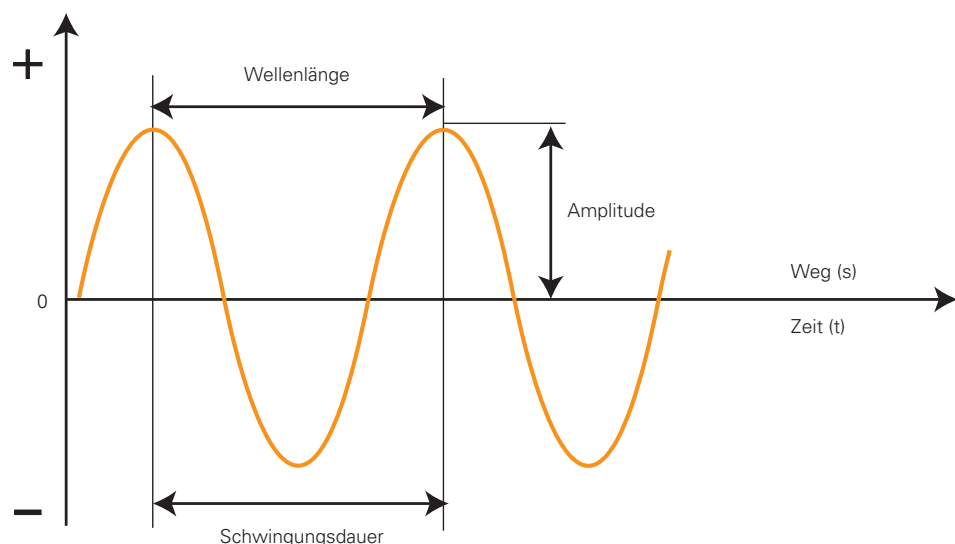
oder zwei Wellentälern wird als **Schwingungsdauer T** bezeichnet und in Sekunden gemessen.

Bildet man von der Schwingungsdauer den Kehrwert, ergibt sich die **Frequenz** mit der Einheit 1/s oder Hertz (Hz). Sie ist ein Maß für die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde.

Beim Mobilfunk liegt die Frequenz zwischen 790 Millionen Schwingungen und 2,7 Milliarden Schwingungen pro Sekunde (790 MHz–2,7 GHz).

Die Stärke der Schwingung wird als **Amplitude** bezeichnet. Je nach Art der Schwingung wird hier die passende Einheit verwendet. Während die Amplitude von Wasserwellen in Metern gemessen wird, wird die Amplitude von Schallwellen in Pascal, die Amplitude des elektrischen Wechselfeldes in Volt pro Meter und die Amplitude des magnetischen Wechselfeldes in Ampere pro Meter gemessen.

Verlauf einer sinusförmigen
Welle, Quelle: LUBW



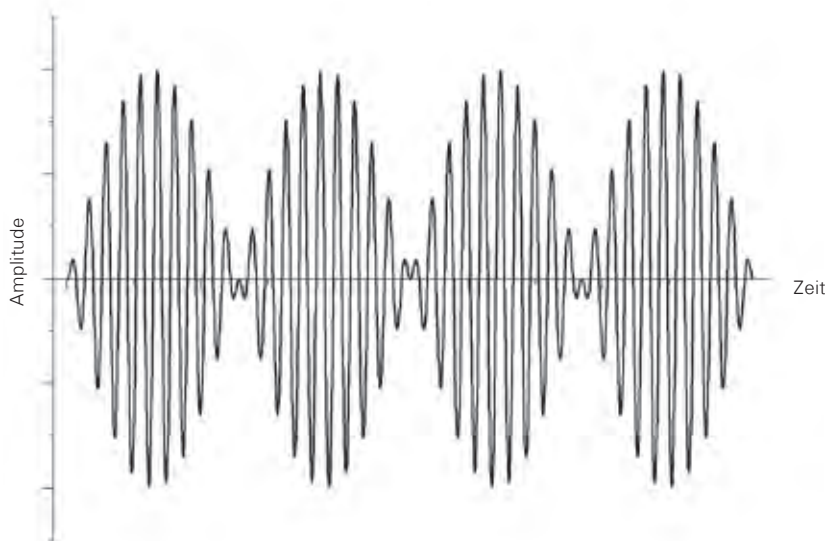
Wellen haben eine **Ausbreitungsgeschwindigkeit**. Bei Wasserwellen liegt sie typisch bei 5 bis 10 m/s, bei Schall beträgt sie 343 m/s (Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20 °C).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist im Vakuum und in guter Näherung in Luft für alle Frequenzen gleich und entspricht der **Lichtgeschwindigkeit**, die ca. 300.000 km/s beträgt. Es gibt folgenden physikalischen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ , der Schwingungsdauer T einer elektromagnetischen Welle sowie der Lichtgeschwindigkeit c :

$$\lambda = T \cdot c$$

Elektromagnetische Felder können sich von der Quelle, z. B. einer Antenne, lösen und im Raum über große Entfernungen ausbreiten. Diese Eigenschaft wird zur Informationsübertragung z. B. bei Rundfunk, Fernsehen und Mobilfunk genutzt.

Zur Informationsübertragung wird einer reinen hochfrequenten Sinusschwingung das zu übertragende Bild-, Ton- oder Datensignal aufgesetzt. Das Verfahren wird als **Modulation** bezeichnet. Die Trägerschwingung kann dazu sowohl in ihrer Amplitude (Amplitudenmodulation AM, siehe Abbildung unten), in ihrer Frequenz (Frequenzmodulation FM) als auch in ihrer Phase (Phasenmodulation PM) verändert werden. Je nach Verfahren werden alle Parameter oder nur einzelne Parameter des Trägersignals verändert. Bei der analogen Amplitudenmodulation erfolgt beispielsweise nur eine Variation der Amplitude des Trägersignals, während die anderen Parameter der Trägerfrequenz keine Information beinhalten. Die modulierte Trägerschwingung kann dann zum Empfänger übertragen werden, der mittels Demodulation die ursprüngliche Ton-, Bild- oder Dateninformation wiedergewinnt.



Die einfachste Form einer Modulation: Amplitudenmodulation,
Quelle: LUBW

1.3 ELEKTROMAGNETISCHES SPEKTRUM

Elektrische und magnetische Felder stehen in einem engen Zusammenhang: Elektrische Felder bewegen elektrische Ladungen, bewegte elektrische Ladungen erzeugen magnetische Felder und magnetische Wechselfelder erzeugen (induzieren) wiederum elektrische Felder. Diese wechselseitige enge Verknüpfung ist umso stärker, je schneller die Feldänderungen erfolgen, d. h. je höher die Frequenz ist. Bei hohen Frequenzen über 30 Kilohertz (kHz) können die beiden Felder nicht mehr getrennt betrachtet werden. Man spricht nun von elektromagnetischen Feldern oder Wellen.

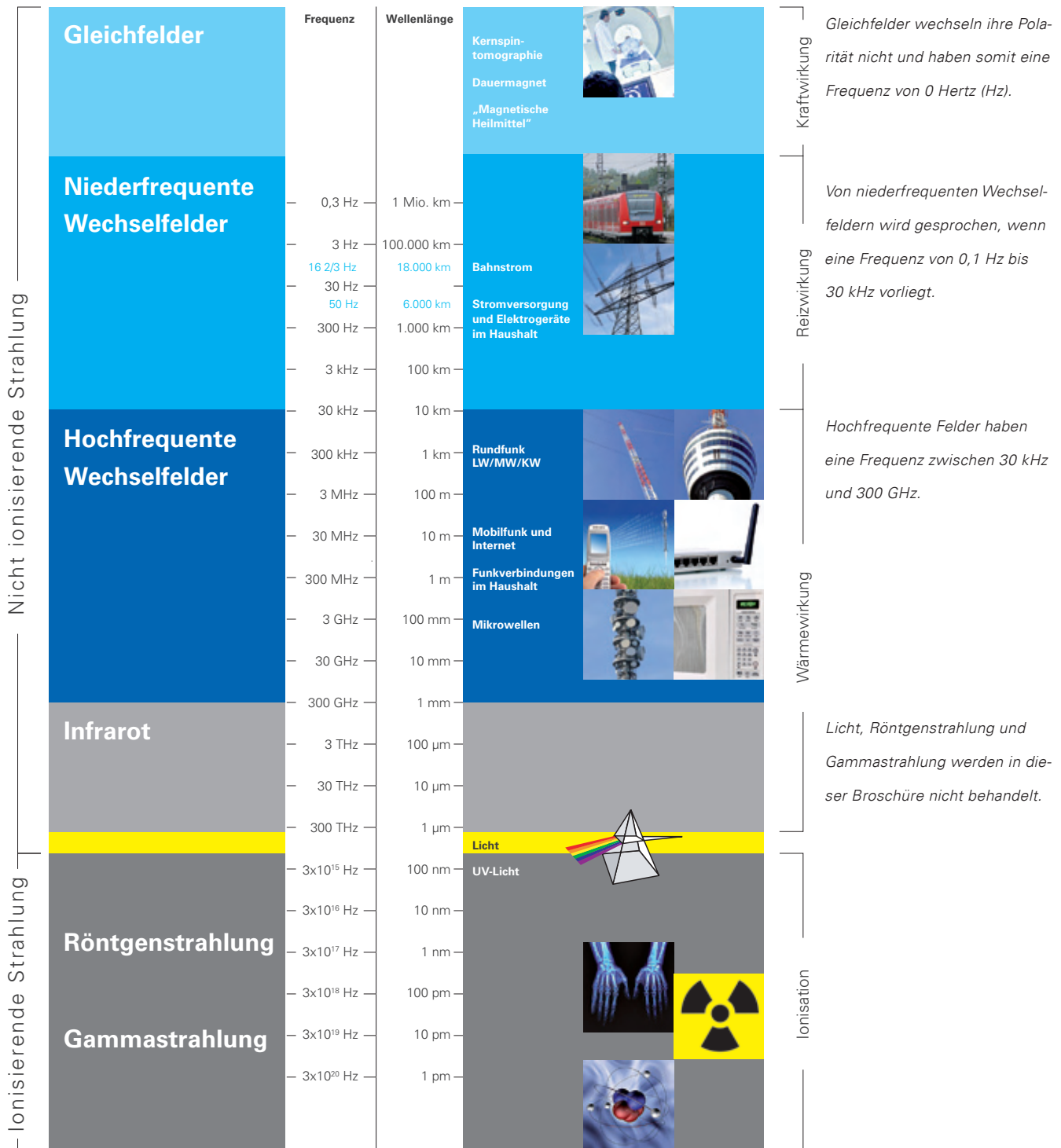
Der physikalische Begriff der elektromagnetischen Wellen bzw. Felder und Strahlen umfasst einen weiten Frequenzbereich (Abbildung rechts). Man spricht von Gleichfeldern oder statischen Feldern, wenn sich die Polarität nicht oder nur sehr langsam ändert, die Frequenz also null bzw. fast null ($< 0,1$ Hz) ist. In einer groben Aufteilung wird der Bereich von 0,1 Hz bis etwa 30 kHz als Niederfrequenz und der Bereich von 30 kHz bis 300 GHz als Hochfrequenz bezeichnet. Das Frequenzband von 30 kHz bis 300 MHz wird vielfach als Radiofrequenzband, zusammengesetzt aus Langwellen (LW), Mittelwellen (MW), Kurzwellen (KW) und Ultrakurzwellen (UKW), bezeichnet.

Im Bereich von 300 MHz bis 300 GHz spricht man von Mikrowellen. Den Mikrowellenbereich nutzen zum Beispiel Fernsehsender, Mobilfunknetze, Radaranlagen und Mikrowellenherde.

Im Bereich von 300 GHz bis 384 THz (1 mm bis $0,78 \mu\text{m}$) spricht man von infrarotem Licht, infraroter Strahlung oder auch von Wärmestrahlung. Der Frequenzbereich von 384 THz bis 789 THz (780 nm bis 380 nm) ist für das menschliche Auge sichtbar, er wird deshalb als sichtbares Licht bezeichnet.

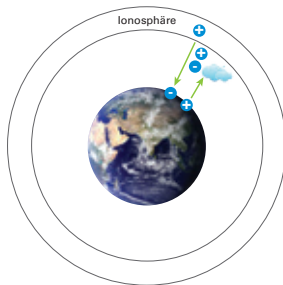
Das elektromagnetische Spektrum kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden: Den der nichtionisierenden Strahlung und den der ionisierenden Strahlung. Zur ionisierenden Strahlung zählen harte ultraviolette Strahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung, die eine hohe Quantenenergie haben und die Bindungen zwischen Atomen und Molekülen im Körper auflösen können. Eine scharfe Grenze zwischen den Bereichen gibt es nicht, manche Autoren ziehen die Grenze bei 200 nm, andere bei 100 nm. Ionisierende Strahlen aller Art gelten als krebserregend und sind nicht Thema dieser Broschüre; hier wird ausschließlich auf den Bereich der nichtionisierenden Strahlung bis 300 GHz eingegangen (Niederfrequenz bis Mikrowellen).

ELEKTROMAGNETISCHES SPEKTRUM



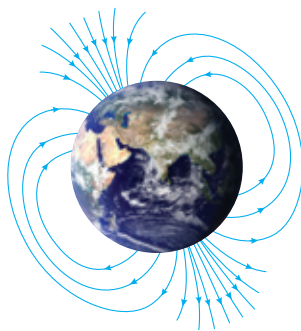
2. Natürliche elektromagnetische Felder

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 8–9**



Elektrisches Feld der Erde,

Quelle: LUBW



Feldlinien des Erdmagnetfeldes

(schematisch), Quelle: LUBW

Elektromagnetische Felder sind seit jeher Bestandteil der natürlichen Umwelt des Menschen. Natürliche Vorkommen sind in erster Linie

- das elektrische Feld zwischen Erdboden und höheren Atmosphärenschichten,
- das Magnetfeld der Erde und
- die natürliche elektromagnetische Strahlung (Licht- und Wärmestrahlung der Sonne).

2.1 ELEKTRISCHES FELD IN DER ATMOSPHÄRE

Durch die energiereiche Sonnenstrahlung und die kosmische Strahlung wird die Atmosphäre in ca. 70 km Höhe stark ionisiert, d. h. elektrisch aufgeladen. Daher nennt man diese Schicht auch Ionosphäre. Zwischen ihr und dem Erdboden besteht eine Potenzialdifferenz von bis zu 300 kV (s. Abbildung links oben). Dadurch bildet sich ein statisches elektrisches Feld über der Erdoberfläche. Die Stärke dieses Feldes ist abhängig von

- der Sonnenaktivität,
- der Leitfähigkeit der Luft,
- der Jahreszeit und
- dem Wetter.

So ist die Feldstärke im Winter mit ca. 270 V/m doppelt so groß wie im Sommer mit ca. 130 V/m. Bei Gewittern können über ebenem Gelände Feldstärken von 20.000 V/m auftreten. In Gewitterwolken werden Werte von etwa 200.000 V/m erreicht.

2.2 MAGNETFELD DER ERDE

Die geomagnetischen Pole der Erde fallen nicht genau mit den geographischen Polen der Erde zusammen und sind auch nicht ortsfest. Das Erdmagnetfeld verändert sich im Laufe der Jahrhunderte, in unregelmäßigen Abständen kehrt sich die Polarität sogar um (ca. 500.000 Jahre). Zurzeit ist die Achse des geomagnetischen Dipolfeldes um etwa $11,5^\circ$ gegenüber der Erdachse geneigt. Dies führt dazu, dass ein Kompass an den meisten Orten nicht genau nach Norden zeigt. Man nennt diese Abweichung auch Ortsmissweisung.

Das statische Erdmagnetfeld, das die ganze Erde vom Südpol bis zum Nordpol umgibt (Abbildung links unten), hat am Äquator eine Flussdichte von ca. $30 \mu\text{T}$ und an den Polen von ca. $70 \mu\text{T}$ (Abbildung rechts oben). Für Süddeutschland kann man etwa $48 \mu\text{T}$ ablesen. Damit ist das Erdmagnetfeld das stärkste Magnetfeld, welchem wir und andere Organismen im allgemeinen dauerhaft ausgesetzt sind.

Im Feldlinienbild des Erdmagnetfeldes (Abbildung links unten) sieht man, dass die magnetischen Feldlinien nur in Äquatornähe parallel zur Erdoberfläche verlaufen. In Mitteleuropa treten die Linien schräg in den Erdboden ein.

Den Winkel zwischen einer zur Erdoberfläche parallelen Ebene und der Feldlinie bezeichnet man als Inklinationwinkel („Eintrittswinkel“). Er liegt in Süddeutschland zwischen ca. $63,5^\circ$ und 66° . Die Inklination ist am Nord- und Südpol etwa 90° , am Äquator etwa 0° .

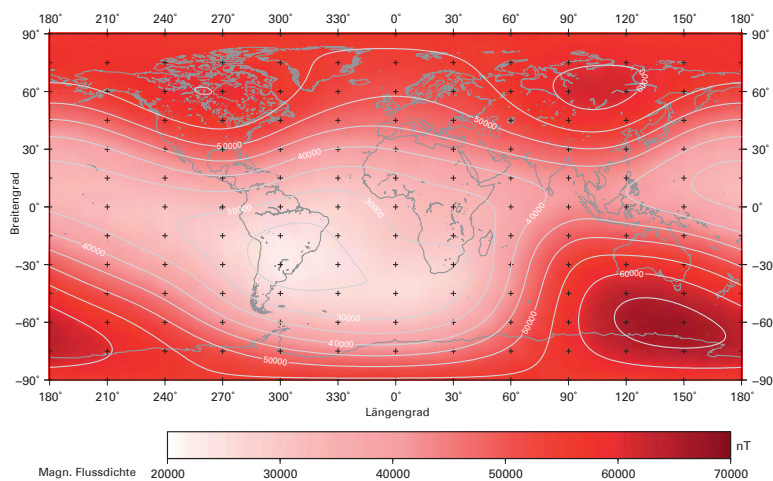
Das Erdmagnetfeld setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- Feld des flüssigen Erdkerns (Hauptfeld, Anteil ca. 96 %)

- Oberflächennahe magnetisierte Mineralien in der Erdkruste (Krustenfeld, Anteil ca. 2 %)

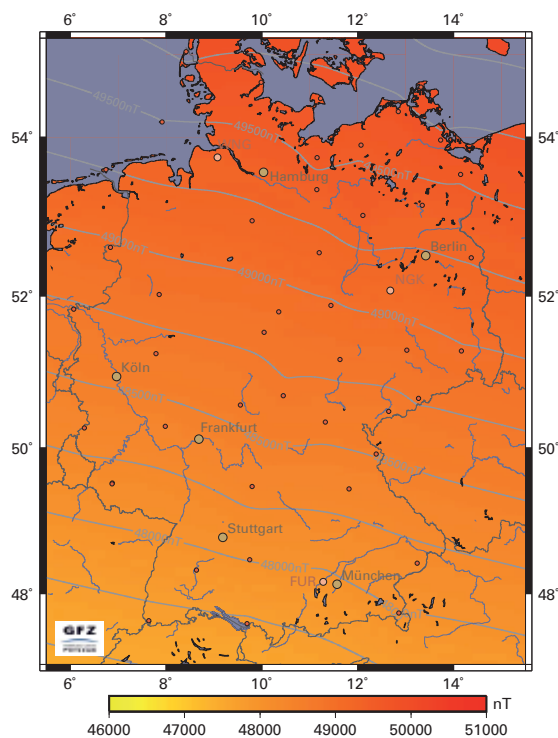
- Effekte der äußeren Atmosphäre (Magnetosphäre und Ionosphäre, Anteil ca. 2 %), die sich unter dem Einfluss der Sonneneinstrahlung und des Sonnenwindes ständig ändern.

Weitere Informationen sowie einen Online-Erdmagnetfeldrechner gibt es beim Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam [1].



Das Magnetfeld der Erde hat am Äquator eine Flussdichte von ca. $30 \mu\text{T}$, an den Polen ist es etwa doppelt so groß.

Quelle: GeoForschungsZentrum Potsdam, Stand 2006



Magnetische Feldstärke in Deutschland im Jahr 2006

Quelle: GeoForschungsZentrum Potsdam, Stand 2006

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 8–9**

Das Erdmagnetfeld hat in der Entwicklungsgeschichte der Organismen seine Spuren hinterlassen. So nutzen einige Tiere, wie zum Beispiel Tauben, Zugvögel, Meeresschildkröten, Haie und wahrscheinlich auch Wale zur Orientierung das Erdmagnetfeld. Die Orientierung der Bewegungsrichtung von Lebewesen im Erdmagnetfeld wird als Magnetotaxis bezeichnet.

Selbst Bakterien nutzen das Erdmagnetfeld. Solche magnetotaktischen Mikroorganismen verwenden einen zellulären Mini-Kompass, der aus einer Kette von einzelnen Nano-Magneten (Magnetosome) besteht und die gesamte Bakterienzelle wie eine Kompassnadel im magnetischen Feld ausrichtet. Die Magnetosome erlauben dem Bakterium anhand der Magnetfeldlinien des Erdmagnetfeldes „oben“ von „unten“ zu unterscheiden und zielsicher jene Wasserschichten anzusteuern, in denen es optimale Wachstumsbedingungen vorfindet [2]. Magnetosomen kommen auch bei Algen vor.

Bei einigen höheren Lebewesen, auch bei Wirbeltieren, wurden Magnetosome im Bereich der Ohren oder im Gehirn nachgewiesen. Möglicherweise spielen sie auch hier eine Rolle bei der Orientierung im Ma-

gnetfeld. In der Netzhaut von Zugvögeln wurde ein Molekül (Cryptochrom) entdeckt, das auf magnetische Felder reagiert. Dank dieses Rezeptors im Auge können die Tiere das Magnetfeld der Erde möglicherweise buchstäblich sehen [3].

2.3 WEITERE NATÜRLICHE FELDER

Jede Stunde entstehen auf der Erde etwa eine Million Blitze, die in geringem Maße zum Erdmagnetfeld beitragen. In Deutschland wurden im Jahr 2009 insgesamt 2,4 Millionen Blitze registriert [4]. In unmittelbarer Nähe eines Blitzes können magnetische Flussdichten von bis zu $1.000 \mu\text{T}$ auftreten. Bei jeder Blitzentladung wird ein elektromagnetischer Impuls erzeugt, der sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und noch in Hunderten von Kilometern Entfernung gemessen werden kann. Dadurch lassen sich Blitze genau lokalisieren.

Polarlichter dagegen entstehen durch energiereiche, elektrisch geladene Teilchen des Sonnenwindes, die auf die Erdatmosphäre treffen und Luftmoleküle zum Leuchten bringen. Dabei werden weit reichende elektromagnetische Felder erzeugt, die unter Umständen sogar negative Auswirkungen auf Stromnetze und elektronische Bauteile haben können.

Es gibt Lebewesen, die in der Lage sind, elektrische Felder zu erzeugen. Sie besitzen zudem einen „Elektrosinn“ zur Wahrnehmung von Feldern und Feldänderungen. So nutzt etwa der Nilhecht schwache elektrische Felder zur Ortung von Beute und Hindernissen in trübem Wasser. Dabei treten Spannungen von einigen Volt auf. Andere Fische, wie etwa der Zitteraal, verwenden stärkere Felder zur Lähmung ihrer Beute. Dabei kommen schlagartige Entladungen mit Spannungen bis zu 800 V auf.

Polarlicht, Quelle: Shutterstock



2.4 LICHT UND WÄRMESTRAHLUNG

Die wichtigste natürliche Strahlenquelle ist die Sonne. Aufgrund ihrer hohen Oberflächentemperatur von ca. 5.500 °C gibt sie infrarotes Licht (Wärmestrahlung), sichtbares Licht, UV-Strahlung und ionisierende Strahlung auf die Erde ab.

Ohne den Einfluss der Atmosphäre und bei mittlerem Abstand zwischen Erde und Sonne würde bei senkrechtem Sonnenstand (90°) die Sonnenbestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche 1.367 W/m² betragen. Dieser Wert wird als Solarkonstante bezeichnet. In Süddeutschland kann im Sommer, wenn die Mittagssonne 65° hoch am Himmel steht,

bei idealen Wetterbedingungen eine Bestrahlungsstärke von etwa 700 W/m² gemessen werden. Im Winter werden beim Sonnenhöchststand von 18° nur etwa 250 W/m² erreicht. Auf hohen Bergen, wo in 3-4 km die Atmosphäre viel dünner ist, können im Sommer bis zu 1.000 W/m² erreicht werden.

Die Erde reflektiert auf ihrer Tagseite die Sonnenstrahlung. Da sie mit durchschnittlich 15 °C eine weitaus niedrigere Oberflächentemperatur aufweist als die Sonne, strahlt sie aktiv nur langwellige Wärmestrahlung mit Wellenlängen von 10 bis 100 µm ab.

Natürliche elektromagnetische Felder und ihre Feldstärken bzw. Flussdichten

Phänomen	auf tretende elektrische Feldstärken bzw. magnetische Flussdichten
statisches elektrisches Feld zwischen Erdboden und Ionosphäre in 70 km Höhe	130-270 V/m
Gewitter	bis 20.000 V/m
Spitzen bei der Blitzauslösung	200.000 V/m
Statisches Erdmagnetfeld	25-70 µT
im Mittel in Bayern und Baden-Württemberg	48 µT
Blitznähe	1.000 µT



Blitze verursachen starke elektromagnetische Impulse und Magnetfelder.

Quelle: Shutterstock

3. Niederfrequente und statische Felder

Kompakte Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 16–21

Neben den natürlichen elektrischen und magnetischen Feldern gibt es solche, die der Mensch durch technische Anwendungen künstlich erzeugt. Bei Gleichfeldern oder statischen Feldern ändert sich die Polarität nicht oder nur sehr langsam, die Frequenz ist also null bzw. fast null ($< 0,1$ Hz). Von niederfrequenten Wechselfeldern wird gesprochen, wenn eine Frequenz von 0,1 Hz bis 30 kHz vorliegt.

3.1 ELEKTRISCHE UND MAGNETISCHE GLEICHFELDER

Elektrische Gleichfelder treten bei vielen Elektrogeräten und Maschinen als Nebenprodukt auf, meist sind sie sehr schwach. Im **öffentlichen Nahverkehr** werden Straßenbahnen, U-Bahnen und Stadtbahnen meist mit 750 V Gleichspannung betrieben.

Zwischen der Oberleitung und der Schiene tritt ein elektrisches Gleichfeld auf. Mit Gleichstrom fahren auch die S-Bahnen in Hamburg (1.200 V) und Berlin (750 V). Alle anderen deutschen S-Bahnen fahren wie auch die Fernbahnen mit dem 16,7 Hertz-Wechselstrom der Deutschen Bahn. Aufgrund der niedrigen Fahrdrachtspannungen treten in unmittelbarer Nähe der Nahverkehrsstrecken nur geringe elektrische Feldstärken von weniger als 50 V/m auf. Im Fahrzeuginnenraum der Straßen- oder U-Bahnen wird das elektrische Feld nahezu vollständig abgeschirmt (Effekt des Faradayschen Käfigs).

Eine wichtige technische Anwendung von elektrischen Gleichfeldern sind **Elektro-nenröhren**, wie z. B. die Bildröhre im Fernseher (Kathodenstrahlröhre), die

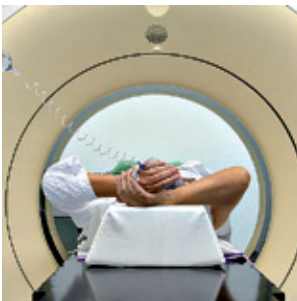
Röntgenröhre oder Verstärkeröhren, die vor der Erfindung des Transistors noch in jedem Radio verbaut waren.

Eine weitere technische Anwendung sind **Elektro-Staubabscheider**. Hier werden mittels eines starken Gleichfeldes Staubpartikel ionisiert und aus dem Luftstrom abgeschieden z. B. in Kohlekraftwerken. Es wird ein Abscheidegrad bis zu 99,9 % erreicht, was bei einem Kohlekraftwerk die Emission von bis zu 10 t Staub pro Tag verhindert. Auch in Gaststätten sind oft Luftreiniger mit elektrostatischem Filter zur Luftverbesserung installiert. Dieser filtert elektrostatisch allerfeinste Partikel wie Tabakrauch, Staub, Pollen u.s.w. aus der Raumluft.

Eine Gefährdung geht von elektrischen Gleichfeldern in der Regel nicht aus. Starke elektrische Gleichfelder setzen jedoch eine hohe Potentialdifferenz (Hochspannung) voraus. Hier besteht bei Berührung von leitenden Kontakten (z. B. Oberleitung, Bildröhre) die Gefahr eines elektrischen Schlags.

Magnetische Gleichfelder haben viele technische Anwendungen. Sie werden entweder mit Dauermagneten oder Elektromagneten erzeugt. **Dauermagnete** werden aus unterschiedlichsten Stoffen gefertigt. Industriell bedeutend sind die folgenden vier Materialgruppen:

- Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo)
- Hartferrite (Eisenoxid mit Zusätzen)
- Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)
- Samarium-Kobalt (SmCo)



Kernspintomographie,
Quelle: Shutterstock



Magnetschwebbahn,
Quelle: Transrapid International

Sie werden u. a. eingesetzt in

- Elektromotoren
- Lautsprechern
- Kopfhörern
- Spielzeug
- Kühlschranks magneten
- Drehspulinstrumenten
- Generatoren (z. B. Windkraft) und
- Magnetschwebbahnen.

Die höchsten magnetischen Flussdichten (bis zu 1,6 T) lassen sich mit NdFeB erreichen. Ein 5 cm x 5 cm großer quaderförmiger Magnet hält Kräfte von bis zu 1.000 Newton (N) (ca. 100 kg), also das Gewicht eines Menschen. Selbst die kleinen Bauformen erreichen z. B. als Kühlschranks magnet Haltekräfte von ca. 100 N.

Bei **Elektromagneten** kann das Magnetfeld im Gegensatz zu Dauermagneten ein- und ausgeschaltet werden. Sie bestehen meist aus einem Eisenkern (z. B. Eisenstab), um den eine elektrische Spule gewickelt ist. Das magnetische Feld einer Spule hängt von ihrer Bauform, dem Spulenstrom und der Wicklungszahl ab. Anwendungen finden Elektromagnete u. a. in Türverriegelungssystemen, Hubmagneten, Mülltrennung (Blechdosen) oder Magnetschwebbahnen (Transrapid). Mit Elektromagneten lassen sich Flussdichten bis zu ca. 2 T im Dauerbetrieb und ca. 6 T im Impulsbetrieb erreichen.

Supraleitende Magnete sind eine besondere Form vom Elektromagneten, die mit flüssigem Helium auf ca. -270 °C gekühlt werden müssen und mit denen extrem starke magnetische Gleichfelder bis über 20 T im Dauerbetrieb erzeugt werden können. Solche Felder sind für wissenschaftliche oder medizinische Untersuchungen z. B. im **Magnetresonanztomographen** (Kernspintomograph) notwendig. Hier wird ausgenutzt, dass Atomkerne magnetische Eigenschaften besitzen und sich im statischen Feld des starken Magneten ausrichten. Sie können dann mittels Radiowellen (UKW) detektiert werden. Der Patient ist dabei einem magnetischen Gleichfeld von ca. 3 bis 7 T ausgesetzt, das ca. 100.000-fach stärker als das Erdmagnetfeld ist. Patienten können nur sehr langsam in den Magneten gefahren werden, da es infolge der entstehenden Wirbelströme im Gehirn sonst zu Schwindel und Übelkeit kommen kann.

Eine Gefährdung geht von magnetischen Gleichfeldern in der Regel nicht aus. Träger von metallischen Implantaten wie Herzschrittmachern, Insulinpumpen, Cochlea-implantaten (Innenohrimplantat) sollten jedoch starke magnetische Gleichfelder meiden. Manche Metallfremdkörper (z. B. Eisensplitter im Auge oder Gehirn) können im starken Magnetfeld des Kernspintomographen sogar lebensgefährlich sein.



Spielzeugmagnete,
Quelle: Shutterstock



Lautsprecher,
Quelle: Shutterstock

Typische Werte der magnetischen Flussdichte in mT von magnetischen Gleichfeldern. Quelle: BfS [5]

Quellen	Magnetische Flussdichte in mT
Erdmagnetfeld in Deutschland	ca. 0,05
Straßen- oder U-Bahn (ca. 1 m Abstand von der Bahnsteigkante)	0,05 bis 0,1
Fahrgastraum einer Straßen- oder U-Bahn	~ 0,1
Sehr starker Dauermagnet	bis 1.600
Dauermagnet (z. B. für Anstecker)	~ 1
Elektromagnet	bis 2.000
Kernspintomographie (Bedienungspersonal im Umfeld der Geräte)	bis 100
Kernspintomographie (Patienten während der Untersuchung)	bis 7.000

3.2 NIEDERFREQUENTE FELDER

3.2.1 BAHNSTROM 16,7 HZ

Das elektrifizierte Netz der Deutschen Bahn AG (DB) wird aus historischen Gründen mit Wechselstrom der Frequenz 16,7 Hz (früher 16 2/3 Hz) betrieben. Gleichartige Netze gibt es in Österreich, der Schweiz, Schweden und Norwegen. In anderen europäischen Ländern wird entweder 50-Hertz-Wechselstrom oder Gleichstrom verwendet.

Das Stromsystem der DB erfordert eine eigene „Stromwelt“, die vom Kraftwerk über ein Hochspannungs-Verteilungsnetz bis zu den Umspannstationen exklusiv für diese Frequenz konzipiert ist. Das bahneigene 110-kV-Hochspannungsnetz mit einer Länge von rund 7.750 km (DB Energie GmbH, Stand 2009) verbindet Kraft-, Umformer- und Umrichtwerke mit Bahnunterwerken, in denen der 110-kV-Bahnstrom auf 15 kV heruntertransformiert wird. Vom Bahnunterwerk gelangt der Strom direkt in die 15-kV-Oberleitungen und über den Abnehmer zum Zug. Als Rückleiter dienen die Schienen (s. Abbildung unten).

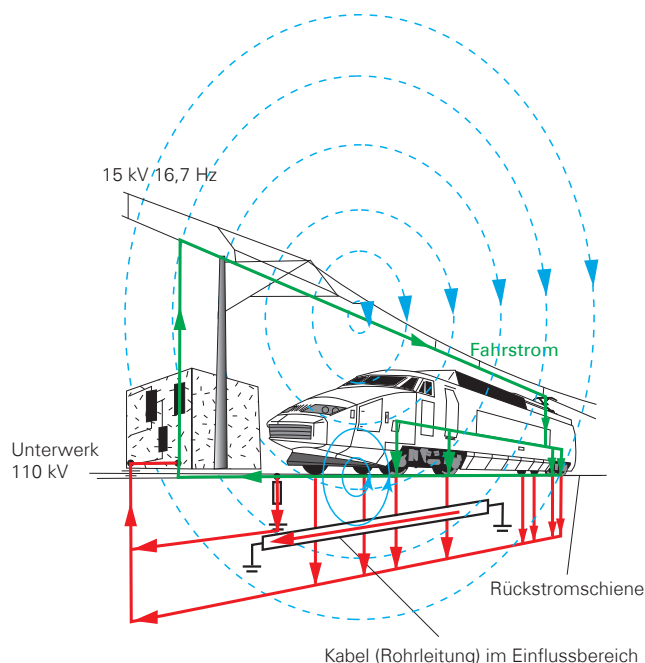
Die 15 kV-Oberleitung erzeugt ein elektrisches Wechselfeld. Die Abbildungen rechts zeigen beispielhaft gemessene Feldstärken im Bahnhofsbereich zwischen zwei Gleisen und an einem Bahnübergang [6].

Durch die Metallhülle des Zuges werden die Fahrgäste vom elektrischen Feld der Oberleitung weitgehend abgeschirmt (Effekt des Faradayschen Käfigs).

Die Stärke der Magnetfelder von Bahnstromanlagen unterliegt erheblichen tageszeitlichen Schwankungen. Wenn in einem Versorgungsabschnitt kein Zug fährt, fließt auch kein Strom und das magnetische Feld ist gleich null. Fahren dagegen mehrere Züge gleichzeitig auf einem Streckenabschnitt, ist der Stromfluss und damit auch die Stärke des entstehenden Magnetfelds größer. Bei Beschleunigungsvorgängen wird besonders viel Strom benötigt und das Magnetfeld wird stärker. Nachts, wenn der Personenverkehr abnimmt, nimmt die Magnetfeldstärke ab.

Stromkreise des Bahnstroms,

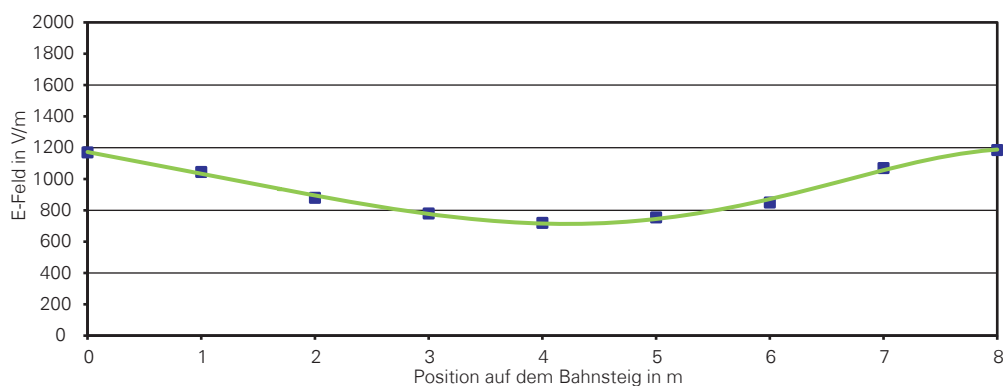
Quelle: LUBW



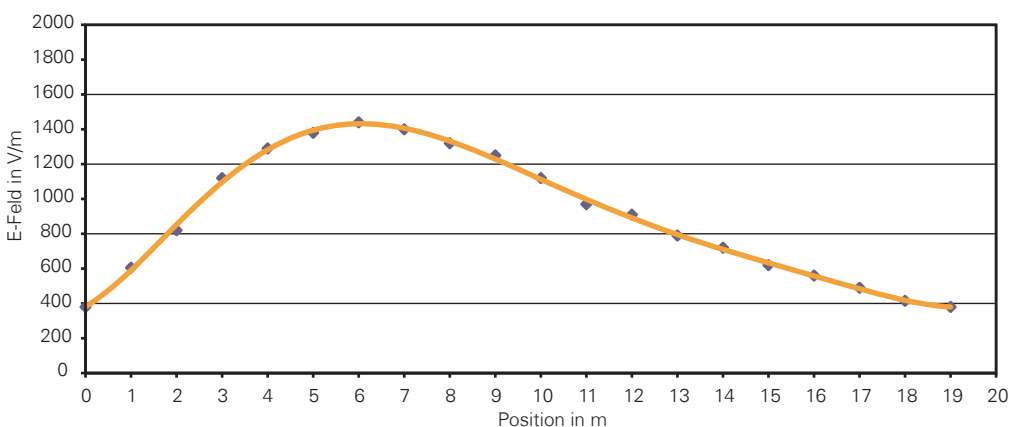
Die entgegen gerichteten magnetischen Felder des Hin- und Rückleiters kompensieren sich nur in geringem Maße, da der Abstand der beiden Leiter (Oberleitung und Schiene) anders als bei Freileitungen relativ groß ist. Dadurch nimmt die magnetische Flussdichte mit dem Abstand langsamer ab. Hinzu kommt, dass aus Sicherheitsgründen die Schienen geerdet sind, damit dort keine Spannung gegen Erde anliegen kann, die bei Berührung gefährlich werden könnte. Dadurch fließt ein Teil des Rückstroms nicht über die Bahnschienen, sondern über das Erdreich bzw. über dort verlegte Metallrohre ab (Abbildung linke Seite). Solche vagabundierenden Ströme können unter Umständen in weitem Abstand zum Gleis fließen. Dies vermindert zusätzlich die Kompensation des magnetischen Feldes. Magnetschwebbahnen (Transrapid) werden mit dreiphasigem Wechselstrom betrieben. Die Magnetfelder kompensieren sich hier sehr gut.

Da sich der Stromfluss in Bahnstromanlagen ständig ändert, können durch Messungen nur momentane Magnetfelder ermittelt werden. Um die magnetische Flussdichte von Bahnstromanlagen zuverlässig zu ermitteln, werden Feldberechnungsprogramme eingesetzt. Damit können auch „worst-case-Szenarien“ abgeschätzt und Optimierungen vorgenommen werden.

Messungen und Berechnungen ergaben, dass in unmittelbarer Nähe einer Bahntrasse kurzzeitig Maximalwerte von $100 \mu\text{T}$ auftreten können. 24-Stunden-Mittelwerte liegen zwischen 1 und $10 \mu\text{T}$ [7]. In Bayern wurden personenbezogene Messungen bei 190 direkt an Bahntrassen wohnenden Menschen vorgenommen. Der Mittelwert der 190 Messungen lag bei $0,16 \mu\text{T}$ (Median $0,10 \mu\text{T}$) [8].



Verlauf der elektrischen Feldstärke in 1 m Höhe zwischen zwei Gleisen an einem 8 m breiten Bahnsteig. Man erkennt, dass das Feld zu den Gleisen bzw. Oberleitungen hin stärker wird und in der Bahnsteigmitte am schwächsten ist.



Verlauf des elektrischen Wechselfeldes an einem Bahnübergang, quer zur Bahnstrecke. Die Fahrstromleitungen liegen bei etwa 4 m und 7 m.

Quelle: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

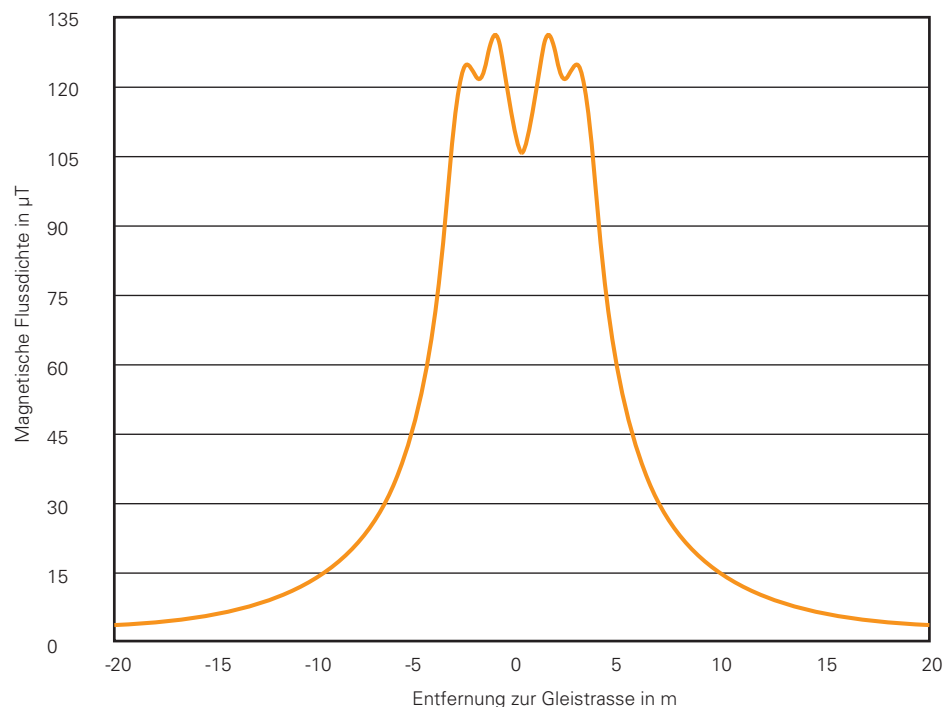
**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 16–21**

Der Verlauf der magnetischen Flussdichte an einer Bahntrasse ist in der Abbildung unten dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, dass der Maximalwert der magnetischen Flussdichte über den Schienen liegt. Im weiteren Abstand zur Trasse nimmt das Feld stark ab.

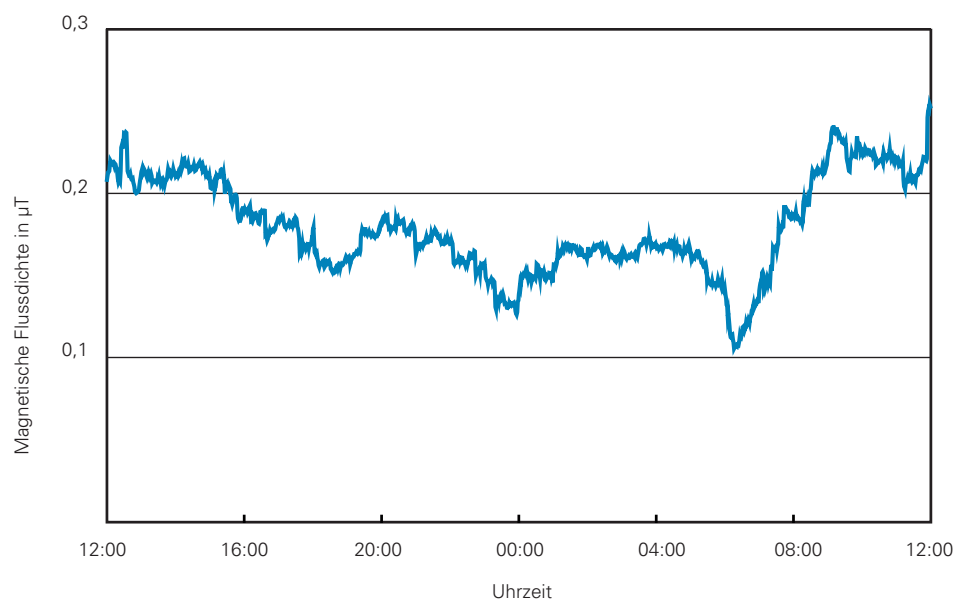
Natürlich unterliegen die Magnetfelder entlang der Eisenbahnstrecken tageszeitlichen Schwankungen. Zur Ermittlung des tageszeitlichen Verlaufs und der Abnahme

des Magnetfeldes mit der Entfernung hat die LUBW Messungen der magnetischen Flussdichte im Umfeld der mit ca. 290 Zügen pro Tag stark befahrenen Oberrheinthal-Bahnstrecke durchgeführt. Der Messpunkt lag in 30 m Abstand zu den Gleisen (s. Abbildung unten). Nach diesen Erfahrungen können im Extremfall kurzzeitige Flussdichtespitzen auftreten, die das Zehnfache der von der LUBW gemessenen Minutenmittelwerte betragen.

Verlauf der magnetischen Flussdichte quer zur Trasse einer zweigleisigen Fernbahnstrecke in 1 m Höhe über den Schienen. Die Mitte zwischen den beiden Gleisen ist die Position Null. Quelle: LUBW



Tagesgang der magnetischen Flussdichte an der Oberrheinthal-Bahnstrecke im Abstand von 30 m zu den Gleisen (Minutenmittelwerte). Quelle: LUBW



3.2.2 ÖFFENTLICHE STROMVERSORGUNG 50 HZ

Das **öffentliche Stromnetz** in Deutschland wird mit Drehstrom mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Der Drehstrom wird in den Kraftwerks-Generatoren der öffentlichen Stromversorgung erzeugt und besteht aus drei phasenverschobenen Wechselströmen. Die elektrische Leistung P ist das Produkt der Spannung U und der Stromstärke I . Sie wird in der Einheit Watt (W) gemessen.

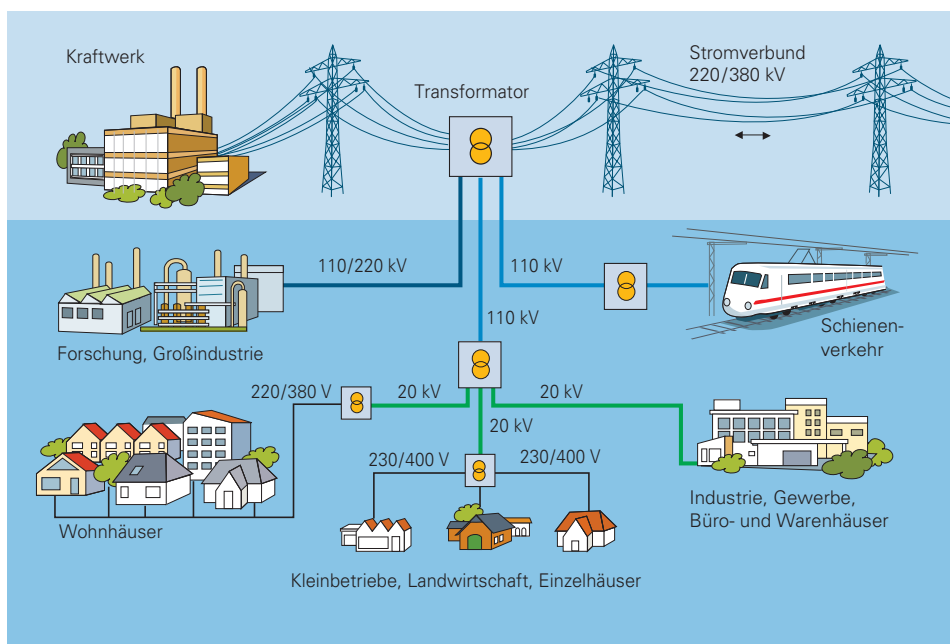
$$P = U \cdot I$$

Theoretisch könnte demnach dieselbe Menge elektrische Energie entweder mit hoher Spannung und geringer Stromstärke oder mit niedriger Spannung und hoher Stromstärke übertragen werden. In der Praxis allerdings ist das Verhältnis zwischen Spannung und Stromstärke nicht gleichgültig. Der elektrische Widerstand der Leitungen lässt sich nämlich umso verlustfreier überwinden, je geringer die Stromstärke und je höher die Spannung ist.

Deshalb werden die Generatorspannungen im Kraftwerk, die bereits bis zu 27 kV betragen, durch Transformatoren nochmals erhöht und über Hochspannungsleitungen zu den Verbrauchsschwerpunkten geführt. Ein weit verzweigtes, viele tausend Kilometer Länge umfassendes Transport- und Verteilernetz von Stromleitungen sorgt dafür, dass alle Endverbraucher mit Strom versorgt werden (siehe Abbildung unten).

Das **Höchstspannungsnetz** mit Spannungen von 220 kV und 380 kV wird zur Übertragung großer Energiemengen über große Entfernungen eingesetzt. In Deutschland sind die Höchstspannungsnetze der Elektrizitätsversorgungsunternehmen zu einem Verbundnetz zusammengeschlossen. Das deutsche Verbundnetz ist wiederum in das europäische Verbundnetz eingebunden, das dem Stromaustausch zwischen den einzelnen Staaten dient.

Das **Hochspannungsnetz** mit Spannungen von 60 kV bis 110 kV überträgt den Strom von Höchstspannungs-Umspannwerken zu den Verbrauchsschwerpunkten, z. B. der Großindustrie und des Schienenverkehrs.



Aufbau der Stromversorgung
vom Kraftwerk zum Verbraucher
Quelle: BDEW / IZE

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 16–21**

In der Praxis treten an den Freileitungen allerdings nicht die exakten Nennspannungen von 380 kV, 220 kV oder 110 kV auf. Die Betriebsspannungen liegen in der Regel etwas höher, um den Leitungsverlust auszugleichen.

Das **Mittelspannungsnetz** mit Spannungen von 1 kV bis 50 kV übernimmt die weitere Verteilung zu den Transformatorstationen der Gemeinden und der gewerblichen Großabnehmer.

Das **Niederspannungsnetz** mit Spannungen unter 1 kV bringt den Strom in Haushalte und Büros. Für das Niederspannungsnetz werden im städtischen Bereich überwiegend Erdkabel verwendet.

Die Stärke und die Verteilung der elektrischen und magnetischen Felder im Umfeld einer **Freileitung** sind von vielen Faktoren abhängig. Die wesentlichen sind

- die Spannung,
- die Stromstärke,
- die Form der Strommasten,
- die Anzahl und Anordnung der Leiterseile und
- der Durchhang der Leiterseile.

Der Durchhang der Leiterseile bestimmt bei definierter Mastform, Spannung und Stromstärke maßgeblich die am Erdboden auftretenden Feldstärken. Der Durchhang

ist abhängig von der Temperatur der Leiterseile und nimmt daher mit steigender Übertragungsleistung (Stromstärke) und der Lufttemperatur zu.

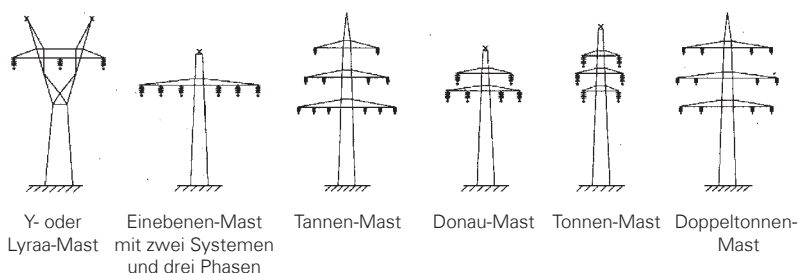
Da sich der Seildurchhang, bedingt durch Temperatur und Eisbelag, und der Stromfluss ständig ändern, kann man mit Messungen nur momentane Feldstärken von Freileitungen ermitteln. Deshalb werden Feldberechnungsprogramme wie z. B. WinField zur Ermittlung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte von Freileitungen eingesetzt. Zudem können mit einem solchen Programm „worst-case-Szenarien“ abgeschätzt und Optimierungen errechnet werden.

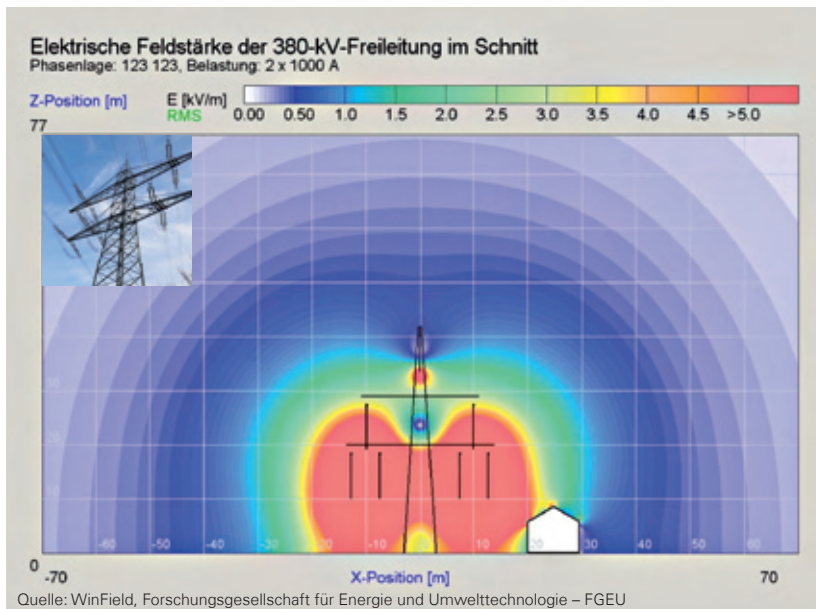
Die Abbildungen rechts zeigen beispielhaft, welche elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten unterhalb von Freileitungen auftreten können. Aus der Abbildung rechts oben ist der Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer Freileitung ersichtlich. In Bodennähe sind die höchsten elektrischen Feldstärken direkt unterhalb der Leiterseile zu erwarten. Die elektrische Feldstärke nimmt mit zunehmender Entfernung von der Freileitung rasch ab. So sind in 50 m Abstand zur Trassenmitte in Bodennähe nur noch Feldstärken von maximal 0,5 kV/m zu beobachten.

Die höchsten magnetischen Flussdichten in Bodennähe sind direkt unterhalb der Leiterseile zu erwarten. Sie nehmen mit zunehmender Entfernung von der Freileitung sehr rasch ab.

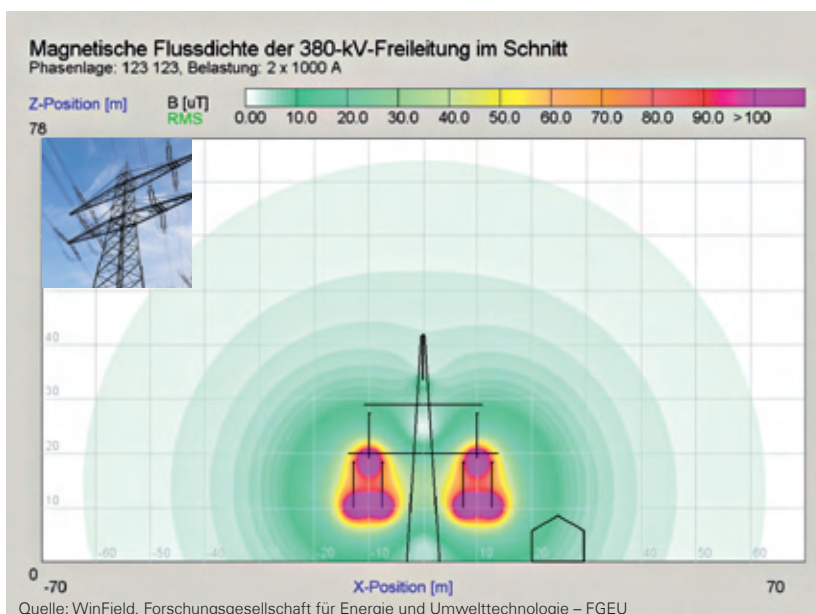
Im Gegensatz zum elektrischen Feld lässt sich das Magnetfeld nur mit großem Aufwand abschirmen. Das Magnetfeld kann aber durch eine günstige Anordnung der Leiterseile und eine so genannte Phasenoptimierung reduziert werden. Dabei macht

Beispiele für Mastformen von Freileitungen, Quelle: LUBW





Oben: Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer 380-kV-Freileitung,
Quelle: FGEU, LUBW



Unten: Verlauf der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 380-kV-Freileitung,
Quelle: FGEU, LUBW

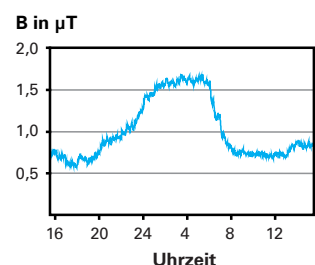
man sich den Umstand zunutze, dass in den verschiedenen Leitern zueinander zeitlich versetzte Wechselströme fließen, man spricht von Dreiphasen-Wechselstrom.

Durch eine entsprechende Optimierung dieser Phasen kann eine Reduktion des resultierenden Feldes erzielt werden. Hierfür werden ebenfalls Feldberechnungsprogramme eingesetzt.

Die magnetische Flussdichte einer Freileitung ändert sich mit dem im Tagesverlauf wechselnden Strombedarf. In Spitzenverbrauchszeiten kann die Flussdichte dreimal

höher sein als in Zeiten geringen Strombedarfs.

Die Abbildung rechts zeigt als Beispiel die real gemessenen Schwankungen der magnetischen Flussdichte einer 380 kV-Freileitung (Mastform Donau) über einen Zeitraum von 24 Stunden. Der Messort befand sich in 50 m Abstand zur Freileitung in der Mitte zwischen zwei Masten, am Ort des größten Seildurchhangs. Die Messhöhe betrug 3 m. Die festgestellten hohen nächtlichen Werte sind offensichtlich auf großräumige Stromverteilungen durch die Energieversorger zurückzuführen.



Zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte B in μT an einer 380 kV-Freileitung (50 m Abstand, 3 m Höhe).
Messung: LUBW

Der großräumige Stromtransport erfolgt hauptsächlich über Freileitungen, die lokale Verteilung dagegen meist über Kabel, die in der Erde verlegt werden. In **Erdkabeln** ist das elektrische Feld durch eine geerdete metallische Kabelumhüllung und durch das leitende Erdreich praktisch völlig abgeschirmt. Das magnetische Feld dagegen lässt sich kaum abschirmen.

In der Regel werden Erdkabel bis zu 110 kV in kompakten Dreierbündeln verlegt. Auf jedem der drei Leiter wird je eine Phase des Drehstroms geführt. Die Phasen dieser Wechselströme sind zeitlich um je eine Drittel-Periode (120°) gegeneinander verschoben. Wenn die einzelnen Phasen gleichmäßig belastet werden, heben sich die Magnetfelder um die drei Leiter weitgehend auf, da bei gleichen Stromstärken Magnetfelder gleicher Stärke entstehen. In der Praxis entsteht trotzdem ein magnetisches Restfeld, da die Phasen oft unterschiedlich belastet sind und die Leiterabstände variieren können.

Erdkabel bis 110 kV werden etwa in 1 m Tiefe verlegt. Bei Erdkabeln mit Spannungen über 110 kV ist aus Gründen der Wärmeabfuhr ein größerer Abstand der Leiter zueinander erforderlich. Dadurch entsteht ein stärkeres magnetisches Feld. Aus diesem Grund betragen bei diesen Kabeln die Verlegungstiefen 2 bis 3 m.

Bei Freileitungen, wo die Luft als Isolation zwischen den Leitersträngen dient, sind zur Vermeidung von Stromüberschlägen bestimmte Mindestabstände notwendig. Bei Erdkabelleitungen kann man die Stromführenden Leiter näher zusammenlegen, da hoch wirksames Isolatormaterial eingesetzt wird.

Erdkabelleitungen erzeugen bei gleicher Stromstärke deutlich schwächere magnetische Felder als Freileitungen. Unmittelbar oberhalb einer Kabeltrasse kann das Feld jedoch ähnlich groß werden wie unter einer Freileitung, es nimmt aber mit dem Abstand rascher ab als bei Freileitungen.

Die Stärke des magnetischen Feldes im Umfeld von Erdkabeln wird bestimmt durch

- die Stromstärke,
- den Leiterquerschnitt,
- die Anordnung der Leiter zueinander und
- die Verlegungstiefe.

Im Hochspannungsbereich werden auch so genannte **gasisolierte Übertragungsleitungen (GIL)** verwendet. Es handelt sich dabei um koaxiale Aluminiumrohrleiter, bei denen der Innenleiter auf Hochspannung liegt und das Mantelrohr geerdet ist. Ein GIL-System ähnelt einer Pipeline mit Innenleiter (siehe Abbildung links). Als Isoliergas dient Schwefelhexafluorid (SF_6) im Gemisch mit Stickstoff (N_2). Gasisolierte Leitungen sind sowohl für Tunnelverlegung als auch für direkte Erdverlegung geeignet.

Eine der ersten gasisolierten Leitungen gab es 1976 beim Schluchseekraftwerk im Schwarzwald. Während die gasisolierten Rohrleiter früher lediglich bei Sonderprojekten zum Einsatz kamen, finden sie heute eine breitere Anwendung. Die gasisolierten Leitungen erzeugen im Vergleich mit Freileitungen und Erdkabeln nur sehr geringe Magnetfelder und keinerlei elektrische Felder in ihrer Umgebung. Da sie eine deutlich höhere Be- und Überlastbarkeit aufweisen, können sie einfacher mit Freileitungsabschnitten kombiniert werden als

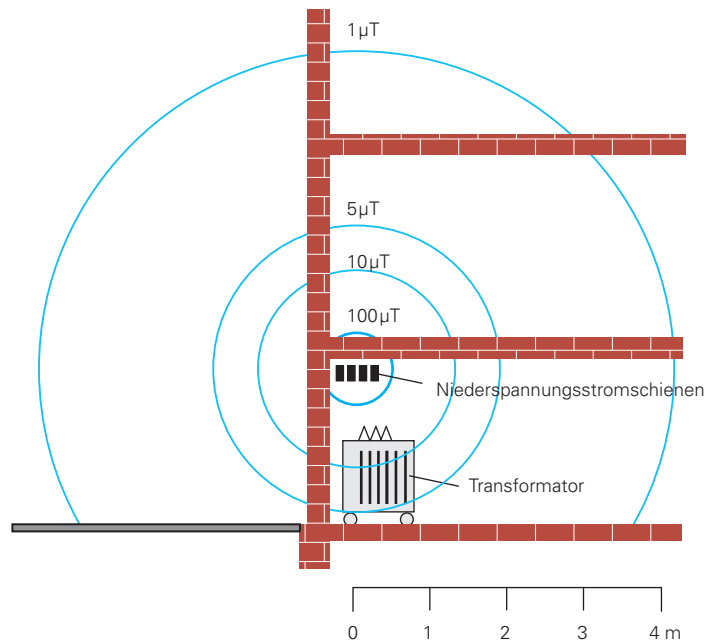


Gasisolierte Rohrleitung: Querschnitt durch ein GIL-Rohr der zweiten Generation. Der Stromführende Leiter befindet sich in der Mitte, außen das Mantelrohr mit einem Stützenpaar.

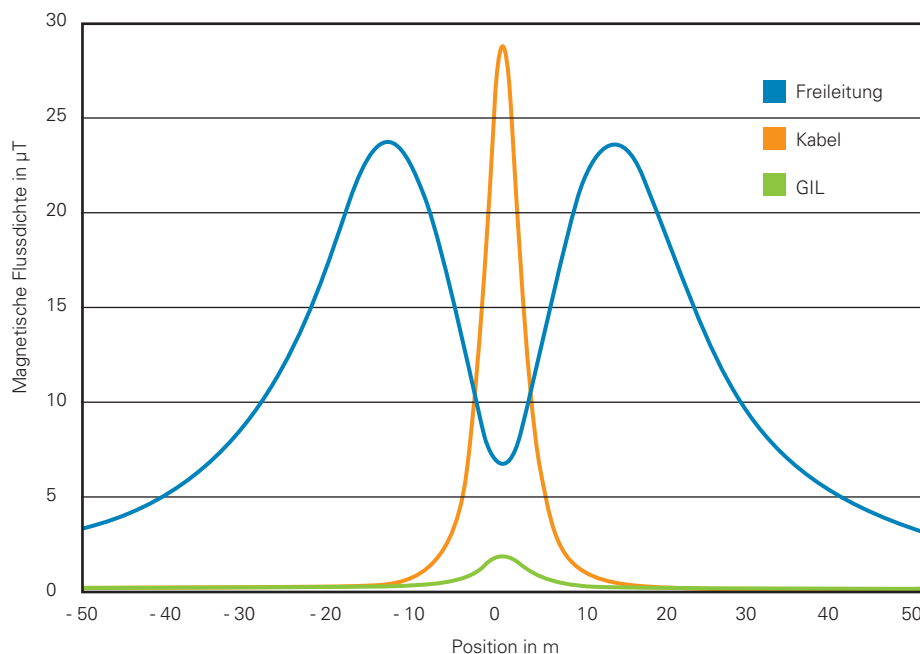
Quelle: Siemens

Erdkabel [9]. GIL weisen geringe Übertragungsverluste auf; sie sind auch im Fehlerfall absolut dicht und brennen nicht. Gas-isolierte Rohrleiter sind wie Kabel deutlich teurer als Freileitungen und finden ihre Anwendung hauptsächlich in der Spannungsebene 380 kV im Leistungsbereich über 1.000 MW.

Auch in Netzstationen, in denen mit Transformatoren die Versorgungsspannung erhöht oder erniedrigt wird, entstehen elektrische und magnetische Felder. Im Innenraum der Netzstation ist die Feldstärke hoch. Durch die Einhausung wird das elektrische Feld nach außen hin fast vollständig abgeschirmt und ist selbst im Nahbereich der Station vernachlässigbar klein. Stärkere Magnetfelder treten an der Außenwand nur direkt im Bereich der Niederspannungsableitung auf (siehe Abbildung oben rechts).



Magnetfelder im Nahbereich einer Netzstation. Das Mauerwerk schwächt das Magnetfeld nicht.
Quelle: LUBW



Magnetische Induktion senkrecht zur Trassenachse in Höhe des Erdbodens bei einer Übertragungsleistung von 2x 1.000 MW und einer Betriebsspannung von 400 kV. Vergleich der auftretenden magnetischen Felder bei unterschiedlichen Stromübertragungssystemen im Hochleistungsbereich. Quelle: Siemens

3.2.3 FELDER IM HAUSHALT

In den meisten Wohnungen stammen die elektromagnetischen Felder nicht von externen Emissionsquellen. Die größte Belastung geht vielmehr von Elektrogeräten und elektrischen Hausinstallationen (Verteilungs- und Sicherungskästen, Stromleitungen, Steckdosen) aus. Es handelt sich dabei um niederfrequente elektrische und magnetische Wechselfelder.

Die elektrische Versorgung der Haushalte erfolgt standardmäßig mit Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hertz (USA: 60 Hertz). Der dreiphasige Wechselstrom (Drehstrom) aus dem Niederspannungsnetz endet normalerweise beim Hausanschluss. Innerhalb des Hauses wird für die Versorgung schwacher Verbraucher (Lampen, Kleingeräte usw.) nur jeweils eine der drei Phasen an die Steckdosen geführt. Größere Verbraucher (Kochherde, elektrische Heizung usw.) werden dagegen mit allen drei Phasen des Drehstroms versorgt.

Die elektrischen Hausinstallationen bestehen aus Kabeln, bei denen die Hin- und Rückleiter dicht nebeneinander geführt werden. Da sich die entgegengesetzt gerichteten Felder der beiden Leiter überlagern, kommt es zu einer weitgehenden Kompensation der Felder. Die elektrische und magnetische Feldstärke in der Umgebung solcher Stromleitungen nimmt daher mit der Entfernung viel stärker ab als bei einzelnen stromdurchflossenen Leitern.

Bei einer Untersuchung von fast 2000 Personen im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit wurde im Zeitraum von Mai 1996 bis Juni 1997 die Magnetfeldexposition im Haushalt und bei der Arbeit ermittelt [8]. Dabei wur-

de ein 24-Stunden-Mittelwert für alle untersuchten Personen von $0,10 \mu\text{T}$ (Median $0,05 \mu\text{T}$) festgestellt. Die Messungen wurden mittels am Körper tragbaren Personendosimetern durchgeführt (Tabelle rechts oben).

Aus der Studie ergab sich, dass die nächtliche Exposition auffällig höher war, wenn sich das Messgerät in unmittelbarer Nähe eines Radioweckers befand. Aber auch in solchen Fällen wurde ein relativ geringer Medianwert von nur $0,146 \mu\text{T}$ erreicht (nicht in der Tabelle aufgeführt). Für Großstädter ergaben sich geringfügig höhere Mittelwerte ($0,12 \mu\text{T}$) als für Bewohner ländlicher Gebiete (unter $0,10 \mu\text{T}$). Bei Menschen, die in der Umgebung von Hochspannungsleitungen wohnen, machte sich dies kaum bemerkbar – bei ihnen wurde eine mittlere Exposition von $0,11 \mu\text{T}$ gemessen.

In der Tabelle rechts unten sind einige typische Werte für elektrische Feldstärken von Haushaltsgeräten und Hausinstallationen aufgeführt. Die Messergebnisse hängen jedoch stark von den örtlichen Verhältnissen und vom jeweiligen Gerätetyp ab.

Magnetfelder können im Haushalt durch den Gebrauch verschiedener Geräte entstehen. Besonders emissionsreich sind

- Geräte zur Wärmeerzeugung mit hohem Stromverbrauch (Herd, Elektroheizung, Bügeleisen),
- Geräte mit Trafo oder Magnetspulen (Radiowecker, Halogenlampen, Fernseher, Stereoanlage) sowie
- Geräte mit einem elektrischen Motor (Staubsauger, Bohrmaschine, Mixer, Fön).

Gerade bei einem kontinuierlichen Betrieb sollte auf genügenden Abstand zu Daueraufenthaltssorten geachtet werden.

Die Felder nehmen jedoch mit der Entfernung sehr schnell ab. In der Tabelle auf Seite 21 ist die Stärke des magnetischen Feldes

bei verschiedenen Abständen von einigen Haushaltsgeräten aufgeführt. Allerdings können die Emissionen der Geräte je nach Hersteller z. T. erheblich schwanken. Angaben zu Mikrowellengeräten finden sich im Abschnitt 4.10.1 Mikrowellenherde.

Tipps!

Magnetfeldexposition in Bayern (24 Stunden-Mittelwerte)

	Personen	Magnetische Flussdichte in μT	
		Mittelwert	Median
24 h-Exposition	1.952	0,101	0,047
Exposition im Haus	1.941	0,090	0,063
Exposition in der Nacht	1.926	0,095	0,092
Großstadt, 24 h	370	0,115	0,061
ländlich, 24 h	432	0,077	0,035
24 h Daten: im Büro Tätige	624	0,107	0,049
Handwerker / Arbeiter	148	0,166	0,049
nicht Erwerbstätige	922	0,093	0,046
direkte Nähe zu 16 2/3 Hz Oberleitungen (Bahn)	190	0,156	0,102

Elektrische Feldstärken in V/m von Haushaltsgeräten und Hausinstallation im Abstand von 1 cm (Heizdecke) und 30 cm (alle anderen Objekte). Quellen: BfS, BAG, LUBW

Gerät	Elektrische Feldstärke in V/m
Heizdecke	500
Bügeleisen	120
Kaffeemaschine	60
Kühlschrank	120
Haarfön	80
Staubsauger	50
Toaster	80
Glühbirne	< 80
Steckdose	< 1
Netzkabel der Hausinstallation	< 0,1

Energiesparlampen benötigen, wie der Name schon sagt, deutlich weniger elektrische Energie als herkömmliche Glühlampen. Der Einspareffekt beträgt ca. 70 % bis 80 %. Zudem haben sie je nach Qualitätsstufe eine doppelt bis zehnfach längere Lebensdauer. Im Gegensatz zu Glühlampen entfalten Energiesparlampen erst nach einigen Minuten Aufheizphase ihre volle Helligkeit.

Bei den meisten von ihnen wirkt das Licht naturfremd, da einige wenige Farbanteile überbetont werden und andere gar nicht vorkommen (Linienpektrum). Dies führt zu schlechter Farbwiedergabe und kann auch für die Augen anstrengend sein. Es gibt mittlerweile Vollspektrum-Energiesparlampen mit verbesserter Farbwiedergabe, erkennbar an der ersten Ziffer der Lichtfarbe: 9 statt üblicherweise 8. Die zweite und dritte Ziffer stehen für die Farbtemperatur: Je größer die Zahl, desto kälter das Licht. 827 steht für ein warmes, 865 für ein kaltes Weiß.



Strahlungsarme Energiesparlampe, eine Alternative besonders für Schreibtisch- und Nachttischlampen. Bild: MEGAMAN, Quelle: IDV

In jüngerer Zeit sind Befürchtungen wegen der von Energiesparlampen ausgehenden elektromagnetischen Felder geäußert worden. Da Energiesparlampen ebenso wie Glühlampen aus dem öffentlichen Stromnetz mit Energie versorgt werden, treten beim Betrieb beider Lampenarten magnetische und elektrische Felder mit einer Frequenz von 50 Hz auf. Allerdings besitzen Energiesparlampen ein elektronisches Vorschaltgerät, das die Netzspannung zur Erhöhung der Lichtausbeute in eine interne Betriebsspannung mit einer Frequenz von 25 bis 70 kHz umwandelt. Deshalb treten

bei Energiesparlampen auch Felder in diesem Frequenzbereich auf. Messungen des Bayerischen Landesamts für Umwelt und des Bundesamts für Strahlenschutz an 37 verschiedenen Energiesparlampen haben ergeben, dass die derzeit gültigen internationalen Grenzwerte (WHO, ICNIRP) eingehalten werden. Allerdings ist die Ausschöpfung der Referenz- bzw. Grenzwerte um ein Vielfaches höher als bei der Glühlampe. Dies bestätigen auch Simulationsrechnungen. Abschirmmaßnahmen durch geerdete Lampenschirme sowie technische Maßnahmen an den Lampen könnten die elektrischen Felder deutlich vermindern. Das würde jedoch u. a. voraussetzen, dass Leuchten durchgängig mit Schutzleiteranschluss und metallischen Schirmen ausgestattet sind. Körpernahe Lampenanordnungen ohne geerdeten Schirm (Schreibtisch, Leselampe) sind hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Felder als nicht optimal anzusehen, da die Werte unter bestimmten Bedingungen bis zu 70 % der zulässigen internationalen Grenzwerte erreichen.

Eine Alternative besonders für Nachttisch- oder Schreibtischlampen sind strahlungsarme Energiesparlampen (siehe Abbildung links), die eine spezielle Beschichtung des Glaskolbens und besondere elektronische Komponenten besitzen. Ihr elektrisches Feld ist im Vergleich zu einer normalen Energiesparlampe gleicher Leistung um ca. 90 % kleiner. Ausführliche Informationen hierzu bietet das Bundesamt für Strahlenschutz [10].

Induktionskochherde eignen sich für die schnelle und energiesparende Zubereitung von Speisen. Deshalb sind sie schon seit längerem in Großküchen und Kantinen im Einsatz. Zunehmend werden sie auch in privaten Haushalten verwendet.

Bei Induktionskochherden wird die zum Kochen benötigte Wärmeenergie durch mittelfrequente Magnetfelder (20 bis 100 kHz) erzeugt. Diese Magnetfelder dringen in die Metallböden von Kochtöpfen und Pfannen ein und verursachen dort elektrische Wirbelströme, die die Töpfe und deren Inhalt erwärmen. Ein Teil der Magnetfelder dringt dabei nach außen. Die gemessenen Werte in der direkten Umgebung des Induktionskochherdes sind dabei recht hoch.

Untersuchungen des schweizerischen Bundesamtes für Gesundheit (BAG) [11] zeigen zwar, dass der von der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) empfohlene Grenzwert von $6,25 \mu\text{T}$ beim Betrieb einer Kochzone mit einer geeigneten, genügend großen und zentriert platzierten Pfanne in einem Abstand von 30 cm von allen untersuchten Geräten eingehalten wird. Unterhalb eines Abstandes von 30 cm, der beim alltäglichen Gebrauch nicht immer gegeben ist, können durchaus auch stärkere Felder vorkommen. Aus Vorsorgegründen sollte daher der Aufenthalt von Schwangeren und Kindern im Arbeitsbereich auf das nötigste beschränkt werden. Der Mindestabstand von 20 bis 30 cm lässt sich leicht erreichen, wenn beim Kochen die hinteren Kochstellen bevorzugt werden.

Auch Träger von elektronischen Implantaten sollten Induktionskochherden nicht

zu nahe kommen. Es gibt Hinweise, dass magnetische Streufelder von Induktionskochherden auf kurze Distanz elektronische Implantate beeinflussen können. Im Fall von unipolaren Herzschrittmachern liegen konkrete Hinweise auf Gefährdung vor. Dabei sind auch die Ableitströme zu berücksichtigen. Personen mit unipolaren Herzschrittmachern wird daher geraten, Pfannen nicht längere Zeit zu berühren und keine metallischen Kochlöffel zu verwenden. Alle Träger von elektronischen Implantaten sollten die Sicherheitshinweise der Hersteller beachten und mit ihrem behandelnden Arzt / ihrer Ärztin die Verwendung von Induktionskochherden besprechen. Bei korrektem Verhalten ist die Wahrscheinlichkeit einer Störung des Implantats jedoch sehr klein [11].

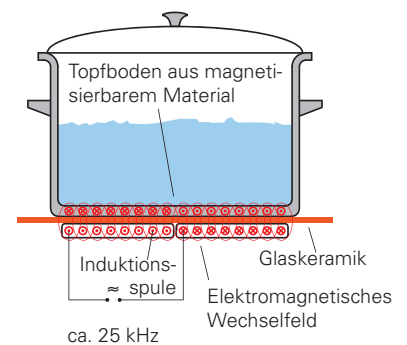
Magnetfelder können durch eine sachgemäße Verwendung des Induktionskochherds verringert werden. Folgende konkrete Empfehlungen helfen dabei:

- Nur Töpfe verwenden, die vom Hersteller als „geeignet für Induktion“ gekennzeichnet sind.
- Keine zu kleinen Töpfe oder Pfannen benutzen. Die Kochzone sollte vollständig mit einem entsprechend großen Topf bedeckt sein.
- Topf oder Pfanne immer in die Mitte der Kochzone platzieren, ein Verrutschen entsprechend korrigieren.
- Keine defekten Pfannen mit unebenen Böden verwenden, auch wenn sie noch problemlos erhitzt werden können.
- Keine Metalllöffel verwenden, da dadurch Ströme in den Körper abgeleitet werden.



Induktionsherd,

Quelle: Shutterstock



Funktionsweise eines Induktionsherdes (schematisch)

Quelle: LUBW

Tipps!

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 16–21**

Tipps!

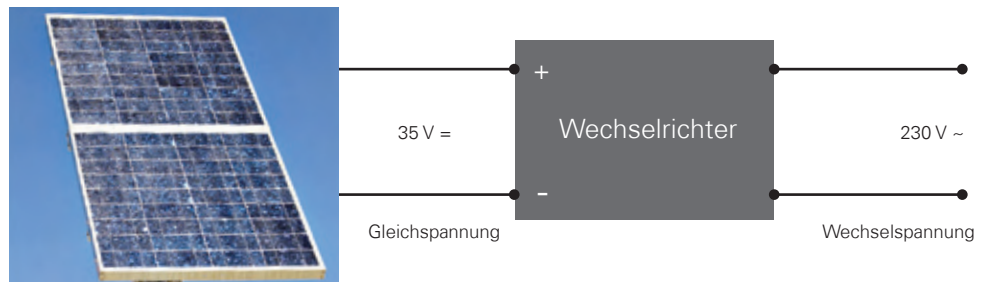
Photovoltaikanlagen nutzen die Lichtenergie der Sonne zur Stromproduktion. Elektromagnetische Felder treten nur bei solchen Anlagen auf. Solarthermische Anlagen dagegen speichern die Wärmeenergie der Sonnenstrahlung und nutzen sie zur Wassererwärmung.

Die Solarmodule von Photovoltaikanlagen produzieren zunächst reinen Gleichstrom. Die dabei auftretenden elektrischen und magnetischen Gleichfelder sind unproblematisch. Das elektrische Feld ist in wenigen Zentimetern kaum noch nachweisbar, das magnetische Feld nimmt im Abstand von 30 bis 50 cm Werte an, die dem natürlichen Erdmagnetfeld entsprechen.

Die erzeugte Gleichspannung wird durch Wechselrichter in die erforderliche 50 Hz-Wechselspannung umgewandelt (siehe Abbildung unten). Dadurch entstehen Wechselfelder, die neben den 50 Hz-Anteilen auch elektronisch bedingte höherfrequente Anteile im kHz-Bereich enthalten. Art und Intensitäten der Wechselfelder hängen stark von den verwendeten Bauteilen und der übrigen Konstruktion der Anlage ab.

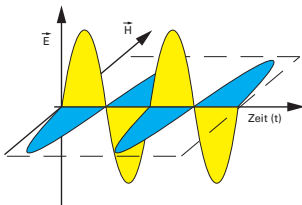
Durch einen durchdachten Aufbau der Anlage können die Immissionen stark minimiert werden. Beispielsweise sollte der Wechselrichter nicht in unmittelbarer Nähe von Daueraufenthaltsbereichen liegen. Es ist daher sinnvoll, Hersteller und Lieferanten frühzeitig darauf anzusprechen.

Prinzip einer Photovoltaikanlage,
Quelle: Shutterstock



4. Hochfrequente Felder

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 22–31**



Elektromagnetische Wellen im
Fernfeld, Quelle: LUBW

4.1 GRUNDLAGEN UND MESSGRÖSSEN

Während niederfrequente Wechselfelder meist unerwünschte Nebeneffekte bei der Übertragung und Nutzung elektrischer Energie sind, werden hochfrequente elektromagnetische Felder in der Regel absichtlich erzeugt. Im Niederfrequenzbereich können elektrische und magnetische Felder getrennt betrachtet werden, man spricht von „entkoppelten“ Feldanteilen oder vom Nahfeld der Quelle. Im Gegensatz dazu sind im Hochfrequenzbereich elektrisches und magnetisches Feld eng miteinander verknüpft bzw. „gekoppelt“; man spricht vom Fernfeld der Quelle bzw. von **elektromagnetischen Wellen**, die sich mit Lichtgeschwindigkeit (ca. 300.000 km/s in Vakuum/Luft) ausbreiten. Fernfeldbedingungen sind gegeben, wenn der Abstand von der Quelle groß im Vergleich zur Wellenlänge ist. Bei Mobiltelefonen ist dies in der Regel bereits in 1 m Entfernung der Fall. Bei nie-

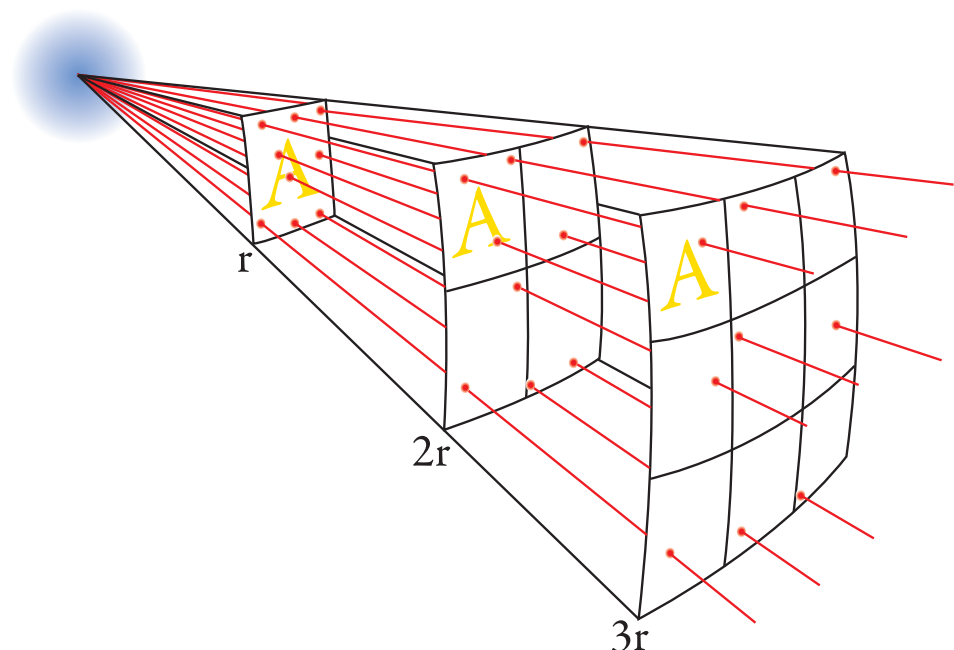
derfrequenten Quellen wie Freileitungen beginnt das Fernfeld erst in mehreren zehntausend Kilometern Abstand.

Elektromagnetische Wellen transportieren Energie, die sich aus den Energieanteilen des elektrischen und des magnetischen Feldes zusammensetzt. Das Maß für die Stärke einer elektromagnetischen Welle ist die **Leistungsflussdichte S**. Sie ist definiert als Leistung pro Fläche. Das bedeutet, sie gibt die durch eine Fläche A fließende Leistung an, die durch ein elektromagnetisches Wellenfeld transportiert wird (siehe Abbildung links). Die Leistungsflussdichte wird in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) gemessen und ist das Produkt aus der **elektrischen Feldstärke E** und der **magnetischen Feldstärke H**. Für den Betrag von S gilt:

$$S = E \cdot H$$

Die Leistungsflussdichte nimmt
mit dem Abstand quadratisch ab
(schematische Darstellung).

Quelle: Wikipedia



Im Fernfeld einer Quelle (z. B. einer Antenne) stehen die Leistungsflussdichte und die beiden Feldstärken in einem festen Verhältnis zueinander. Dort reicht es aus, eine der drei Größen zu kennen:

$$E = Z_0 \cdot H \rightarrow S = \frac{E^2}{Z_0}$$

Dabei bezeichnet Z_0 den Freiraumwellenwiderstand, das sind circa 377 Ohm.

ABNAHME DER FELDGRÖSSEN

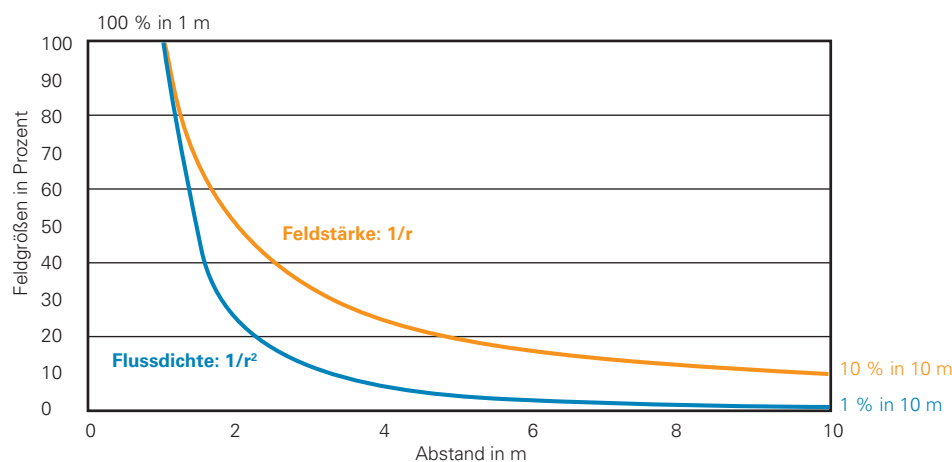
Die Leistungsflussdichte nimmt quadratisch mit der Entfernung ab, dies ist in der linken Abbildung schematisch dargestellt. Die Punktquelle steht dabei für eine Lampe oder eine Mobilfunkantenne. Jeder rote Strahl steht symbolisch für einen bestimmten Leistungsfluss (z. B. 1 W). Die Menge der durch eine Fläche A hindurchtretenden Strahlen ist ein Maß für die Leistungsflussdichte. Im Abstand r ist die Leistungsflussdichte neunmal so hoch (9 Strahlen) wie im Abstand $3 \cdot r$ (1 Strahl).

Die Gesamtzahl aller Strahlen ist der Leistungsfluss der Quelle.

Bei zunehmendem Abstand von der Quelle nimmt die Leistungsflussdichte unter idealen Bedingungen umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ab ($1/r^2$ -Gesetz): Bei Verzehnfachung des Abstandes (1 m $\rightarrow$ 10 m) reduziert sich die Flussdichte auf ein Hundertstel (100 % $\rightarrow$ 1 %) des Ausgangswertes. Dies ist in der Abbildung unten dargestellt.

Die elektrische und die magnetische Feldstärke nehmen unter idealen Bedingungen umgekehrt proportional mit dem Abstand ab ($1/r$ -Gesetz), das heißt bei Verzehnfachung des Abstandes (1 m $\rightarrow$ 10 m) reduziert sich die Feldstärke auf ein Zehntel (100 % $\rightarrow$ 10 %) des Ausgangswertes.

Unter realen Ausbreitungsverhältnissen nehmen elektromagnetische Felder und die Leistungsflussdichte mit der Entfernung meist noch stärker ab. Dabei spielen Topographie, Bewuchs, Bebauung und Witterungsbedingungen eine maßgebliche Rolle.



Abnahme der Feldgrößen eines elektromagnetischen Wellenfeldes mit der Entfernung zur Quelle (z. B. Glühlampe, Mobilfunkantenne), Quelle: LUBW

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 22–31**



Abblendlicht beim Auto,

Quelle: BMW

Die Leistung einer Sendeantenne wird nicht gleichmäßig in alle Richtungen (isotrop) abgegeben, sondern **gebündelt abgestrahlt**. Das funktioniert wie bei einem Scheinwerfer, bei dem durch die Bündelung das Licht in Hauptstrahlrichtung viel heller ist, als bei einer Lampe ohne Reflektor. Dafür strahlt er in die meisten Richtungen kein Licht ab (Abbildungen unten).

Ein isotroper Mobilfunksender würde 50 % der Sendeleistung in den Himmel abstrahlen und 48 % auf den Boden in der unmittelbaren Umgebung des Senders. Damit würden etwa 98 % der Sendeleistung verloren gehen. Mobilfunkantennen werden deshalb so gebaut, dass sie die Strahlungsleistung fächerförmig in einer Ebene parallel zum Erdboden bündeln, ähnlich dem Abblendlicht beim Auto. Der Hauptstrahl ist dabei meist um einige Grad nach unten geneigt, so dass er je nach Montagehöhe der Antenne in ca. 150 bis 250 m Entfernung vom Sender den Boden trifft. In Hauptstrahlrichtung strahlt eine Mobilfunkantenne typischerweise 30-fach stärker

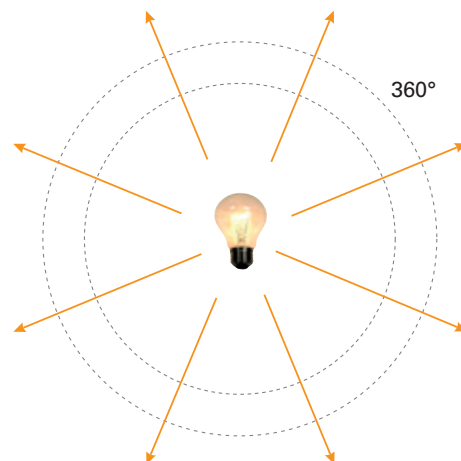
als es eine isotrope Antenne gleicher Leistung tun würde. Hier spricht man vom **Antennengewinnfaktor $G = 30$** .

Die **Strahlungsleistung** von Antennen wird auf einen isotropen Strahler bezogen, man spricht dann von **EIRP** (Equivalent Isotropically Radiated Power, äquivalente isotrope Strahlungsleistung). Die EIRP ist eine fiktive Größe, die angibt, mit welcher Sendeleistung man eine in alle Raumrichtungen gleichmäßig abstrahlende Antenne (Kugelstrahler) versorgen müsste, um im Fernfeld dieselbe Leistungsflussdichte zu erreichen, wie mit einer bündelnden Antenne in Hauptstrahlrichtung (Richtantenne).

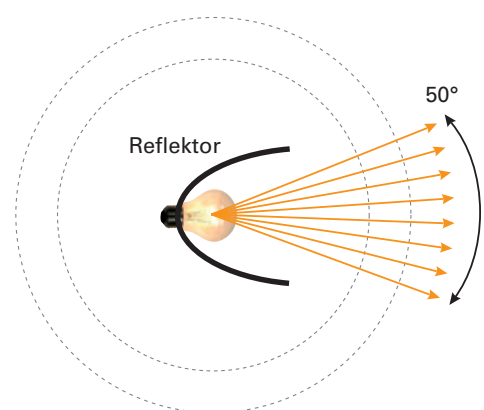
Alternativ kann die Strahlungsleistung auf eine Stabantenne (Lambda-Halbe-Dipol) bezogen werden, man spricht vom ERP-Wert (Equivalent Radiated Power), der um den Faktor 1,64 kleiner ist als der EIRP-Wert. Durch die Verwendung von bündelnden Antennen lassen sich der Energieverbrauch deutlich und die Immissionen besonders im Nahbereich senken.

Gleichmäßige und gebündelte
Abstrahlung, dargestellt am Bei-
spiel einer Glühbirne,

Quelle: LfU



Gleichmäßige (isotrope) Abstrahlung



Gebündelte Abstrahlung (Scheinwerfer)

4.2 ZULASSUNG UND ÜBERWACHUNG VON FUNKSENDEANLAGEN

In Deutschland müssen die Betreiber ortsfester Funksendeanlagen mit einer Strahlungsleistung von 10 W (EIRP) oder mehr vor der Inbetriebnahme bei der Bundesnetzagentur (BNetzA) eine **Standortbescheinigung** beantragen. Darin sind Leistungsbeschränkungen und Abstrahlwinkel mit den sich daraus ergebenden Sicherheitsabständen zu allgemein zugänglichen Bereichen verbindlich festgelegt.

Bei der Festlegung der Sicherheitsabstände werden auch die am Standort durch umliegende Funksendeanlagen bereits vorhandenen elektromagnetischen Felder berücksichtigt. Außerhalb der Sicherheitsabstände sind die Grenzwerte der 26. BImSchV (siehe

Kapitel „Grenzwerte“) selbst bei Volllast aller installierten Sendeantennen eingehalten.

In Baden-Württemberg wurde für 10.229 Standorte von ortsfesten Funksendeanlagen eine Standortbescheinigung erteilt, in Bayern waren es 12.608 Standorte. Davon waren 8.377 Standorte in Baden-Württemberg und 10.685 Standorte in Bayern, an denen sich mindestens eine Mobilfunksendeanlage befand (Stand 31.12.2009) [12].

Die Einhaltung der Grenzwerte wird seit mehr als 10 Jahren stichpunktartig durch die Bundesnetzagentur überprüft. Diese fortlaufend durchgeführten Messungen sind im Internet frei verfügbar und kostenlos einsehbar [13].

Funksendeanlagen mit Frequenzbereich und Strahlungsleistung. Die Tabelle gibt einen Überblick für ausgewählte Funksendeanlagen. „Sendeleistung“ steht hier für die Leistung am Senderausgang.

Anlage	Frequenz (MHz)	Sendeleistung (Watt)
Rundfunksender (Langwelle)	0,15 bis 0,28	bis 2.000.000
Rundfunksender (Mittelwelle)	0,53 bis 1,61	bis 1.000.000
Rundfunksender (Kurzwelle)	3,90 bis 26,1	bis 500.000
Amateurfunkdienst	Alle Frequenzbereiche	1 bis 750
Rundfunksender (Ultraschall)	87,5 bis 108	10.000 bzw. 160.000 (EIRP)
BOS-Digitalfunk (TETRA) (z. B. Polizei, Feuerwehr)	380 bis 400	20 (je Kanal)
Betriebsfunk	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 35 und 470	< 12
Digital Radio (VHF III)	174 bis 230	1.000 bzw. 16.000 (EIRP)
Digitales Fernsehen (DVB-T)	470 bis 790	10.000 bzw. 160.000 (EIRP)
Mobilfunk-Basisstation (GSM-900)	921 bis 960	10 bis 50 (je Kanal)
Mobilfunk-Basisstation (GSM-1800)	1.805 bis 1.880	10 bis 40 (je Kanal)
Mobilfunk-Basisstation (UMTS-2100)	2.110 bis 2.170	10 bis 20 (je Kanal)
Mobilfunk-Basisstation (LTE-800)	791 bis 821	2 x 20 (MIMO)
Mobilfunk-Basisstation (LTE-2600)	2620 bis 2690	
Funk-DSL Basisstation (WLAN 5 GHz)	5.470 bis 5.725	1 (EIRP)
Richtfunk	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 6.000 und 38.000	0,01 bis 1
Radar (Luftüberwachung und Militär)	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 1.000 und 12.000	bis 2.000.000 (Impulsleistung)
Fernsehsatellit	10.700 bis 12.750	150 bzw. 200.000 (EIRP)

4.3 MOBILFUNK

4.3.1 DER MOBILFUNK-BOOM

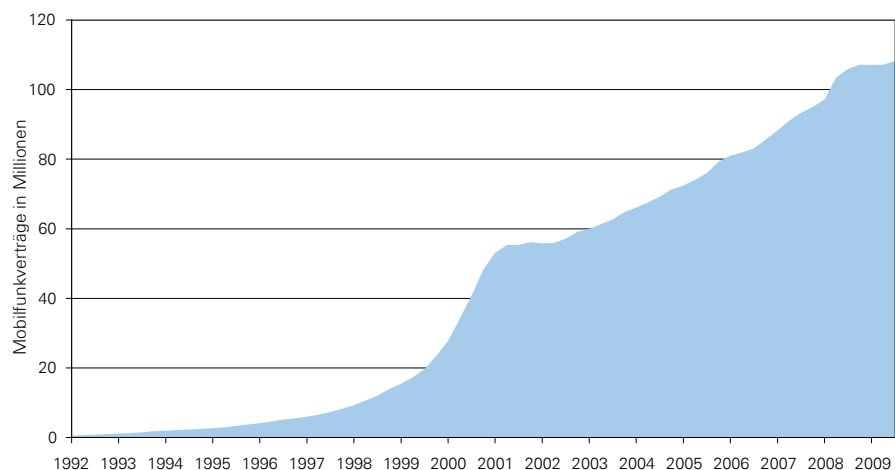
Die Anfänge des analogen Mobilfunks in Deutschland mit dem A-Netz gehen auf das Jahr 1958 zurück. Es folgten 1972 das B-Netz und 1984 das C-Netz. Mit der Einführung des digitalen D-Netzes (GSM-900) im Jahr 1992 und des digitalen E-Netzes (GSM-1800) im Jahr 1994 wurde die Grundlage für den weltweiten Mobilfunkboom gelegt, der bis heute anhält und mittlerweile viele Milliarden Menschen umfasst.

Heutige Mobilfunktelefone arbeiten überwiegend nach dem GSM-Standard (Global System for Mobile Communications), der neben einer guten Übertragungsqualität auch Datenanwendungen ermöglicht. Seit 2001 wird in Deutschland das UMTS-Netz ausgebaut, das mittlerweile in weiten Flächen verfügbar ist. Mit UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) und HSPA (High Speed Packet Access, seit 2006) ist mobiles Internet-Surfen mit hoher Geschwindigkeit möglich. Bereits heute können Daten mittels UMTS mit bis zu 14,4 MBit/s übertragen werden. In den neuen LTE-Netzen (Long Term Evolution) werden Übertragungsgeschwindigkeiten bis zu 100 MBit/s möglich sein.

Insgesamt betreuen die vier deutschen Netzbetreiber heute über 110 Millionen Mobilfunkverträge. 75 % der Deutschen nutzen mindestens ein Mobilfunk-Endgerät. Weltweit liegt die Zahl der aktiven Mobilfunkverträge mittlerweile bei über 5 Milliarden (Stand: Juli 2010). Besonders bemerkenswert ist die Steigerung des Datenübertragungsvolumens im Mobilfunk um jährlich ca. 300 % seit 2005. Experten schätzen, dass die mobile Datenmenge noch einige Jahre in diesem Tempo weiterwachsen wird. Dies bedeutet etwa eine Verhundertfachung des Übertragungsvolumens bis 2015. Die Mobilfunk-Netzbetreiber stellen sich dieser Herausforderung und bauen ihre Netze weiter aus. Technologien wie EDGE, UMTS und jetzt auch LTE kommen dabei zum Einsatz. Im Mai 2010 haben die Netzbetreiber für diesen Zweck zusätzlich rund 360 MHz Bandbreite aus den Bereichen 800 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz ersteigert.

In Folge des ständig steigenden Angebots und der starken Nachfrage nach Mobilfunkdiensten nehmen auch die Immissionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder zu. Im Dezember 2009 gab es in Deutschland 68.243 Standorte mit Mobilfunksendern [12], an denen ca. 540.000 Sendeantennen installiert sind.

*Mobilfunkverträge in
Deutschland, Stand Oktober
2009. Ein Nutzer kann
mehrere Verträge haben.
Daten: Bundesnetzagentur,
Quelle: LfU.*



4.3.2 NETZSTRUKTUR

Bei Rundfunk und Fernsehen kann aufgrund der hohen Sendeleistungen in der Regel mit einem Sendeturm ein sehr großes Gebiet von über 100 km Umkreis versorgt werden. Im Gegensatz dazu benötigt Mobilfunk aus Gründen der Übertragungskapazität und der geringen Handysendeleistung ein sogenanntes „zellulares Netz“ mit einer Vielzahl kleinräumiger, nahtlos aneinander grenzender „Funkzellen“.

Verantwortlich für die Versorgung einer Funkzelle ist die Basisstation. Jede Mobilfunkbasisstation kann einen Umkreis von einigen hundert Metern bis zu mehreren Kilometern abdecken. Der maximal zulässige Funkzelleradius bei GSM beträgt 35 km, an den Küsten bis zu 70 km. Hier wird das Funksignal zur Reichweitensteigerung leicht verändert, da nur wenige Benutzer in einem großen Gebiet versorgt werden müssen. Die meisten Mobilfunkzellen sind jedoch nicht reichweitenbegrenzt, sondern kapazitätsbegrenzt. Jede Basisstation kann nur eine bestimmte Anzahl von Gesprächen (ca. 20 bis 90) gleichzeitig übertragen. Bei Datenverbindungen sinkt die Zahl der gleichzeitigen Nutzer auf 2 bis 20 (14,4 MBit/s, zwei Nutzer entsprechen 7,2 MBit/s). Die Größe einer Funkzelle ergibt sich daher meist aus

der Teilnehmerdichte. Innerstädtisch sind die Sendemasten deshalb in Abständen von wenigen hundert Metern aufgestellt.

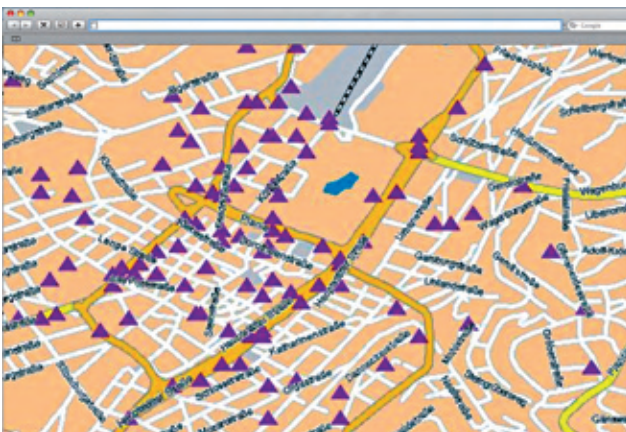
Eine neue Entwicklung sind Femtozellen – häusliche Basisstationen, die wie WLAN-Router einen Zellradius von wenigen Metern haben und so auf kleinstem Raum hohe Kapazitäten zur Verfügung stellen können. Diese Klein- und Kleinstsender arbeiten mit sehr niedrigen Sendeleistungen von 1 W und weniger.

Auf der Internetseite der Bundesnetzagentur [13] sind alle genehmigungspflichtigen Sender mit mehr als 10 W (EIRP) verzeichnet. Als Beispiel für eine Großstadt ist in der Abbildung links unten die Stuttgarter Innenstadt dargestellt. Hier wird offensichtlich deutlich mehr mobil telefoniert als in einer Kleinstadt. Stellvertretend dafür wurde Sigmaringen mit ca. 16.500 Einwohnern ausgewählt (siehe Abbildung rechts unten). In den Kartenausschnitten stehen die lila Dreiecke für Standorte von Sendeanlagen. An den grünen Punkten fand in der Vergangenheit eine Messung der Bundesnetzagentur statt. Man kann in den Karten anhand der Senderdichte indirekt ablesen, wie viel an einem Ort typischerweise mobil telefoniert wird.

Standorte genehmigungspflichtiger Mobilfunkbasisstationen in Stuttgart und Sigmaringen. Quelle: Bundesnetzagentur, EMF-Datenbank [13]

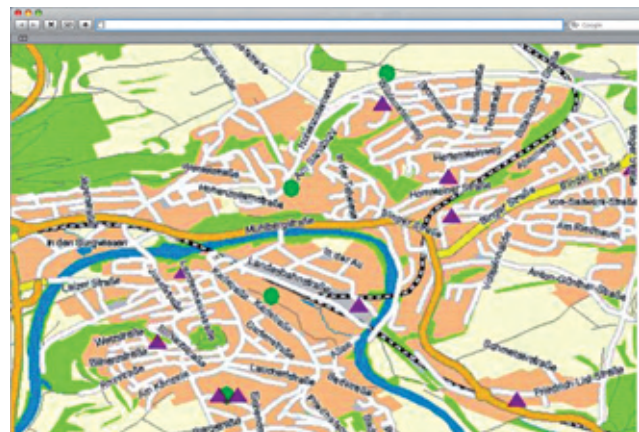
▲ An diesem Standort befindet sich ein genehmigungspflichtiger Sender.

● An diesem Standort fand in der Vergangenheit eine Messung der Bundesnetzagentur statt.



Ausschnitt Stuttgart Zentrum (hohe Senderdichte)

Bildbreite entspricht ca. 2,3 km



Ausschnitt Sigmaringen (geringere Senderdichte)

Bildbreite entspricht ca. 2,6 km



Hochleistungs-Basisstation mit 6 Sektorenantennen, die sowohl im LTE- als auch im UMTS- und/oder im GSM-Modus mit bis zu 6 GSM-Kanälen pro Sektor betrieben werden kann. Die Elektronik kann bei dieser Anlage zusammen mit den Antennen am Mast befestigt werden.

Quelle: Nokia Siemens Networks

4.3.3 IMMISSIONEN EINER MOBILFUNKANLAGE

Die Leistungsflussdichte in der Umgebung der Sendeantenne hängt von mehreren Parametern ab:

- Sendeleistung P in Watt (W)
- Strahlbündelung der Antenne (Antennengewinn G , EIRP)
- Abstand zur Antenne (r)
- Montagehöhe und Hauptstrahlrichtung der Antenne
- Hindernisse zwischen Antenne und Betrachtungsort
- Tageszeit
- Wetterbedingungen

Die Senderausgangsleistung von Basisstationen liegt bei GSM-900 pro Kanal und Sektor zwischen 10 W und 50 W. Für GSM-1800 und UMTS-2100 beträgt sie je Kanal und Sektor maximal 40 W. Bei LTE werden typischerweise 2×20 W verwendet. Der Bereich möglicher Sendeleistungen von Basisstationen ist groß: Von 0,5 W(EIRP) einer Mikrozelle bis über 10.000 W(EIRP) z. B. an einem Autobahnstandort ist alles möglich. UMTS- und LTE-Basisstationen kommen systembedingt mit einer ca. 50 % bis 90 % geringeren Sendeleistung als GSM-Basisstationen aus. Für eine flächendeckende Versorgung mit schnellem Internet sind allerdings auch deutlich mehr Basisstationen als für mobiles Telefonieren erforderlich. Für eine schnelle Datenverbindung (> 3.6 MBit/s) sollte man sich bei UMTS-2100 nur wenige hundert Meter von der Station entfernt befinden. Demgegenüber kann bei LTE-800 die Entfernung mehrere Kilometer betragen. Deswegen soll in den nächsten Jahren das mobile

Internet in der Fläche bevorzugt mit diesem System ausgebaut werden. UMTS-2100 und LTE-2600 werden in dicht besiedelten Gebieten auf kleinem Raum hohe Übertragungskapazitäten zur Verfügung stellen können.

Hindernisse zwischen Basisstation und Handy, wie Gebäude oder Berge, schwächen die elektromagnetischen Felder stark ab (siehe Abschnitt 4.3.7). Dicke Stahlbetonwände oder Wärmeschutzfenster dämpfen die von außen kommenden Immissionen teilweise um mehr als den Faktor 1.000 in der Leistungsflussdichte, siehe auch [14].

Die Sendeleistung einer Mobilfunkstation verändert sich mit der Auslastung. Bei GSM-Anlagen ist die Schwankung im Tagesverlauf meist relativ klein. Der Steuerkanal (BCCH) eines jeden Sektors sendet immer (24 h) auf voller Leistung, während die leistungsgeregelten Gesprächskanäle (TCH) nur bei Bedarf zugeschaltet werden. Dies führt tagsüber typischerweise zu einer 10 % bis 60 % höheren Sendeleistung als in den Nachtstunden. GSM-Funkzellen decken den Bedarf an mobiler Kommunikation mit 2 bis 6 Kanälen ab. Dabei steigt die durchschnittliche tägliche Auslastung nicht im gleichen Verhältnis wie die Zahl der Kanäle. LTE-Funkzellen arbeiten mit 1 bis 2, UMTS-Funkzellen mit 1 bis 3 Kanälen. Die Signalisierungssignale, die immer mit voller Leistung gesendet werden, liegen hier bei ca. 20 % der maximal möglichen Leistung. Für die Zulassung einer Sendeanlage gilt, dass stets die theoretisch maximal mögliche Sendeleistung den Sicherheitsabstand bestimmt.

4.3.4 BAUFORMEN VON MOBILFUNK-ANTENNEN

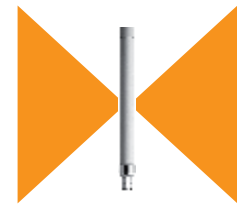
Beim Mobilfunk kommen unterschiedliche Bauformen der Sendeantennen zur Anwendung. Es handelt sich dabei um Rundstrahlantennen (Omniantennen) oder Sektorantennen (Panelantennen), welche je nach gewünschter Reichweite schwach bis sehr stark bündelnd mit Antennengewinnfaktoren G zwischen 1,6 und ca. 130 arbeiten.

Rundstrahlantennen strahlen parallel zum Erdboden kreisförmig in alle Richtungen (omnidirektional) ab und bündeln nur vertikal. Sie sind sehr dünn und optisch unauffällig. Die Antennenkonstruktion ist sehr preiswert, bietet aber nur eine geringe Übertragungskapazität von 20 bis 30 Telefonaten gleichzeitig.

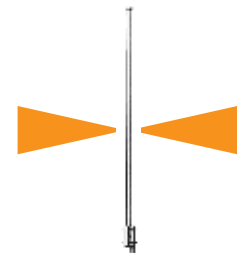
Sektorantennen bündeln den Strahl wie ein Scheinwerfer horizontal und vertikal.

Sie werden meist zu dritt an einem Mast befestigt und versorgen jeweils einen Kreissektor von 120° (siehe Abbildung Seite 80 unten). Die Übertragungskapazität kann so bei gleicher Sendeleistung auf 60 bis 90 Gespräche verdreifacht werden. Sektorantennen können zudem gezielt in eine bestimmte Richtung ausgerichtet werden.

Die oft vorgetragene Befürchtung, dass große Antennen stärker strahlen oder gefährlicher sind als kleine, ist unbegründet. Im Gegenteil: Die starke vertikale Bündelung hat zur Folge, dass das bodennahe Umfeld unterhalb der Antenne bzw. die Räume eines Gebäudes, auf dem die Antenne steht, wesentlich geringere Immissionen durch hochfrequente elektromagnetische Wellen erfahren, als man dies von der Entfernung her erwarten würde. Deutlich wird dies in den Computersimulationen auf den folgenden Seiten.



78°
21 cm
 $G = 1,6$



11°
30 cm
 $G = 10$

Rundstrahlantennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung,

Quelle: LfU



Mobilfunkmast mit Antenne verschiedener Betreiber. Im Bild unten rechts: eine Richtantenne zur Anbindung an die übergeordnete Netzeinheit.

Quelle: LUBW



27°
70 cm
 $G = 18$



15°
130 cm
 $G = 32$



$7,5^\circ$
260 cm
 $G = 56$

Sektorantennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung,

Quelle: LfU

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 22–31**

4.3.5 ABSTRAHLUNG EINER ANTENNE

Mit Hilfe einer **Computersimulation** kann das Abstrahlverhalten einer Mobilfunkantenne dargestellt werden. Als Beispiel soll eine Sektorantenne vom Typ 742151 dienen. Sie ist 1,3 m lang, hat einen vertikalen Öffnungswinkel von 14° und den Antennengewinnfaktor $G = 28$. Sie wird in der Simulation mit 40 W gespeist und strahlt mit $28 \times 40 \text{ W} = 1.120 \text{ W}$ (EIRP) in Hauptstrahlrichtung, dabei ist sie um 2° nach unten geneigt. Die Sendefrequenz beträgt 950 MHz (GSM-900). Die Antenne ist in 30 m Höhe montiert.

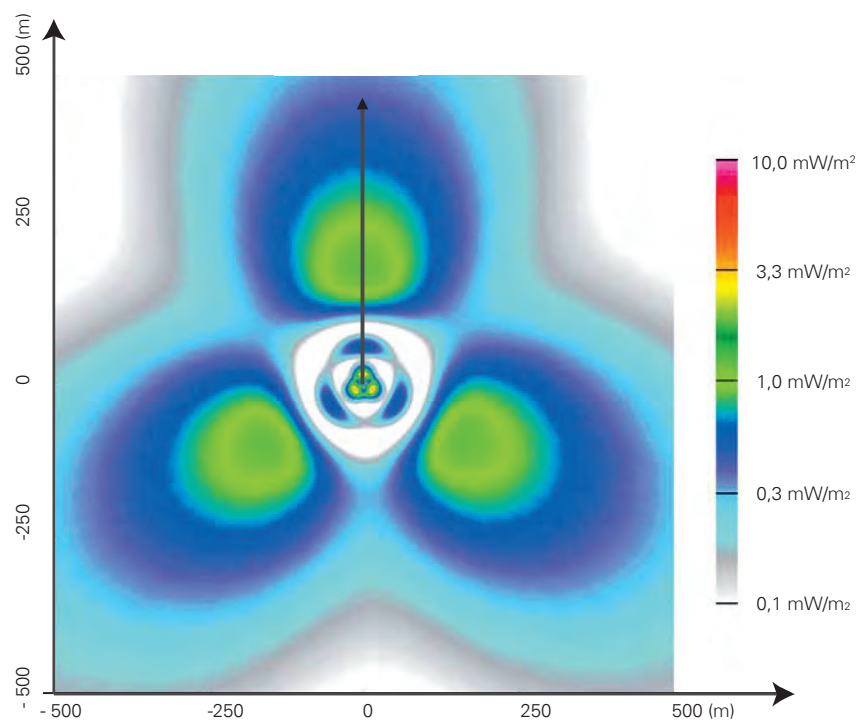
In der Abbildung auf Seite 81 ist deutlich der Hauptstrahl zu sehen, der in einer Entfernung von 150 bis 200 m den Boden trifft. Neben dem Hauptstrahl treten in bestimmten Winkeln so genannte Neben-

strahlen auf. Diese sind deutlich schwächer als der Hauptstrahl und treffen viel früher, nach etwa 20 und 60 m, auf den Erdboden. Die Leistungsflussdichte am jeweiligen Standort hängt also entscheidend davon ab, ob dieser in Haupt- oder Nebenstrahlrichtung der Antenne liegt.

In der Abbildung unten ist die Simulation einer Mobilfunkantenne mit drei Sektorantennen dargestellt, die um jeweils 120° versetzt an einem Mast montiert sind. Es wurden bis auf die Antennenzahl und die Perspektive dieselben Parameter und Farben wie in der Abbildung auf Seite 81 unten verwendet. Man blickt von oben auf die Umgebung der Antenne.

Die Farben symbolisieren die Leistungsflussdichte in 1 m Höhe über dem Erdboden. Die Farbe Weiß steht für Flussdichten

Horizontale Bündelung einer
Mobilfunkantenne mit drei
Sektorantennen, Quelle: LfU



kleiner als $0,1 \text{ mW/m}^2$, rosa steht für Flussdichten größer als 10 mW/m^2 .

Da der Hauptstrahl erst in ca. 170 m Entfernung von der Antenne den Boden trifft, treten dort Flussdichten auf, die kleiner als 2 mW/m^2 sind (hier dunkelgrün). Der Pfeil in der Abbildung links bezeichnet die Schnittebene der Abbildung unten. Die Farben für die Simulation sind willkürlich und bedeuten nicht, dass grüne Bereiche ungefährlich und rote Bereiche gefährlich sind.

Für die Aufstellung der Antennen werden vorrangig höher gelegene Masten oder höhere Gebäude gesucht, damit die einzelnen Basisstationen möglichst abschattungsfrei ihr Versorgungsgebiet abdecken können.

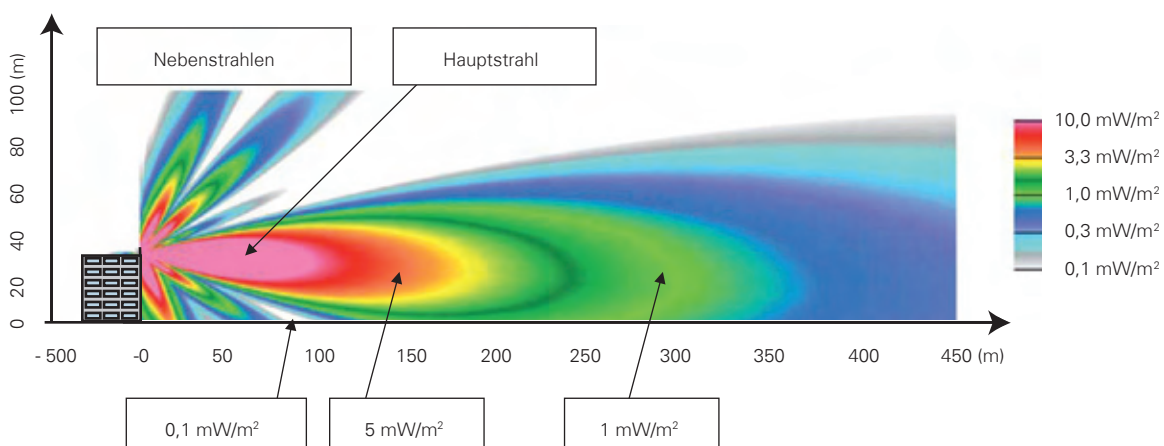
Im nächsten Abschnitt ist näher beschrieben, wie die Leistungsflussdichten in der Abbildung unten berechnet werden. Am einfachsten ist diese Berechnung für die Hauptstrahlrichtung. Dort kann die Leistung EIRP verwendet werden, also das Produkt von Speiseleistung und Antennengewinnfaktor G . Für die beiden Grafiken wurde eine Sendeleistung von 1.120 W (EIRP) verwendet.



Antennenkonstellation einer typischen Mobilfunkbasisstation mit drei Sektorantennen.

Quelle: LfU

Laut Tabelle auf Seite 82 wird für 1.000 W (EIRP) in 282 m Abstand eine Leistungsflussdichte von 1 mW/m^2 in Hauptstrahlrichtung erreicht. Für 1.120 W (EIRP) beträgt dieser Abstand ca. 300 m (siehe Abbildung unten). Außerhalb der Hauptstrahlrichtung benötigt man das genaue Antennendiagramm der verwendeten Antenne, in dem die Antennengewinnfaktoren für die unterschiedlichen Raumwinkel verzeichnet sind.



Vertikale Bündelung einer Sektorantenne, Quelle: LfU

4.3.6 BERECHNUNG DER LEISTUNGS- FLUSSDICHTEN

Die in Hauptstrahlrichtung einer Antenne und ohne Dämpfung durch Gebäude maximal erreichbaren **Leistungsflussdichten** sind in der Tabelle unten dargestellt. Die sieben Zeilen stehen für beispielhafte Sendeleistungen zwischen 10 W und 10.000 W (EIRP), die fünf Spalten für Leistungsflussdichten zwischen 10 W/m² und 1 mW/m². Die Leistungsflussdichten der Spalten zwei bis vier entsprechen den in Deutschland gültigen Grenzwerten für UMTS-2100 (10 W/m²), GSM-1800 (9 W/m²) und GSM-900 (4,5 W/m²) nach der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV), siehe Kapitel 6.

Für die Berechnung der Tabelle wurde das quadratische Abstandsgesetz

$$S = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

verwendet. Dabei bedeuten S die Leistungsflussdichte in W/m², P die Sendeleistung in W (EIRP) und r der Abstand von der Antenne in m.

Betrachtet man einen Punkt außerhalb des Hauptstrahls oder wird der Hauptstrahl durch Gebäude gedämpft, so sind die Werte sehr viel niedriger. Dies gilt ebenso in Gebäuden und an Orten ohne direkten Sichtkontakt zu einem Mobilfunkmast; dort werden Leistungsflussdichten von 1 mW/m² selten erreicht. In Wohnungen liegen typische Werte zwischen 0,001 mW/m² (das entspricht 1 µW/m²) und 1 mW/m².

Abstände von der Antenne in Hauptstrahlrichtung, in denen bestimmte Leistungsflussdichten erreicht werden, für Sendeleistungen zwischen 10 W und 10.000 W (EIRP). Die Spalten zwei bis vier gelten für die Grenzwerte der gängigen Mobilfunkdienste (Frequenzbänder 900 MHz, 1,8 GHz und 2 GHz).

Leistungsflussdichten in W/m ² bzw. mW/m ² für den berechneten Abstand					
Sendeleistung in Hauptstrahlrichtung in W (EIRP)	10 W/m ² Grenzwert für UMTS-2100	9 W/m ² Grenzwert für GSM-1800	4,5 W/m ² Grenzwert für GSM-900	100 mW/m ²	1 mW/m ²
10 W	0,3 m	0,3 m	0,4 m	2,8 m	28,2 m
30 W	0,5 m	0,5 m	0,7 m	4,9 m	48,9 m
100 W	0,9 m	0,9 m	1,3 m	8,9 m	89,2 m
300 W	1,5 m	1,6 m	2,3 m	15,5 m	154,5 m
1.000 W	2,8 m	3,0 m	4,2 m	28,2 m	282,1 m
3.000 W	4,9 m	5,2 m	7,3 m	48,9 m	488,6 m
10.000 W	8,9 m	9,4 m	13,3 m	89,2 m	892,1 m
30.000 W	15,5 m	16,3 m	23,0 m	154,5 m	1545,1 m

4.3.7 MESSUNGEN AN MOBILFUNK-SENDESTATIONEN

Das Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) Kamp-Lintfort hat die bayrischen FEE-Messdaten der Jahre 2001 bis 2008 ausgewertet. FEE ist ein bayerisches Förderprogramm zur Erfassung elektromagnetischer Felder, bei dem Städte und Gemeinden gezielt die Umgebung von Mobilfunkbasisstationen von Sachverständigen untersuchen lassen können [15].

An 1.386 Messpunkten im Diagramm (dunkelblau) bestand freie Sicht auf mindestens eine Mobilfunkbasisstation. An 413 Messpunkten (hellblau) bestand keine freie Sicht zu einer Mobilfunkbasisstation. Wie in der Abbildung unten zu sehen ist, wird der in Deutschland gültige Grenzwert meist nur zu einem sehr geringen Teil ausgeschöpft. Nur jeder dreißigste Messpunkt weist eine elektrische Feldstärke von über 10 % des Grenzwertes (GW-E) und damit eine Leistungsdichte über 1 % des Grenzwertes (GW-P) auf. Die Werte des Abstandsgesetzes werden weit unterschritten, da Messpunkte in unmittelbarer Nähe der Basisstation fast immer außerhalb des Hauptstrahls liegen. An Messpunkten ohne Sicht auf eine Mobilfunkbasisstation (hellblau) sind die Immissionen deutlich niedriger als an Messpunkten mit Sicht (dunkelblau).

Zur Verwendung der Bezeichnungen GW-E und GW-P: 10 % GW-E bzw. 1 % GW-P bedeutet:

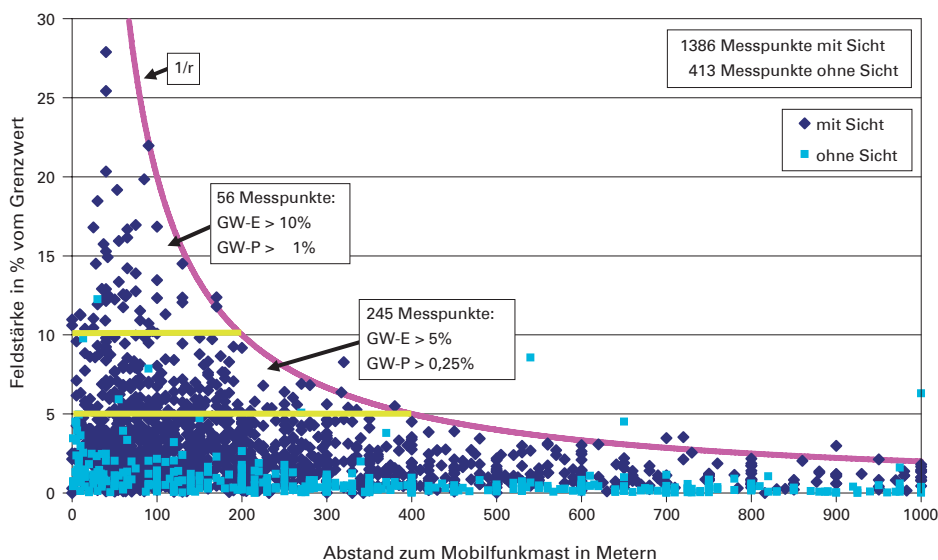
■ 6,1 V/m bzw. 100 mW/m² bei UMTS-2100

■ 5,8 V/m bzw. 90 mW/m² bei GSM-1800

■ 4,1 V/m bzw. 45 mW/m² bei GSM-900.

In der Schweiz sind Werte in vergleichbarer Größenordnung als Vorsorgewerte gesetzlich vorgeschrieben. Sie werden als Anlagegrenzwerte bezeichnet. An Orten mit empfindlicher Nutzung wie Wohnungen, Schulen, Krankenhäusern und Büros dürfen diese bei maximaler Anlagenauslastung nicht überschritten werden. Obwohl es diese Vorsorgewerte in Deutschland nicht gibt, werden sie auch hier in Wohnungen selten überschritten.

An der Häufung der Punkte in der linken unteren Ecke des Diagramms kann man erkennen, dass die meisten Messpunkte weniger als 200 m vom Fußpunkt des jeweiligen Mobilfunkmastes entfernt lagen und trotzdem meist nur ein GW-E unter 5 % gemessen wurde. Die ausführliche Studie „Wissenschaft(f)t Vertrauen“, die auf 24 Seiten die Ergebnisse der Auswertung zusammenfasst, ist beim Informationszentrum Mobilfunk IZMF [16] und beim Bayerischen Landesamt für Umwelt kostenlos erhältlich.



Abhängigkeit der Feldstärke vom Abstand zum Mobilfunkmast auf der Basis von 1.799 Messpunkten mit und ohne Sichtkontakt zum Sender. Die rote Kurve zeigt die Grenzwertausschöpfung einer Sendeantenne mit 20 m Sicherheitsabstand in Hauptstrahlrichtung. Sie wurde nach dem 1/r-Gesetz berechnet, mit ihr kann das elektrische Feld gut nach oben abgeschätzt werden.
Quelle: LfU

4.3.8 IMMISSIONEN EINES HANDYS

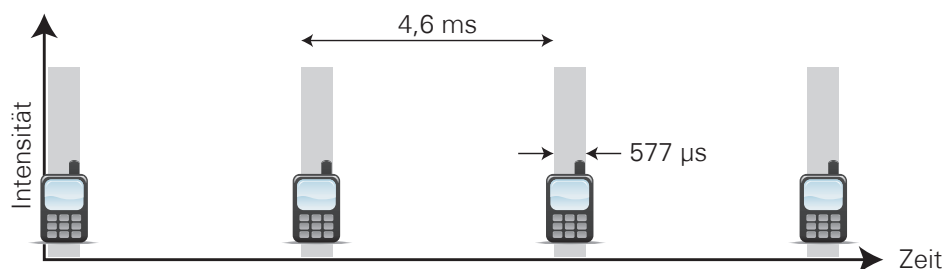
Im Ruhezustand befinden sich Handys in einem reinen Empfangsmodus und senden (fast) nicht. Ein Handy, das örtlich nicht nennenswert bewegt wird (also in der gleichen Funkzelle bleibt), hat zur Anwesenheitskontrolle alle 1 bis 12 Stunden einen kurzen Funkkontakt mit der Basisstation, der etwa 1 Sek. lang dauert (periodic location update). Er ist bisweilen hörbar, wenn das Handy in der Nähe eines Lautsprechers liegt. Würde ein in Bereitschaft befindliches Handy permanent senden, wäre der Akku nach sehr kurzer Zeit leer. Wenn ein Handy über größere Strecken bewegt wird (z. B. im Auto), sendet es automatisch ein kurzes Signal, wenn es die Funkzelle wechselt und dadurch eine neue Basisstation für die Kommunikationsverbindung zuständig wird.

Ein Handy befindet sich nur bei Telefongesprächen und Datenverbindungen im Dauersendebetrieb. Beim Wechsel der Funkzelle, der regelmäßigen Anwesenheitskontrolle sowie beim Versenden oder Empfangen einer Kurzmitteilung sendet das Handy circa 1 Sekunde lang.

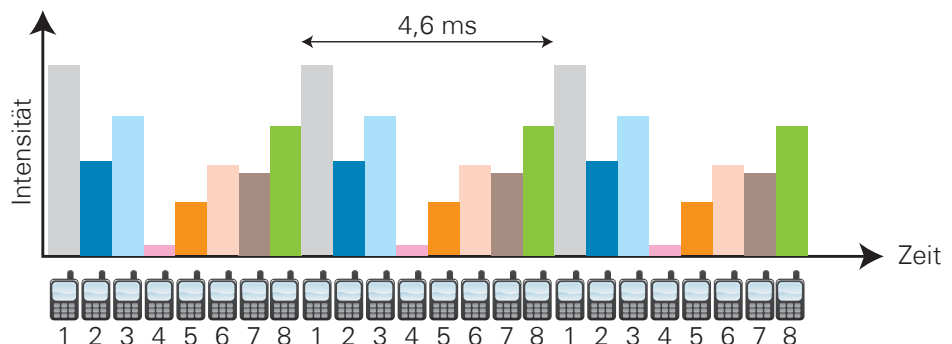
Beim modernen Mobilfunk wird das analoge Sprachsignal digitalisiert, d. h. in Folgen von Einsen und Nullen umgewandelt. Die digitalen Signale können allerdings nicht direkt über die Antenne übertragen werden. Hierzu wird ein hochfrequentes Signal als Transportmedium (Trägerfrequenz) genutzt und mit der digitalen Sprachinformation verknüpft (Modulation). Um Übertragungskapazität zu gewinnen, erfolgt das Senden der Sprachsignale bei GSM nicht kontinuierlich, sondern in zeitlich aufeinander folgenden kleinen Datenpaketen.

Diese Datenpakete werden in Abständen von 4,6 Millisekunden, also 217-mal in der Sekunde, gesendet. Allerdings unterscheiden sich die Signalfolgen von Handy und Basisstation, wie in der Abbildung unten zu sehen ist. Das Handy sendet bei Telefongesprächen nur in einem Achtel der Zeit, die restlichen sieben Achtel sendet es nicht. Dieses gepulste Signal kann während eines Gesprächs mit einem Detektor-Radio in Form eines sägenden 217 Hz-Tons hörbar gemacht werden.

*Schematische Darstellung der
Signalformen von GSM-Handys
während eines Telefongesprächs*



*Schematische Darstellung der
Signalformen im Verkehrskanal
(TCH) einer GSM-Basisstation.
Der Verkehrskanal ist leistungs-
geregelt, es können maximal
acht Gespräche abgewickelt
werden. Quelle: LfU*



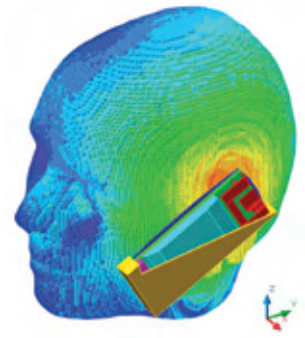
Die Signalstruktur einer Basisstation ist im Vergleich wesentlich kontinuierlicher, da in der Regel mehrere Handys gleichzeitig angesprochen werden und zudem noch Signalisierungsaufgaben zu erledigen sind.

Die Sendeleistung des Handys – und mit Einschränkungen auch die der Basisstation – ist von der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation abhängig. Das bedeutet, dass bei schlechter Verbindungsqualität eine deutlich höhere Sendeleistung erforderlich ist als bei guter Versorgung. Die Sendeleistungen von GSM-Handys betragen bei GSM-900 höchstens 2 W, bei GSM-1800 beträgt der Spitzenwert 1 W. Die maximal erreichbaren Mittelwerte bei der Sprachübertragung liegen bei etwa einem Achtel des Spitzenwerts, also bei 250 mW bzw. 125 mW. Bei gutem Empfang kann die Sendeleistung des Handys bei GSM theoretisch um den Faktor 1.000 und bei UMTS um den Faktor 100.000.000 reduziert werden (siehe Abbildung unten). Allerdings senden GSM-Handys bei jedem

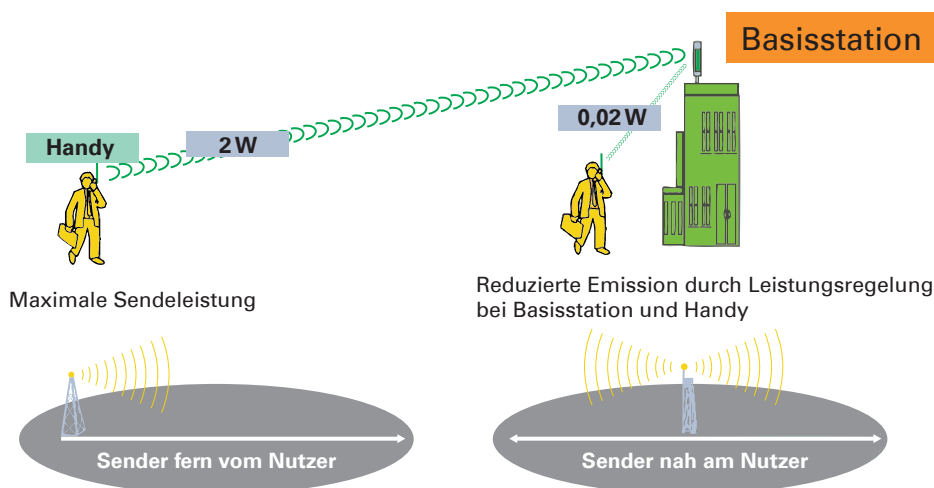
Gesprächsaufbau, bei jedem Funkzellenwechsel und schon bei mittelmäßigem Empfang mit voller Leistung. UMTS-Handys senden kontinuierlich mit ebenfalls höchstens 125 mW mittlerer Leistung, sie können ihre Leistung aber wesentlich effizienter reduzieren, als dies im GSM-Standard vorgesehen ist.

Das Handy erzeugt im Bereich des Ohres die höchste Leistungsflussdichte, sie ist hier um den Faktor 1.000 bis 2.500.000 stärker als die der Mobilfunkbasisstation. Das ist damit zu erklären, dass der Abstand der Handyantenne zum Kopf nur wenige Millimeter beträgt, während der Abstand zur Basisstation in der Regel bei mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern liegt.

Im Kapitel 5.3 „Akute Wirkungen hochfrequenter Felder“ wird ausführlich auf die Absorption von Mobilfunkstrahlung im Kopf und im menschlichen Körper und die daraus abgeleiteten Grenzwerte eingegangen.



Elektromagnetische Immissionen im Nahfeld der Handyantenne. Quelle: IMST GmbH



Leistungsregelung bei Basisstation und Handy: Je besser die Funkverbindung zwischen Handy und Basisstation ist, desto mehr kann die Sendeleistung reduziert werden. Quelle: LfU

Tipps!

4.3.9 TIPPS ZUR VORSORGE

- Verwenden Sie eine Freisprecheinrichtung oder ein kabelgebundenes Headset; dadurch verringert sich die Leistungsflussdichte am Kopf um mehr als 95 %.
- Wählen Sie einen Standort mit gutem Empfang (alle Empfangsbalken); das Gerät sendet dann mit deutlich geringerer Leistung (bis zu 99,9 % geringer).
- Verwenden Sie strahlungsarme Handys, wie sie z. B. auf der Internetseite www.handywerte.de oder bei der Zeitschrift CONNECT [17] in der Strahlungsbestenliste aufgeführt sind.
- Verwenden Sie UMTS-Handys im UMTS-Modus.
- Stellen Sie Laptops mit WLAN auf einen Tisch und nicht auf Ihre Oberschenkel.
- Stecken Sie UMTS-Datasticks nicht direkt in den Laptop, sondern verwenden Sie ein USB-Kabel und legen den Stick ans Fenster.

Werden alle Maßnahmen aus Punkt 1 bis 3 kombiniert, kann der Leistungsfluss am Ohr im Idealfall auf weniger als ein Zehntausendstel reduziert werden.

4.4 RUNDFUNK UND FERNSEHEN

Hochfrequente elektromagnetische Wellen werden seit Anfang des 20. Jahrhunderts zur Radioübertragung genutzt, einige Jahre später kam das Fernsehen dazu. Beides wird unter dem Begriff Rundfunk zusammengefasst. Anders als der Mobilfunk mit seinen 68.000 leistungsschwachen Sendemasten, die oft nur ein Gebiet von einem Quadratkilometer abdecken, arbeitet der Rundfunk mit einem Netz leistungsstarker Grundnetzsender, die bisweilen Gebiete mit einem Radius von mehr als 100 km versorgen.

In der Karte auf Seite 88 sind alle baden-württembergischen und bayerischen Standorte verzeichnet, an denen sich Rundfunksender mit einer installierten Gesamtsendeleistung von mindestens 25 kW (ERP) befinden. Insgesamt werden in Baden-Württemberg 6,5 MW (ERP), in Bayern 10,7 MW (ERP) Leistung für Rundfunk-Ausstrahlung aufgewendet. Darin sind die Kurzwellen-Sender nicht enthalten, da diese je nach Tageszeit stark wechselnde Sendeleistungen aufweisen.

Der Sender Wertachtal/Allgäu des Betreibers MEDIA BROADCAST GmbH ist der leistungsfähigste Kurzwellen-Standort in Süddeutschland. Hier stehen vierzehn 500-kW-Sender (Gesamtleistung 7 MW), die in unterschiedlichen Zusammenschaltungen betrieben werden können. Quelle: Wikipedia



Die Abstrahlung von Rundfunkprogrammen erfolgt meist von hohen Bergen, in Großstädten wie Stuttgart oder München auch von lokalen Fernsehtürmen aus. Dabei werden entweder horizontal rundstrahlende Sendeantennen verwendet oder Sektorantennen werden so angeordnet, dass eine rundstrahlende Sendecharakteristik entsteht. Nur in manchen Fällen, etwa beim Sender Wendelstein, dem nach Süden ein höherer Gebirgszug nachgelagert ist, erfolgt die horizontale Abstrahlung gerichtet. In vertikaler Richtung werden die Strahlen wie beim Mobilfunk gebündelt.

Aufgrund der hohen Sendeleistungen sind beachtliche Sicherheitsabstände erforderlich, die bisweilen mehrere hundert Meter betragen können. Für den Sender Wendelstein (UKW, DVB-T) weist die Bundesnetzagentur beispielsweise einen Sicherheitsabstand von 320 m in Hauptstrahlrichtung aus. Durch die Wahl der herausragenden Standorte lassen sich die Sicherheitsabstände gut kontrollieren. Hohe Grenzwertausschöpfungen treten nur in Ausnahmefällen in Wohngebieten auf. In Städten liegt die Grenzwertausschöpfung des Rundfunks gewöhnlich in derselben Größenordnung wie beim Mobilfunk [18].

2002 begann beim Fernsehen die Umstellung auf digitale Übertragung, die heute abgeschlossen ist. Mit der Umstellung der letzten „analogen Inseln“ in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz ist seit Ende 2008 das digitale Fernsehen DVB-T deutschlandweit in Betrieb. Ein DVB-T-Kanal kommt gegenüber einem analogen Fernsehkanal bei gleicher Reichweite mit bis zu 90 % weniger Sendeleistung aus. Zudem können auf einem DVB-T-Kanal bis zu sechs Fernsehprogramme übertragen werden, typisch sind aber vier Programme. Aus Gründen der besseren Versorgung in Gebäuden (Indoor-Versorgung) ist die Sendeleistung in der Praxis meist nur drei bis fünf mal geringer als die zuvor für analoges Fernsehen eingesetzte Leistung. In den Gebieten, die nur eine Grundversorgung öffentlich-rechtlicher Fernsehprogramme erfahren, ergibt sich daraus eine deutliche Reduktion der Immissionen [18]. In den Ballungsräumen München und Nürnberg, wo heute 24 öffentliche und private Fernsehprogramme auf sechs DVB-T-Kanälen empfangbar sind, ergibt sich keine Reduzierung der Sendeleistung. Ähnliches ist auch in anderen Ballungsräumen mit zusätzlichen privaten Fernsehangeboten festzustellen.



Stuttgarter Fernsehturm

Quelle: LUBW

Anzahl und Leistung von Rundfunk-Sendeanlagen in Baden-Württemberg und Bayern (Circa-Angaben)

Sendeanlage	Installierte Leistung P(ERP) / kW		Standorte		Sender	
	Baden-Württemberg	Bayern	Baden-Württemberg	Bayern		
Digitalradio DAB	116	82	19	19	54	58
UKW-Radio	3.143	5.241	169	362	228	520
Fernsehen DVB-T	1.980	4.680	24	52	28	80
Langwelle, Mittelwelle	1.280	727	12	12	11	11
Summe	6.519	10.730	224	445	321	758

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 22–31**

Beim Hörfunk ist der Verbreitungsgrad von UKW-Radio mit praktisch 100 % und geschätzten 300 Mio. Empfangsgeräten [19] viel zu hoch, um eine schnelle Digitalisierung durchführen zu können. Ein Nachfolgesystem für UKW ist derzeit weder zeitlich noch technisch absehbar. Das in den 1980er Jahren konzipierte und Anfang der 1990er Jahre eingeführte Digitalradio DAB (Digital Audio Broadcasting) gilt heute mit wenigen Empfangsgeräten und sehr wenigen Sendern als gescheitert [20]. Möglicherweise ist dessen Nachfolger DAB+ erfolgreicher. Ein sukzessiver „sanfter“ Umstieg könnte auch mit DRM+ erfolgen, das im UKW-Frequenzband mit analogem Radio koexistieren kann. Es stellt eine Weiterentwicklung von DRM (Digital Radio Mondiale) dar, das im Bereich der Mittel- und

Kurzwellsender bereits teilweise analoge Abstrahlungen abgelöst hat. Im Zuge der Konvergenz der Medien ist ferner mit einer zunehmenden Bedeutung von Internet-Radio zu rechnen, das über Mobilfunknetze auch über Handy nutzbar ist.

Abschließend sei noch erwähnt, dass es sich auch beim Satellitenfernsehen um Rundfunk handelt. Aufgrund der großen Entfernung von rund 38.000 km zum Satelliten sind die Immissionen des Satellitenfernsehens trotz der relativ hohen ERP-Sendeleistung von 100 kW bis 250 kW pro Transponder, die durch Hochgewinnantennen aus einer Speiseleistung von typischerweise 100 W bei heutigen Satelliten entsteht, vollkommen vernachlässigbar.

Standorte von Radio- und Fernsehsendern in Baden-Württemberg und Bayern mit einer installierten Gesamt-Sendeleistung (ERP) von mindestens 25 kW.
Quelle: LfU, LUBW



4.5 BOS-TETRA-DIGITALFUNK

Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie Feuerwehren, Rettungsdienste, Technisches Hilfswerk, Bundes- und Landespolizei werden künftig deutschlandweit über ein gemeinsames digitales Behördenfunknetz verfügen, das auf dem internationalen TETRA-Standard basiert. TETRA-Digitalfunk kommt derzeit weltweit in mehr als 100 Staaten zum Einsatz und wird in Deutschland bereits regional für den Betriebsfunk von Verkehrs- und Energieversorgungsunternehmen genutzt.

Im Unterschied zu den klassischen Mobilfunksystemen ermöglicht die neue Technik eine GPS-unterstützte Einsatzsteuerung sowie Gruppenkommunikation. Weiterhin zeichnet sich das System durch schnellen Verbindungsaufbau (unter 0,5 s), Prioritätsrufe sowie Alarmierungsmöglichkeiten aus. Hinzu kommen Abhörsicherheit durch Verschlüsselung, Telefon-Funktionen und ein Gerätemodus, der direkte Kommunikation zwischen mobilen Endgeräten zulässt (direct mode). Zudem gibt es für kritische Einsatzsituationen eine Notruffunktion mit GPS-Ortung.

In Bayern und Baden-Württemberg werden insgesamt ca. 1.650 TETRA-Basisstationen errichtet und im Gegenzug ca. 6.000 analoge BOS-Funkanlagen abgebaut. Das TETRA-Digitalfunknetz ist zellulär aufgebaut, wobei die einzelnen Funkzellen weitmaschiger sind als beim Mobilfunk. Die Innenversorgung größerer Objekte wie z. B. Bahnhöfe oder Tunnelanlagen, die vom Digitalfunknetz nicht ausreichend versorgt werden, kann über objekteneigene Basisstationen oder Funkverstärker realisiert werden. Die Reichweite einer Sendestation liegt zwischen 4 bis 5 km im städtischen Gebiet und 10 bis 25 km im ländlichen Raum [21].

TETRA ist dem GSM-Standard ähnlich: Es unterteilt wie GSM jeden Funkkanal nach dem Zeitmultiplexverfahren in einzelne Zeitschlitze, so können pro Kanal bis zu 4 Gespräche gleichzeitig übertragen werden. Verkehrskanäle werden bedarfsorientiert zugeschaltet. Bei TETRA werden ebenfalls uplink und downlink über unterschiedliche Funkkanäle realisiert (Frequenzduplex). So kann ein Gerät gleichzeitig senden und empfangen.

In Deutschland wurden für TETRA Frequenzen im Bereich 380-400 MHz zugewiesen. Für diesen Frequenzbereich beträgt der gesetzliche Grenzwert 27,5 V/m für die elektrische Feldstärke bzw. 2 W/m² für die Leistungsflussdichte. Basisstationen von TETRA-Digitalfunknetzen müssen die gesetzlichen Grenzwerte der 26. BImSchV einhalten.

Die BOS-Funkrichtlinie [22] begrenzt die maximale Sendeleistung einer BOS-TETRA-Basisstation auf 519 W (EIRP). Daraus lässt sich ein maximaler Sicherheitsabstand in Hauptstrahlrichtung von 4,5 m errechnen. Der tatsächliche Sicherheitsabstand einer solchen Anlage liegt mit 2 bis 3 m deutlich darunter. In der Regel verwenden Basisstationen eine Sendeleistung von 20 W pro Kanal. Die Sendeleistung der leistungsgeregelten Handfunkgeräte beträgt 30 mW bis maximal 1 W, je nach Empfangsqualität am Einsatzort.

Das TETRA-System erfüllt alle europäischen Anforderungen zum Gesundheitsschutz. Die Zulassung jeder einzelnen BOS-Basisstation wird durch eine Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur dokumentiert. Ergänzend zu den vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen führt das BfS in Zusammenarbeit mit den Nutzern des digitalen Behördenfunks mehrere Studien durch [23].



TETRA-Mobilfunkmast

Quelle: StMI, Projektgruppe

DigiNet



TETRA-Funkgerät

Quelle: Motorola



Outdoor-DSLAM mit Richtfunk-
anbindung. Quelle: p² systems
GmbH

4.6 STATIONÄRE INTERNET- FUNKLÖSUNGEN

Viele Wohnhäuser und Gewerbebetriebe liegen zu weit von der nächstgelegenen Vermittlungsstelle entfernt, so dass dort kein oder nur langsames DSL zur Verfügung steht. Jenseits einer Länge von 5 bis 6 km des vorhandenen Telefonkabels wird das Signal für eine DSL-Verbindung zu schwach. Der Verlegung von Glasfasern und dem Aufbau von Minivermittlungsstellen (Outdoor-DSLAM) stehen oft hohe Kosten entgegen. Gerade in sehr dünn besiedelten Gebieten kann mit stationären Funklösungen schnelles Internet einfach und kostengünstig zur Verfügung gestellt werden, ohne Glasfaserkabel verlegen zu müssen. Eine mobile Nutzung dieser auch als Funk-DSL bezeichneten Lösungen ist im Gegensatz zum Mobilfunk in der Regel nicht möglich.

Funk-DSL ist deshalb wie Satelliteninternet eine Nischentechnologie zur Versorgung von Gebieten ohne oder nur mit langsamem DSL. Für Privatanutzer werden heute Systeme zwischen 2 und 20 MBit/s inklusive VoIP-Telefonanschluss angeboten, deren Leistungsfähigkeit sich teilweise von normalem DSL nicht mehr unterscheidet. Schon bei geringen Nutzerzahlen kann ein solches System kostendeckend betrieben

werden. Bei Funk-DSL versorgt eine Basisstation mit einer Rundstrahlantenne oder mehreren Sektorantennen an einem erhöhten Standort typischerweise 20 bis 50 Endkunden, die durch eine kleine Außenantenne oder eine Zimmerantenne am Fenster mit der Basisstation verbunden sind. Auch Distanzen von mehreren Kilometern sind bei Sichtverbindung mit Außenantennen problemlos überbrückbar. Je nach Entfernung zur Basisstation kommen beim Nutzer unterschiedliche Antennenformen zum Einsatz: Rundstrahlantennen, Sektorantennen oder kleine Flachantennen. Sie werden am Balkon, an der Hauswand (siehe Abbildung) oder auf dem Dach befestigt.

Basisstationen für Funk-DSL verwenden lizenzfreie Frequenzbänder um 2,4 GHz und 5,7 GHz mit Sendeleistungen bis zu 1 W (EIRP). Die Basisstationen sind untereinander durch Richtfunkstrecken verbunden (siehe nächster Abschnitt). Die Immissionen der Richtfunkstrecken sind kaum nachweisbar, die der Basisstationen sind aufgrund der geringen Sendeleistungen etwa 1000-fach geringer als die von Mobilfunk. Die Immissionen der Endgeräte sind auf vergleichbarem Niveau [24].

Alternativ zur direkten Funkanbindung des Nutzers kann auch der Kabelverzweiger (KVZ) des Wohngebiets mit einer Funklösung ausgerüstet werden. Neben dem Kabelverzweiger wird dazu ein Outdoor-DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) installiert, der über Richtfunk ans Internet angebunden ist. Der Nutzer erhält damit einen vollwertigen DSL-Anschluss über die Telefondose. Der Telefonanbieter erspart sich das Verlegen eines langen Glasfaserkabels und kann so schneller und günstiger anbieten. Bei Bedarf kann ein Glasfaserkabel später nachgerüstet werden.



Außenantenne am Fenster.
Quelle: AllgäuDSL

4.7 RICHTFUNK UND SATELLITENINTERNET

Die Richtfunktechnik ermöglicht Bild-, Ton- und Datenübertragung auch über weite Strecken einfach und kostengünstig. Im terrestrischen Richtfunk werden typischerweise Distanzen von 1 bis 70 km überbrückt. Es werden Trägerfrequenzen im Mikrowellenbereich zwischen 6 und 40 GHz verwendet: 6 bis 8 GHz für Funkstrecken über 20 km, 11 bis 15 GHz für Entfernungen zwischen 10 und 20 km sowie 18 bis 38 GHz für Entfernungen zwischen 1 und 10 km. Es kommen Richtantennen mit hohem Antennengewinnfaktor (meist zwischen 1.000 und 10.000) zum Einsatz. Sie werden auf erhöhten Standorten wie großen Funktürmen angebracht, um große Entfernungen überbrücken zu können (siehe Abbildung rechts). Meistens werden Parabolantennen oder Flachantennen verwendet. Der Antennengewinn ist frequenzabhängig und steigt linear mit der Antennenfläche.

Die große Richtwirkung der Antennen erlaubt hohe Datenübertragungsraten trotz geringer maximaler Antenneneingangsleistungen zwischen 10 mW und 1 W. Die reale Sendeleistung wird bei guten Witterungsbedingungen auf wenige Prozent der maximalen Sendeleistung reduziert. Bei Richtfunkantennen ist der Hauptstrahl vertikal und horizontal stark gebündelt (siehe Abbildung Seite 79), der Öffnungswinkel liegt zwischen 1° und 4°. Außerhalb des engen Hauptstrahls nimmt die Leistungsflussdichte rapide ab. Außerdem ergibt sich wie bei jeder Antenne in der Hauptstrahlrichtung eine quadratische Abnahme der Leistungsflussdichte (siehe Abbildung Seite 72 unten). Wegen der verwendeten hohen Frequenzen und der geringen Sendeleistung muss Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfangsantenne bestehen.

Erdkrümmung, Geländeform und Flächen-nutzung (Bäume, Gebäude) sind daher zu berücksichtigen. Besteht keine direkte Sichtverbindung, muss die Richtfunkstrecke durch Relaisstationen in Teilstrecken aufgeteilt werden.

Die Einwirkungen durch Richtfunk sind äußerst niedrig und im Vergleich zum Mobilfunk vernachlässigbar. Die typischen Leistungsflussdichten liegen bei einem Milliardstel der gültigen Grenzwerte oder noch darunter. Eine Überschreitung der Grenzwerte wäre nur dann denkbar, wenn sich jemand im Freihaltebereich der Antenne aufhält. In diesem Fall wäre die Richtfunkverbindung gestört oder unterbrochen. Schon um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, stellt der Betreiber sicher, dass niemand in den Freihaltebereich gelangen kann.

Ein Sonderfall des Richtfunks ist die Satellitenkommunikation. Für den Empfang von Satellitenfernsehen und -radio befinden sich auf deutschen Hausdächern rund 14 Mio. Parabolantennen. Mit einem Öffnungswinkel von ca. 2° und einem Antennengewinnfaktor zwischen 3.000 bis 8.000 empfangen sie ihre Signale im Frequenzbereich zwischen 10,7 und 12,75 GHz von geostationären Satelliten in ca. 38.000 km Entfernung. Als reine Empfangsantennen verfügen sie über keinerlei Sendetechnik und verursachen daher auch keine Immissionen.

Mit modernen Zweiwegesystemen kann über den Satelliten eine Internetverbindung hergestellt werden. Beim **Satelliteninternet** werden Daten nicht nur empfangen (downlink), sondern es können mit einer Sendeleistung von bis zu 2 W und einer Frequenz von 14 GHz auch Daten zum Satelliten ge-



Richtfunkantennen auf einem hohen Mast in Karlsruhe.

Quelle: LUBW



WLAN-Richtfunksystem mit Flachantenne (5,8 GHz).

Quelle: LfU



WLAN-Richtfunksystem mit Gitter-Parabolantenne (5,8 GHz).

Quelle: LfU



*Amateurfunkantenne (X-Quad
für 70-cm- und 2-m-Band,
1,7-GHz-Yagi und UKW-Antenne)
Quelle: DK3WN*

schickt werden (uplink). Bedingt durch die starke Richtwirkung der Antenne (Strahlöffnungswinkel circa 1°) treten auch bei dieser Technik in der Umgebung praktisch keine Immissionen auf. Satelliteninternet ist eine Nischentechnologie zur Versorgung DSL-freier Gebiete und benötigt keine kommunale Infrastruktur. Sie ist wie das Satellitenfernsehen deutschlandweit flächendeckend in gleicher Qualität und vor allem sofort nutzbar. Oft wird Satelliteninternet auch als Übergangslösung bis zum DSL-Ausbau installiert. Wie beim Satellitenfernsehen muss eine Parabolantenne am Haus angebracht, zum Satelliten ausgerichtet und mit dem Modem verbunden werden. Nachteil des Satelliteninternets sind hohe Verzögerungszeiten von etwa 800 ms und die eingeschränkten Übertragungskapazitäten heutiger Satelliten. Gerade in den Abendstunden, wenn viele Menschen online sind, ist dieser Zugang oft sehr langsam. Mit dem Start des „Ka-Sat“-Satelliten (downlink 20 GHz, uplink 30 GHz, 70 GBit/s Bandbreite) im Frühjahr 2011 wird Satelliteninternet bei geringeren Kosten mit deutlich höherer Transferrate bereitstehen. Die Übertragungskapazität wird zigfach höher sein als mit bisherigen Satelliten.

4.8 AMATEURFUNK

In Deutschland gibt es etwa 80.000 Hobby-Amateurfunker. Der Empfang des Amateurfunkdienstes ist in Deutschland jedermann gestattet. Die aktive Teilnahme am Amateurfunkdienst, d. h. der Betrieb eines Senders, ist an eine Zulassung gebunden. Das Amateurfunkzeugnis erwirbt man durch eine Prüfung bei der Bundesnetzagentur. Damit unterscheidet sich der Amateurfunk von Funkanwendungen wie CB-Funk,

Kurzstreckenfunk SDR, DMR446 und vielen anderen, die jedermann ohne Genehmigung nutzen darf. Amateurfunk wird auf festgelegten Funkbändern betrieben, die in allen Wellenlängenbereichen zur Verfügung stehen.

Da Amateurfunkantennen häufig in Wohngebieten stehen, können die elektromagnetischen Immissionen in nahe gelegenen Wohnungen sehr viel höher als durch die anderen Funkdienste sein. Mit bündelnden Antennen (typischer Antennengewinn $G = 50$) wird bei 750 W Sendeleistung in Hauptstrahlrichtung eine isotrope Strahlungsleistung von 37.500 W (EIRP) erreicht. Das Betreiben einer Sendeanlage ist deshalb an Auflagen bzw. Nachweispflichten in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit gebunden. Der Funkamateur muss dabei nach der Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) nachweisen, dass er die maximal zulässigen Grenzwerte des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) bzw. der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) einhält.

Amateurfunkstellen müssen bei der Bundesnetzagentur nur angezeigt werden; sie benötigen keine Standortbescheinigung und sind deshalb nicht in der Standortdatenbank der BNetzA erfasst. Die maximal erlaubte Sendeleistung wird von Amateurfunkern im Normalfall nicht ausgeschöpft. Die meisten Anlagen haben Leistungen zwischen 5 und 100 W. Zudem sind Amateurfunkanlagen meist nur einige hundert Stunden pro Jahr in Betrieb [25].

4.9 ARTIKELSICHERUNGS- UND ARTIKELERKENNUNGSANLAGEN

Elektromagnetische Felder finden in öffentlich zugänglichen Bereichen zunehmend Anwendung, z. B. bei Waffenspürgeräten und bei der **Artikelsicherung** in Kaufhäusern. Dazu werden am Ausgang sowie im Kassensbereich Standsäulen mit Magnetspulen aufgestellt, die einen Warendiebstahl verhindern sollen. Die an den Artikeln angebrachten und nicht entwerteten Sicherungsetiketten werden mittels elektromagnetischer Felder erkannt.

In der Abbildung unten ist ein mögliches Prinzip einer Artikelsicherungsanlage dargestellt. Die linke Spulenanordnung erzeugt magnetische Impulse, die ein Sicherungsetikett in Resonanz bringen. Die Empfangsspulen auf der rechten Seite erkennen die Schwingung des Sicherungsetiketts und lösen Alarm aus.

Artikelsicherungsanlagen arbeiten mit unterschiedlichen Frequenzen zwischen 10 Hz und 3 GHz, deren Felder unterschiedliche Stärken und Modulationen aufweisen. Die im niederfrequenten Bereich arbeitenden Anlagen können in der Überwachungszone relativ hohe magnetische Flussdichten von bis zu 300 μT aufbauen, denen die Pas-

santen im Regelfall allerdings nur kurzzeitig ausgesetzt sind.

Das Bundesamt für Strahlenschutz weist darauf hin, dass durch Lesegeräte mit hoher Reichweite die von der ICNIRP empfohlenen Referenzgrenzwerte für die allgemeine Bevölkerung in vielen Fällen überschritten werden. Eine gesundheitliche Gefährdung für die allgemeine Bevölkerung durch die Warensicherungsanlagen besteht laut BfS aber nicht, da die Expositionsdauer in der Regel sehr kurz ist. Für die Angestellten gelten höhere Grenzwerte [26].

Artikelerkennungsanlagen mit RFID

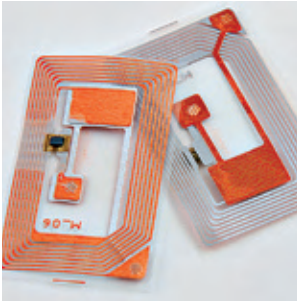
(Radio frequency identification) können Artikel, Menschen oder Tiere kontaktlos mittels elektromagnetischer Felder eindeutig identifizieren und erfassen.

Ein RFID-System besteht aus einem Transponder, der sich am oder im Gegenstand bzw. Lebewesen befindet und dieses kennzeichnet, sowie einem Lesegerät zum Auslesen der Transponder-Kennung. Die Transponder sind meist flach wie ein Blatt Papier und werden in Klebeetiketten (RFID-Tags), Scheckkarten (RFID-Cards) oder Reisepässen integriert. Zylinderartige Bauformen werden in Autoschlüsseln



Arbeitsweise einer Artikelsicherungsanlage, Quelle LUBW

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 22–31**



*Innenleben einer RFID-Card
Quelle: Shutterstock*

(Wegfahrsperre), Ohrmarken (Tierzucht), Implantaten und Plastikmünzen (Chipcoins) verwendet. Sie enthalten in der Regel eine Antenne sowie einen Mikrochip. Die Energieversorgung erfolgt entweder auf passivem Wege, indem der Transponder seine benötigte Energie aus dem Feld des Lesegeräts bezieht, oder auf aktive Weise über eine integrierte Batterie.

Gerät ein Transponder in die Nähe eines Lesegeräts, wird er von dessen Feld aktiviert. Er sendet daraufhin seine gespeicherten Daten an das Lesegerät. Je nach Anwendung können im Transponderchip wenige Byte (z. B. Artikelnummer, Seriennummer) bis zu mehreren Kilobyte (z. B. Fingerabdruck, Passfoto) gespeichert werden.

Die von den meisten RFID-Einrichtungen genutzten Sendefrequenzen liegen in den lizenzfreien ISM-Bändern (ISM = Industrial-Scientific-Medical). Typisch für RFID sind folgende Bereiche:

- Radiofrequenz: 100 – 135 kHz; 6,78 MHz; 13,56 MHz; 27,125 MHz
- Mikrowelle: 868 MHz; 2,45 GHz; künftig auch 5,8 GHz.

Die Reichweite von RFID-Systemen erstreckt sich je nach Einsatzbereich über Entfernungen von wenigen Millimetern (RFID-Schlüsselkarte) bis über 10 m (RFID-Fahrzeug-Identifikation, z. B. bei der LKW-Maut).

4.10 QUELLEN IM HAUSHALT

4.10.1 MIKROWELLENHERDE

Elektromagnetische Wellen einer Frequenz von 2.455 MHz werden im Mikrowellenherd zur Erwärmung von Speisen genutzt. Ähnliche Frequenzen werden auch im Mobilfunk (UMTS) und für WLAN verwendet, nur bei sehr viel geringeren Leistungen ($\approx$ Faktor 4.000). Der Kopf eines Handynutzers wird deshalb durch die Mikrowellen des Handys auch nicht um 100 °C, sondern nur um 0,1 °C erwärmt.

Die Mikrowellen werden von Speisen absorbiert und regen dort Moleküle zu Schwingungen an. Die Schwingungsenergie bewirkt eine Erwärmung des Essens. Wassermoleküle können besonders gut, Fettmoleküle eher schlecht zu Schwingungen angeregt werden. Die Absorption von 2.455-MHz-Strahlung erfolgt deshalb bei wässrigen Speisen oberflächennah bis in ca. 6 mm Tiefe, bei Fett beträgt die Eindringtiefe etwa 50 mm. Außerhalb des Geräts ist das elektrische Feld sehr schwach, da der Garraum mit Blechen und Gittern abgeschirmt ist. Aus Sicherheitsgründen wird beim Öffnen der Tür automatisch die Energiezufuhr abgeschaltet.

Zudem werden Mikrowellenherde von den Herstellern auf Leckstrahlung getestet, sollten aber regelmäßig (z. B. alle 2 Jahre) überprüft werden.



*Mikrowellenherd
Quelle: Sharp*

4.10.2 SCHNURLOSTELEFONE (DECT)

Heutige Schnurlostelefone basieren fast ausschließlich auf dem digitalen DECT-Standard und senden auf einer Frequenz um 1900 MHz. Die maximale Sendeleistung ist mit 250 mW deutlich geringer als bei GSM-Handys. Die Daten werden in kurzen Pulsen gesendet, die mittlere Sendeleistung der Basisstation und des Mobilteils liegen deshalb mit 10 mW noch deutlich darunter. Im Ruhebetrieb sendet das Mobilteil nicht. Die Basisstation sendet im Ruhebetrieb 100-mal pro Sekunde mit einer mittleren Sendeleistung von 2,1 mW Systeminformationen an das Mobilteil.

Wer seine persönlichen Immissionen minimieren möchte, sollte die Basisstation nicht an Orten aufstellen, an denen man sich häufig aufhält, z. B. nicht direkt am Bett oder auf dem Schreibtisch.

Umfangreiche Informationen hierzu bietet das EMF-Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) [27].

ECO-DECT-Telefone reduzieren die Strahlungsleistung im Ruhebetrieb um den Faktor 10.000 bis 10.000.000, wenn das Mobilteil in der Station liegt. Dazu ist es wichtig, nur ein Mobilteil pro Station anzumelden und es immer in diese zurückzulegen. Seit 2008 gibt es auch Telefone mit verbessertem ECO-Modus, bei denen mehrere Mobilteile angemeldet werden können und bei denen das Mobilteil außerhalb der Schale verbleiben kann, ohne auf den ECO-Modus verzichten zu müssen. Im Standby wird die Sendeleistung hier völlig abgeschaltet. Je nach Hersteller wird diese Funktion als Full-ECO-DECT oder ECO-Modus-Plus bezeichnet. Das BfS hat eine Auswahl von ECO-DECT Geräten zusammengestellt [28].

4.10.3 DRAHTLOSE HEIMNETZWERKE (WLAN)

Ein WLAN (Wireless Local Area Network) ist ein drahtloses lokales Netzwerk mit einer Reichweite von 20 bis 100 m. Mit dieser Technik ist ein drahtloser Zugang zum Internet sowie eine drahtlose Vernetzung mehrerer Computer möglich. Die Kommunikation der Computer erfolgt über einen zentralen Zugriffspunkt, den WLAN-Router. Dieser enthält meistens ein DSL-Modem und ist über DSL mit dem Internet verbunden.

WLAN (nach dem Industriestandard IEEE 802.11 b/g) verwendet teilweise dieselbe Frequenz wie Mikrowellenherde und kann durch diese gestört werden. Im 2,4 GHz-Band ist die maximale Sendeleistung auf 100 mW beschränkt und liegt damit niedriger als bei DECT. WLAN-Basisstationen senden mindestens 10-mal pro Sekunde Signalisierungsinformationen (beacon). So ergibt sich für Basisstationen eine mittlere Sendeleistung von 0,5 mW im Ruhebetrieb und bis zu 100 mW im Volllastbetrieb. WLAN-Mobilteile senden im Schlafmodus gar nicht und bei Volllast mit ebenfalls bis zu 100 mW. Typischerweise liegt die mittlere Sendeleistung sowohl bei der Basis als auch bei den Mobilteilen im normalen Betrieb unter 10 mW und damit auf dem Niveau eines DECT-Telefons.

WLANs auf Basis des neuen IEEE-Standards 802.11n versprechen drastisch höhere Durchsatzraten. Das neue WLAN kann zusätzlich im 5-GHz-Band mit einer verfügbaren Bandbreite von 455 MHz und mit bis zu 1 W automatisch regulierter Sendeleistung arbeiten.



DECT-Telefon mit
ECO-Modus-Plus
Quelle: Gigaset

Tipps!



WLAN-Router 802.11n
Quelle: AVM



Kabellose Computer-Maus

Quelle: Shutterstock

Tipps!

WLAN 802.11n nutzt zur Datenübertragung bessere Modulationsverfahren, breitere Kanäle und die Technik Multiple Input Multiple Output (MIMO), erkennbar an zwei bis vier Antennen pro Gerät. Dadurch sind größere Reichweiten und höhere Datenraten möglich. Wird das Sendesignal von zwei oder mehr Antennen ausgestrahlt, kann durch eine zeitliche Verzögerung (Phasenverschiebung) eine Richtwirkung an den Antennen erreicht werden. Dieses Verfahren, mit dem auch mehrere Empfänger angepeilt werden können, wird Beamforming genannt.

Eine weitere Neuerung ist ein spezielles Stromsparprotokoll, das bei mobilen Geräten die Akkubetriebszeit signifikant verlängert und die Hochfrequenz-Immissionen reduziert. Dieser Modus ist unter anderem für VoIP-Geräte und WLAN-Telefone interessant, die in den nächsten Jahren wahrscheinlich die DECT-Telefone ablösen werden.

Umfangreiche Informationen bietet das EMF-Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz [27].

4.10.4 BLUETOOTH

Bluetooth dient wie WLAN der drahtlosen Datenübertragung, meist zwischen Computer und drahtlosen Peripheriegeräten wie Maus, Tastatur, Drucker, Headset oder Handy für Entfernungen im Bereich von einigen Metern. Auch die Controller von Spielekonsolen nutzen Bluetooth zur Kommunikation mit der Konsole. Da Bluetooth durch drei Stromsparmodi deutlich sparsamer arbeitet als WLAN, ist es sehr gut für den Batteriebetrieb geeignet.

Bluetooth arbeitet wie WLAN im 2,4-GHz-Band, verwendet 79 verschiedene Kanäle und wechselt diese bis zu 1.600-mal pro Sekunde, um Störungen durch WLAN und Mikrowellenherde zu vermeiden. Der Bluetooth-Standard kennt drei Leistungsklassen: 1 mW, 2,5 mW und 100 mW. Aus Stromspargründen werden meist nur 1 mW und 2,5 mW verwendet.

4.10.5 BABYFONE

Babyfone dienen der akustischen Überwachung von Säuglingen und Kleinkindern. Sender und Empfänger werden entweder über ein eigenes Kabel, das Hausstromnetz oder über Funk miteinander verbunden.

Ältere Funk-Babyfone werden mit 27,8 MHz und max. 100 mW Sendeleistung oder mit 40,7 MHz und max. 10 mW Sendeleistung betrieben. Neuere Geräte arbeiten mit 433 MHz, 860 MHz oder bei 1.900 MHz nach dem DECT-Standard. Einige Modelle sind dauernd auf Sendung und erzeugen folglich permanent Strahlung, andere dagegen senden nur, wenn ein Geräusch vorhanden ist. Mit geeigneter Gerätewahl können die Immissionen für das Kind niedrig gehalten werden.

Geräte, die über das Stromnetz verbunden sind, erzeugen keine nennenswerte Exposition. Von den Funk-Babyfonen sind diejenigen zu bevorzugen, die nicht ständig senden, sondern nur dann, wenn ein Geräusch vorhanden ist. Unabhängig davon empfiehlt es sich bei allen Geräten, einen Mindestabstand von 2 m zum Kind einzuhalten.

4.11 EMF-MONITORING IN BAYERN UND BADEN-WÜRTTEMBERG

Da das Thema Elektromagnetische Felder und ihre stetige Zunahme in der Öffentlichkeit seit Jahren heftig diskutiert wird, haben sich Baden-Württemberg und Bayern vor einigen Jahren dazu entschlossen, das elektromagnetische Spektrum an vielen hundert Punkten in ihren Ländern zu messen. Mit diesen gewonnenen Messdaten war es erstmals möglich, statistisch belastbare Aussagen über die Exposition der Gesamtbevölkerung mit elektromagnetischen Feldern zu machen. In Bayern und Baden-Württemberg wurde das Monitoring bereits zweimal durchgeführt, so dass hier bereits erste Aussagen zur zeitlichen Veränderung möglich sind. In Bayern ist das 3. EMF-Monitoring für 2011/2012 geplant.

Bei beiden Messaktionen wurden die hochfrequenten Immissionen anhand der Empfehlung des Europäischen Rates 1999/519/EG bewertet (siehe Kapitel 6 „Grenzwerte“). Die Messergebnisse wurden zu den dort aufgeführten Feldstärkewerten ins Verhältnis gesetzt (GW-E). Um den Ausschöpfungsgrad des Grenzwertes für die Leistungsflussdichte GW-P zu erhalten, muss der GW-E-Wert einfach quadriert werden.

Beispiel:

- Der Wert für GW-E liegt bei $0,02 = 2\%$.
- Demnach liegt der Wert für GW-P bei $(0,02)^2 = 0,0004 = 400 \text{ Millionstel}$.

Die Ausschöpfungsgrade GW-P der einzelnen Frequenzen können, im Gegensatz zu den Ausschöpfungsgraden GW-E, einfach addiert werden. Da die thermischen Wirkungen, die man bei hochfrequenter Strah-

lung feststellt, linear von der Leistungsflussdichte abhängen, wurde in Bayern die GW-P-Darstellung gewählt.

Da an einzelnen Messorten die gemessenen Werte deutlich höher ausfielen als an den meisten anderen Messorten, sind die Mittelwerte allein wenig aussagekräftig, da diese durch einige stark erhöhte Einzelwerte verzerrt werden und nicht mehr repräsentativ sind. Die Median-Darstellung ist in einem solchen Fall besser.

Der Medianwert ist so definiert, dass die Hälfte der Messwerte über dem Medianwert, die andere Hälfte darunter liegt. Stark erhöhte Einzelwerte fallen in dieser Darstellung nicht stark ins Gewicht. Medianwerte können im Gegensatz zu Mittelwerten aber nicht einfach zu einem Summenwert addiert werden.



Messung von Funkwellen: Mit Hilfe einer Rahmenantenne werden die Signale von Rundfunksendern (Langwelle, Mittelwelle, Kurzwelle) erfasst. Quelle: LUBW

4.11.1 PROGRAMME BAYERN

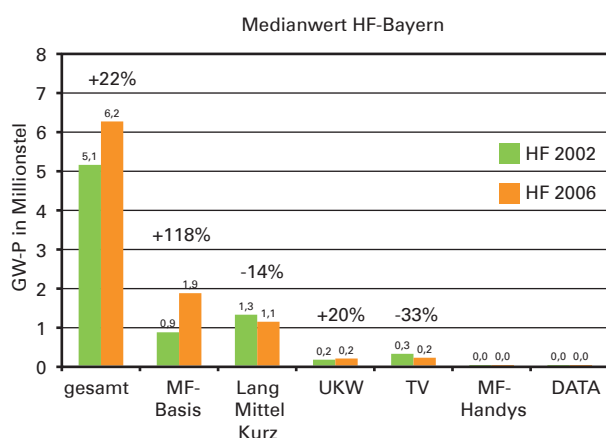
Mit dem EMF-Monitoring hat sich das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) das Ziel gesetzt, die elektromagnetischen Felder, denen die Bevölkerung ausgesetzt ist, ab dem Jahr 2002 regelmäßig zu erfassen. Die Auswahl der Messorte erfolgte 2002 bevölkerungsgewichtet verteilt über ganz Bayern. Bei der erneuten Messung 2006/2007 konnte an 400 der 403 Messorte wieder an der gleichen Stelle gemessen werden. Die Messergebnisse wurden in den Kategorien Hörfunk, Mobilfunk-Basisstationen, Fernsehfunk (TV), Mobilfunk-Handys und Datenfunk (DATA) zusammengefasst. DATA umfasst Immissionen von Funkthermometern und Funkschaltern.

Die beiden unten abgebildeten Diagramme unterscheiden sich besonders beim Mobilfunk. Während der Grenzwert an der Hälfte der Messorte nur zu weniger als zwei Millionstel ausgeschöpft wird (Median), gibt es ein paar Orte, an denen der Aus-

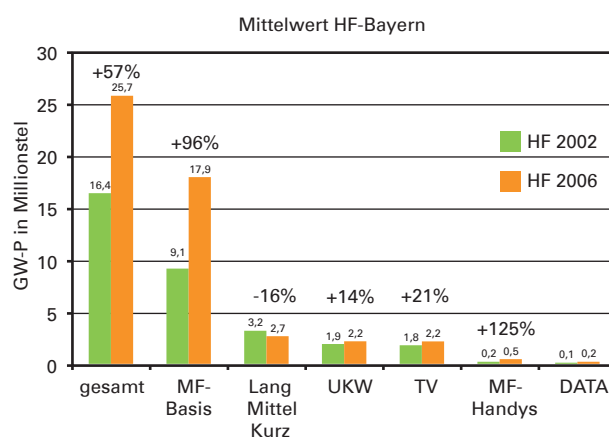
schöpfungsgrad bei bis zu 630 Millionstel liegt, dadurch ergibt sich ein Mittelwert von etwa 18 Millionstel.

Beide Darstellungen ergeben jedoch, dass sich in Bayern die Mobilfunkimmissionen auf geringem Niveau innerhalb von vier Jahren (2002/2003 bis 2006/2007) verdoppelt haben. Sie stellen heute die wichtigste Quelle von Hochfrequenz-Immissionen dar. Angesichts der zunehmenden Verbreitung von Sprach- und Datenflattrates dürfen sich die Mobilfunkimmissionen weiter erhöhen. Aus den Grafiken ist ebenfalls ersichtlich, dass an den Messorten DATA- und Handy-Immissionen bedeutungslos sind. Der Behördenfunk BOS (Feuerwehr, Polizei, THW) und DECT-Telefone sind in ihren Immissionen vergleichbar mit DATA und wurden deshalb nicht in die Grafik aufgenommen.

Die beiden ausführlichen Berichte mit weiteren Ergebnissen sind im Internet abrufbar [18].



Medianwerte der Hochfrequenz-Immissionen Monitoring Bayern
(GW-P-Darstellung). Quelle: LfU



Mittelwerte der Hochfrequenz-Immissionen Monitoring Bayern
(GW-P-Darstellung). Quelle: LfU

4.11.2 PROGRAMME BADEN-WÜRTTEMBERG

Die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) hat in den Jahren 2001 bis 2003 im Rahmen eines umfangreichen Messprogramms die Einwirkungen durch Funkwellen an fast 900 Messpunkten erfasst. Das Messprogramm wurde im Jahr 2009 an rund 600 Messpunkten wiederholt.

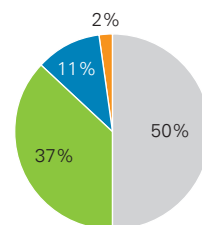
Die Erhebungen in vier repräsentativen Gebieten Baden-Württembergs mit insgesamt 143 Gemeinden berücksichtigen alle wesentlichen Funkanwendungen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz. Damit wurden die wichtigsten Funksendeanlagen wie Rundfunk, Fernsehen (analog und digital), Mobilfunk, Betriebsfunk, Polizei-, Feuerwehr-, Amateurfunk und Radar erfasst. Die Messpunkte befanden sich in einem regelmäßigen Raster von 2 km x 2 km. Gemessen wurde im Freien in 1,50 m Höhe über Grund. Durch diese Vorgehensweise konnte etwa 10 % der Landesfläche, in welcher etwa ein Drittel der Bevölkerung lebt, abgedeckt werden. Im Unterschied zur bayesischen Auswertung sind die Ergebnisse in Prozent vom Grenzwert der elektrischen Feldstärke GW-E angegeben.

In allen Untersuchungsgebieten schöpfen 2009 die durchschnittlichen Einwirkungen die gesetzlichen Grenzwerte nur zu weniger als 1 % aus. An acht Messpunkten war die Grenzwertausschöpfung größer als 5 %, im höchsten Fall lag der Wert bei 11 %.

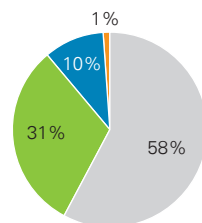
Den höchsten Anteil an den Gesamtimmissionen haben die leistungsstarken Rundfunk- und Fernsehsender, wobei sowohl Körperstromwirkung als auch thermische

Wirkung berücksichtigt sind. Im Bereich der thermischen Wirkung allein, also oberhalb der Frequenz 100 kHz, stellt der Mobilfunk mit rund 37 % die stärkste Gruppe dar. An zweiter Stelle folgen mit 28 % die Lang-, Mittel- und Kurzwellensender, gefolgt von den UKW-Sendern mit 16 % und den vorwiegend digitalen Fernsehsendern mit 13 %. Der Beitrag der BOS-Sendeanlagen (Feuerwehr- und Polizeifunk) und der sonstigen Funkdienste bleibt unter 6 % der thermischen Gesamtwirkung, siehe auf Seite 100 Abbildung oben.

Die Abbildung unten zeigt die durchschnittlichen Beiträge der wichtigsten Funkdienste innerorts und außerorts im Vergleich. Innerorts stellt der Mobilfunk die stärkste Einzelquelle bei der thermischen Wirkung dar und übertrifft die durch Rundfunksender verursachten Immissionen. Außerorts ist es umgekehrt. Ursache hierfür ist vor allem die unterschiedliche Reichweite der Sender. Innerhalb von Ortschaften ist das Mobilfunksendernetz deutlich dichter als außerhalb.



2003



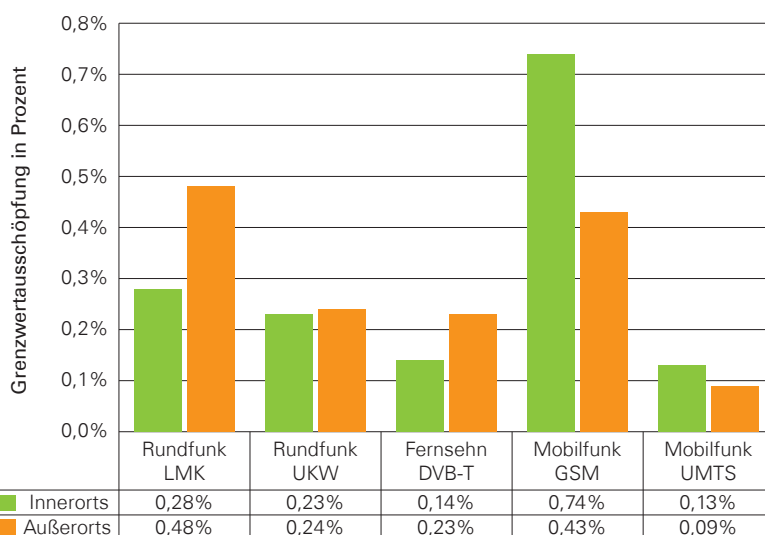
2009



Grenzwertausschöpfung (Prozent vom Grenzwert)

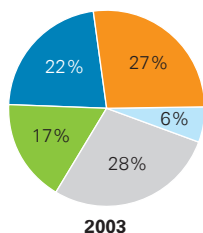
Verteilung der Gesamtimmissionen in allen vier Untersuchungsgebieten Baden-Württembergs in den Jahren 2003 und 2009. Im Jahr 2009 war an 58 % aller Messpunkte der Grenzwert zu weniger als 1 % ausgeschöpft (GW-E-Darstellung).

Quelle: LUBW

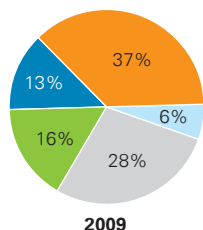


Durchschnittliche Beiträge (thermische Wirkung) ausgewählter Funkdienste innerorts und außerorts für das Jahr 2009 (GW-E-Darstellung). Quelle: LUBW

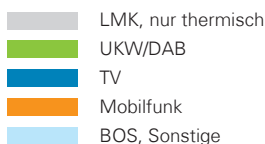
**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 22–31**



2003



2009



Prozentualer Anteil der Funkdienste an der durchschnittlichen Gesamtimmission in Baden-Württemberg in den Jahren 2003 und 2009. Quelle: LUBW

Fernseh- und Rundfunksender dagegen befinden sich in der Regel in größerer Entfernung von Siedlungen.

Zwischen 2003 und 2009 hat das Niveau der Einwirkungen durch Funkwellen insgesamt nicht zugenommen. Dies war aufgrund der generell intensiveren Nutzung der Funktechniken nicht zu erwarten. Die Anzahl der Messpunkte mit einer maximalen Gesamtimmission von weniger als einem Hundertstel des Grenzwertes ist sogar von 50 % auf 58 % angewachsen (siehe Abbildung auf S. 99).

Ursachen hierfür sind:

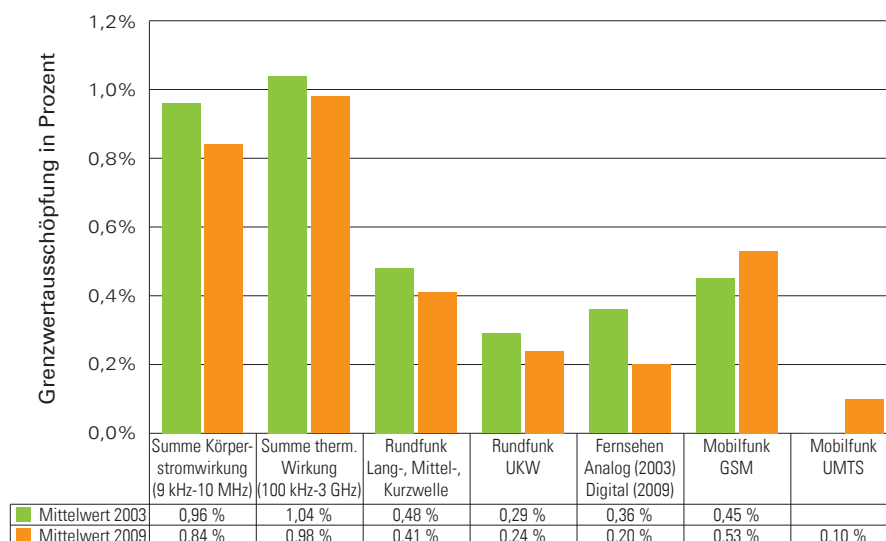
- Im Mittelwellenbereich wurden überregionale Sender abgeschaltet. Dadurch ist die durchschnittliche Einwirkung um mehr als 12 % gesunken.
- Fernsendeder mit analoger Sendetechnik wurden flächendeckend abgeschaltet, andererseits wurde der Sendebetrieb mit der digitalen Technik DVB-T noch nicht vollständig aufgenommen. Dadurch haben die durchschnittlichen Einwirkungen durch Fernsendeder um 45 % abgenommen.
- Auch im UKW-Bereich ist ein leichter Rückgang der Einwirkungen zu verzeichnen.

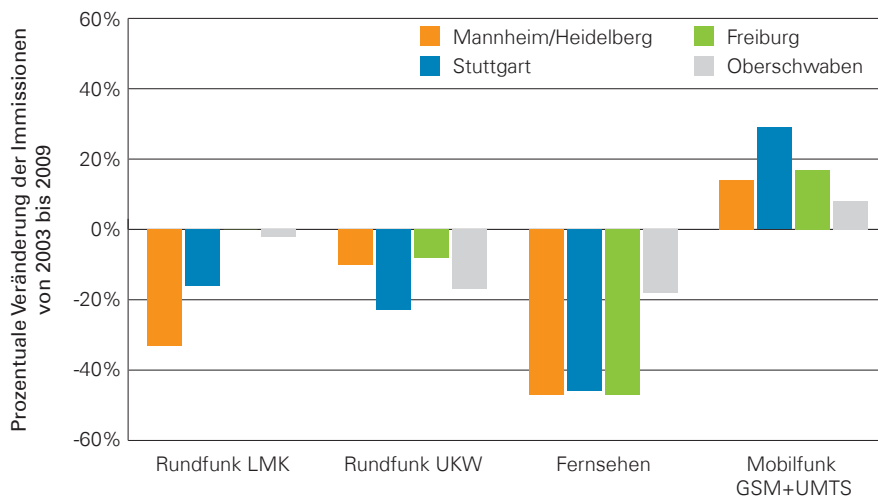
Demgegenüber führte die Verdichtung des GSM-Mobilfunknetzes zu einer Zunahme der Einwirkungen. Zusammen mit der flächendeckenden Einführung von UMTS wuchs die durchschnittliche Einwirkung aller Mobilfunknetze insgesamt um 23 %. Im Untersuchungsgebiet Stuttgart war ein Zuwachs von fast 30 % festzustellen. Diese Zunahme beim Mobilfunk ist jedoch bisher geringer als die Abnahme der anderen Einwirkungen. Im Ergebnis haben die Einwirkungen – bezogen auf die thermische Wirkung – seit 2003 daher nicht zugenommen.

Deutliche Veränderungen ergaben sich bei der Aufteilung der Funkdienste im Bereich der thermischen Wirkung. Aufgrund des Rückgangs des analogen Fernsehens hat sich der Anteil des Mobilfunks an den gesamten Einwirkungen von 27 % auf 37 % erhöht, siehe Abbildung links. Diese Zunahme ging zu Lasten der Anteile der Rundfunk- und Fernsendeder. Andere Funkdienste wie BOS und sonstige Sender spielen mit einem Anteil von 6 % nur eine untergeordnete Rolle.

In den Abbildungen unten und rechts oben sind die festgestellten Veränderungen zwi-

Veränderungen zwischen 2003 und 2009: Vergleich der Mittelwerte der Grenzwertausschöpfung einzelner Funkdienste (GW-E-Darstellung). UMTS wurde 2003 nicht erfasst. Quelle: LUBW





Prozentuale Veränderung der mittleren Einwirkungen einzelner Funkdienste zwischen 2003 und 2009 in den vier Untersuchungsgebieten. Quelle: LUBW

schen 2003 und 2009, differenziert nach Funkdiensten, sowohl landesweit als Mittelwert der Grenzwertausschöpfung als auch regional prozentual dargestellt. Die Abnahme beim Rundfunk und Fernsehen ist in allen Gebieten deutlich zu erkennen. Demgegenüber haben die Einwirkungen beim Mobilfunk zugenommen, am stärksten im Untersuchungsgebiet Stuttgart.

Eine ausführliche Projektbeschreibung mit weiteren Ergebnissen ist im Internet abrufbar [28]. Hier finden sich auch die detaillierten Messergebnisse für jeden einzelnen Messpunkt ausführlich dokumentiert und einsehbar.

4.11.3 VERGLEICH DER UNTERSUCHUNGEN

Die Ergebnisse der Messprogramme in Bayern und Baden-Württemberg sind nicht direkt miteinander vergleichbar.

Das Monitoring in **Bayern** konzentrierte sich von vornherein auf die bewohnten Gebiete. Die 400 Messpunkte lagen in keinem Fall weiter als 50 m von einem Wohnhaus entfernt, dafür jedoch weit über das ganze

Land verstreut. Die meisten Messungen erfolgten in größerer Entfernung zu Hörfunk- und Fernsehsendeanlagen.

In **Baden-Württemberg** wurde ein festes 2 km x 2 km Raster für die Lage der knapp 900 Messpunkte gewählt. Dieser statistische Ansatz gewährleistet, dass die Untersuchungsgebiete in der Fläche repräsentativ abgedeckt sind. Es wurden sowohl innerstädtische Bereiche mit hoher Bevölkerungsdichte als auch dünn besiedelte Teile des Landes erfasst.

Die Ergebnisse liegen für beide Bundesländer auf vergleichbarem Niveau weit unterhalb der Grenzwerte. Für Hörfunk und Fernsehen sind die Mittelwerte und Medianwerte in Baden-Württemberg höher: In allen vier Messregionen befinden sich leistungsstarke Hörfunk- und Fernsehsendeanlagen, in deren Umgebung wegen des festen Rasters auch gemessen wurde. Da sich in der Nähe solcher Sender keine Wohnbebauung befindet, spiegeln die bayrischen Messungen diesen Einfluss nicht so stark wider. Beim Mobilfunk liegen die Messwerte in ähnlicher Größenordnung.

5. Biologische Wirkungen

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 32–41**

5.1 EINFÜHRUNG

Elektromagnetische Felder können mit biologischen Systemen auf unterschiedliche Art und Weise wechselwirken. Grundsätzlich unterscheidet man:

- Ionisierende Strahlung, wie Ultraviolett-, Röntgen-, oder Gammastrahlung
- Nichtionisierende Strahlung, wie z. B. Radiowellen oder Mikrowellen.

Ionisierende Strahlung kann Bindungen zwischen Atomen und Molekülen im Körper auflösen, weil die Strahlungsenergie größer ist als die Bindungsenergien. Ionisierende Strahlung wird in diesem Heft nicht behandelt.

Bei nichtionisierender Strahlung ist die Strahlungsenergie immer kleiner als die Bindungsenergien. So beträgt z. B. die Strahlungsenergie von Mikrowellen (Frequenzbereich um 2 GHz) nur ein Hunderttausendstel der Energie, die benötigt wird, um Wasserstoffbrückenbindungen oder Kohlenstoffbindungen aufzulösen. Da jedoch im Stoffwechsel des menschlichen Körpers viele elektrische und elektrochemische Vorgänge ablaufen, deren Energiebilanzen teilweise in der Größenordnung der Strahlungsenergie nichtionisierender Strahlung liegen, ist prinzipiell eine Beeinflussung denkbar.

Nichtionisierende Strahlung kann direkt auf den Körper einwirken – z. B. durch Reizwirkung an Nervenbahnen oder Erwärmung von Gewebe – oder indirekt, z. B. über die Beeinflussung eines Herzschritt-

makers. Eine Wirkung kann dabei sofort (akute Wirkung) oder erst nach längerer Zeit (Langzeitwirkung, chronische Wirkung) auftreten.

Die derzeitige Grenzwertgebung und die Grenzwertempfehlungen internationaler Organisationen stützen sich auf eine Vielzahl von Studien zu den unterschiedlichsten Fragestellungen. Dabei hat sich gezeigt, dass nur ein Teil der untersuchten Wirkungen für den Gesundheitsschutz von Bedeutung ist.

In den folgenden Frequenzbereichen sind akute Wirkungen belegt:

Bei **statischen elektrischen Feldern** (Gleichfeldern) kommen Effekte wie Aufladen der Haare, Elektrisierung und Entladung vor. Starke magnetische Gleichfelder wechselwirken mit bewegten Ladungen wie z. B. Ionen im Blut und können indirekte Wirkungen auf magnetische Implantate haben.

Bei **niederfrequenten Feldern** dominieren die Reizwirkungen auf Sinnes-, Nerven- und Muskelzellen. Auslöser sind die durch elektrische und magnetische Felder im Gewebe hervorgerufenen Ströme. Für die Grenzwertgebung sind auch indirekte Effekte (siehe Abschnitt 5.2.2 und 5.6) zu berücksichtigen.

Im Übergangsbereich zwischen nieder- und hochfrequenten Feldern treten Reiz- und thermische Wirkungen auf.

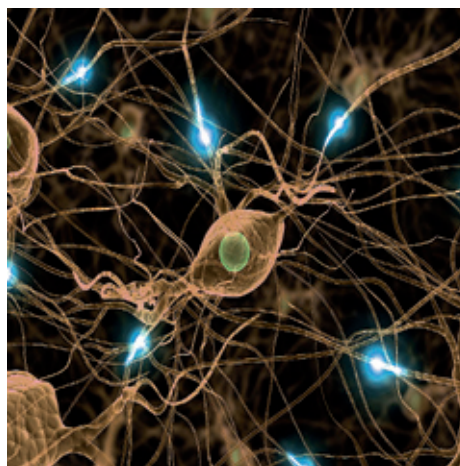
Bei **hochfrequenten Feldern** sind die thermischen Wirkungen vorherrschend, also eine Erwärmung des Körpers (bei Ganzkörperexposition) oder bestimmter Körperteile (bei Teilkörperexposition) durch Absorption elektromagnetischer Felder.

Im Folgenden werden akute und chronische Wirkungen nieder- und hochfrequenter Felder eingehend betrachtet. Künstlich erzeugte statische Felder, die stark genug sind, um gesundheitlich relevant zu sein (z. B. bei der Kernspintomographie), kommen in der Alltagswelt nicht vor. Sie werden daher nicht weiter besprochen.

Wenn von Effekten oder Wirkungen die Rede ist, dann bedeutet dies nicht zwangsläufig eine gesundheitliche Beeinträchtigung oder gar Gefährdung. Vielmehr sind eine Reihe der nachfolgend beschriebenen Wirkungen bzw. Effekte natürliche Reaktionen biologischer Systeme auf bestimmte äußere Einflüsse. So reagiert der Körper beispielsweise bei erhöhter Wärmezufuhr so lange mit vermehrter Schweißabsonderung, bis sich im Körper wieder die Normaltemperatur eingestellt hat (körpereigene Thermoregulation).

5.2 AKUTE WIRKUNGEN NIEDERFREQUENTER FELDER

Niederfrequente magnetische und elektrische Felder dringen mehr bzw. weniger in den Körper ein und wechselwirken dort mit dem Gewebe. Zudem können sie direkt auf Sinnesrezeptoren einwirken, beispielsweise auf die der Augen oder der Haut. Die Erregung der Sinnesrezeptoren kann Reaktionen von einer harmlosen Wahrnehmung bis hin zur Schmerzempfindung hervorrufen.



Im Bereich niederfrequenter Felder dominieren Reizwirkungen auf Sinnes-, Nerven- und Muskelzellen.

Quelle: Shutterstock

Niederfrequente **elektrische Felder** werden durch die Anwesenheit eines Körpers im Feld verzerrt. Auch Erdung und Ausrichtung des Körpers im Feld spielen dabei eine Rolle. Da der menschliche Körper bei niedrigen Frequenzen ein relativ guter elektrischer Leiter ist, stehen die elektrischen Feldlinien immer senkrecht auf seiner Oberfläche. Je nach Größe und Form des Körpers unterscheiden sich die Feldstärken auf der Körperoberfläche erheblich. So kann die elektrische Feldstärke im Kopfbereich des Menschen um das fast 20-fache erhöht sein. Hingegen kommt es im Bereich der unteren Extremitäten zu einer Absenkung der äußeren Feldstärke. Niederfrequente elektrische Felder dringen nur schlecht in den Körper ein. Die Feldstärke im Körper beträgt nur ca. ein Millionstel der Stärke des äußeren Feldes (vgl. Tabelle).

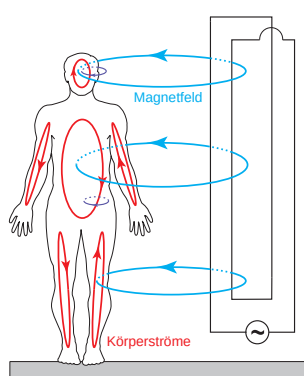
Mittleres induziertes elektrisches Feld in einem geerdeten Menschen, der in einem äußeren elektrischen Feld von 1 kV/m mit der Frequenz 50 Hz steht (nach EHC 238 der WHO von 2007)

Körperregion	Elektrische Feldstärke [mV/m]
Knochen	5,72
Haut	2,74
Lunge	1,09
Augenlinse	0,211

Niederfrequente **magnetische Felder** dagegen dringen praktisch ungestört in den Körper ein und erzeugen über Induktion im Körper elektrische Felder.

Die Stärke der induzierten Ströme und Stromdichten hängt insbesondere ab von

- der Frequenz,
- der magnetischen Flussdichte,
- der Ausdehnung des Feldes und
- der Fläche des durchdrungenen Körperquerschnitts.



Direkte Wirkung eines niederfrequenten magnetischen Wechselfeldes auf den menschlichen Körper. Quelle: LUBW

Unter Stromdichte ist dabei der elektrische Strom zu verstehen, der durch eine bestimmte Körper- bzw. Organfläche fließt. Die Einheit der Stromdichte ist Milliampere pro Quadratmeter (mA/m^2).

In einem weit ausgedehnten Magnetfeld nimmt die induzierte Stromdichte von der Körpermitte zur Oberfläche zu. Die höchsten Werte treten in den Randgebieten des Brustkorbs auf. Die Abbildung links stellt ein vereinfachtes Wirbelstrommodell für den Fall dar, dass ein magnetisches Wechselfeld senkrecht auf der Körperachse eines Menschen steht. Im Körper wird durch die hervorgerufenen Körperströme ein schwaches, dem äußeren Feld entgegen gerichtetes Magnetfeld erzeugt (siehe Abbildung links, rote Feldlinien im Körper).

Mittleres induziertes elektrisches Feld in einem Menschen, der in einem äußeren Magnetfeld von 1 mT mit der Frequenz 50 Hz steht (nach EHC 238 der WHO von 2007)

Körperregion	Elektrische Feldstärke in mV/m
Knochen	11,6
Haut	13,5
Lunge	8,22
Augenlinse	5,22

5.2.1 REIZWIRKUNGEN

Die durch äußere Felder im Körper erzeugten elektrischen Ströme bzw. Stromdichten können zu einer Reizung von Nerven und Muskeln führen, wenn bestimmte Schwellenwerte überschritten werden.

Die Tabelle auf der rechten Seite stellt die Wirkungen verschiedener Stromdichten am jeweiligen Wirkungsort des menschlichen Körpers für den Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 300 Hz im Überblick dar [30].

Unterhalb einer Stromdichte von $10 \text{ mA}/\text{m}^2$ sind nur sehr subtile Effekte bekannt. Erst oberhalb von $10 \text{ mA}/\text{m}^2$ nehmen die Sinnesrezeptoren der Haut oder des Sehorgans unterschiedliche Empfindungen wahr, die bei Wiederholung zu Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens führen können. Bei einigen medizinischen Anwendungen wird der Einfluss solcher Stromdichten auf das Knochenwachstum genutzt.

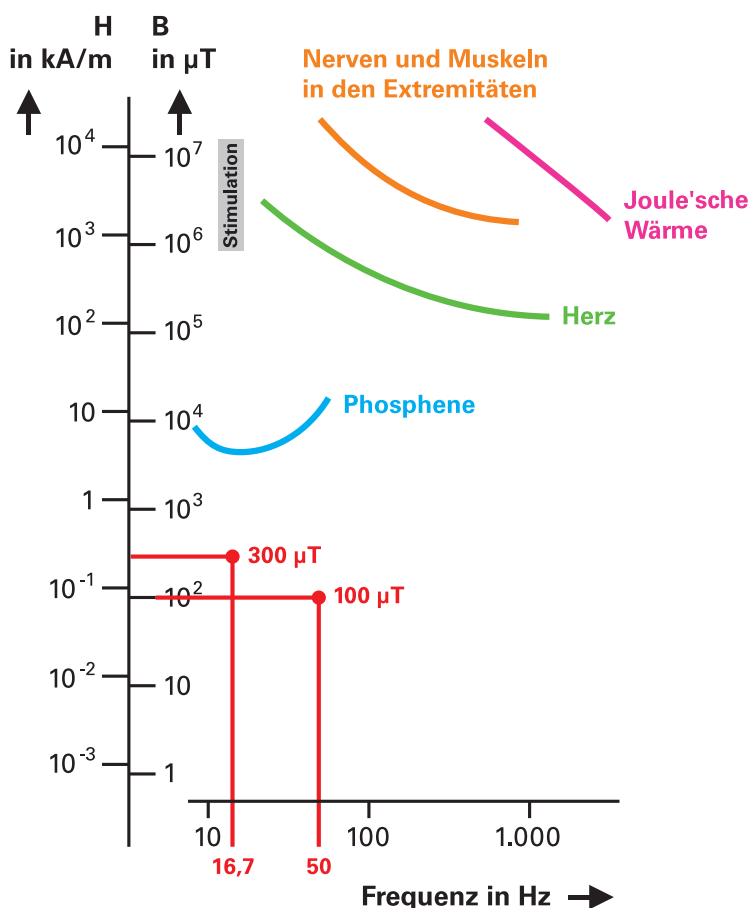
Akute Gefahren für die Gesundheit durch Erregung der Nerven-, Muskel- bzw. Herzfunktion treten erst bei örtlichen Körperstromdichten von mehr als $100 \text{ mA}/\text{m}^2$ auf. Stromdichten körpereigener Felder, die durch natürliche Erregung von Nerven entstehen, liegen bei bis zu $10 \text{ mA}/\text{m}^2$, im Herzmuskel und bei Gehirnzellen können lokal auch höhere natürliche Stromdichten auftreten.

Die Körperstromdichte wird verwendet, um so genannte Basisgrenzwerte festzulegen. Diese Basisgrenzwerte betragen im Frequenzbereich von 4 Hz bis 1 kHz für die allgemeine Bevölkerung $2 \text{ mA}/\text{m}^2$, bei beruflicher Exposition $10 \text{ mA}/\text{m}^2$ und bei überwachter Exposition in der medizinischen Diagnostik oder im Rahmen einer Therapie $100 \text{ mA}/\text{m}^2$.

Da Basisgrenzwerte in der Praxis schwierig nachzumessen sind, werden abgeleitete Grenzwerte eingesetzt. Diese geben an, welche äußeren elektrischen und magnetischen Felder erreicht werden dürfen, um die Basisgrenzwerte einzuhalten. Bei der Ableitung wird immer der ungünstigste Fall betrachtet (worst case).

Die Schwellen belegter Wirkungen niederfrequenter **Magnetfelder** beim Menschen sind in der Abbildung rechts dargestellt. Die niedrigste Schwelle gilt für die optische Wahrnehmung von Flicker-Effekten an der Peripherie des Sehfeldes, die auch als magnetische Phosphene bezeichnet werden. Das Minimum liegt bei etwa 20 Hz, im 50-Hz-Feld liegt die Schwelle bei mehr als 15 mT. Bei magnetischen Phosphenen handelt es sich um einen harmlosen Effekt, der nur während der Feldexposition auftritt. Mit einer ernst zu nehmenden Reizung des Herzmuskels im magnetischen 50-Hz-Feld ist erst oberhalb von 500 mT zu rechnen. Die Werte für eine überschwellige Reizung der peripheren Nerven und Muskeln in den Extremitäten liegen noch mindestens um den Faktor 5 höher.

In der 26. BImSchV sind Grenzwerte für magnetische 16,7-Hz- und 50-Hz-Felder festgelegt worden (300 μ T und 100 μ T), die um einen Sicherheitsfaktor von 50 unterhalb der niedrigsten Schwelle belegter Effekte liegen.



Schwellen belegter Wirkungen niederfrequenter magnetischer Felder beim Menschen im Vergleich zu den Grenzwerten der 26. BImSchV (rote Punkte).
Quelle: LUBW

Wirkungen verschiedener Körperstromdichten der von außen einwirkenden elektrischen und magnetischen Felder auf den Menschen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 300 Hz

Wirkungen	Körperstromdichte am Wirkungsort in mA/m ²
Deutliche Gesundheitsgefahren (Störung des Herzrhythmus, Herzkammerflimmern, Überschreiten der Loslassschwelle)	> 1.000
Mögliche Gesundheitsgefahren (Veränderungen in der Erregbarkeit der Zellen, Reizschwellen werden erreicht)	100–1.000
Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens möglich, Einfluss auf Knochenwachstum	10–100
Subtile biologische Effekte beim Menschen	1–10
Keine gesicherten Effekte	< 1

5.2.2 INDIREKTE WIRKUNGEN

Die in elektrisch leitfähigen Objekten wie Autos, Kränen oder Metallzäunen durch die Einwirkung starker elektrischer Wechselfelder erzeugten Oberflächenladungen sind umso größer, je stärker das elektrische Feld und je größer das gegenüber Erde isolierte Objekt (z. B. Auto mit Gummireifen) ist. Nähert man sich solchen Objekten, kann es zu Funkenentladungen kommen. Bei Berührung kann ein elektrischer Strom über den Körper zur Erde abfließen (in der Abbildung unten rot eingezeichnet). Dieser Effekt, der auch durch statische Aufladung ohne die Einwirkung eines elektrischen Feldes auftreten kann, ist aus dem Alltagsleben hinreichend bekannt. Beispiele hierfür sind Entladungsströme an Kraftfahrzeugen oder an Türgriffen nach dem Begehen isolierter Bodenbeläge.

Die biologischen Wirkungen solcher sich wiederholender Entladungen können von der Wahrnehmung über eine unwillkürliche Muskelkontraktion bis hin zur Schädigung des Organismus reichen. Das Ausmaß der Wirkung hängt dabei unter anderem ab von

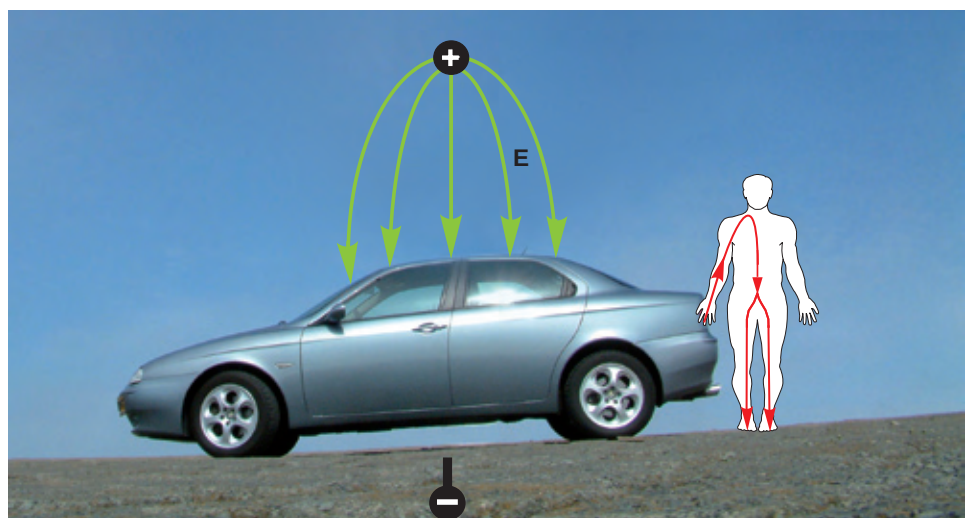
- dem Ableitwiderstand zur Erde,
- der Stärke und Dauer des Kontaktstromes,
- der Größe und Anordnung des Gegenstandes und
- der elektrischen Feldstärke.

Untersuchungen über die Wirkungen elektrischer Ströme und die sich daraus ergebenden Schwellenwerte zeigen, dass auch noch im Hochfrequenzbereich bis ca. 100 MHz indirekte Wirkungen durch Ableitströme zu beachten sind.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in der Tabelle rechts zusammengefasst [31]. Diese Schwellenwerte werden für die Beurteilung einer Gefahr durch elektrische Unfälle bei der Berührung von spannungsführenden Teilen herangezogen.

Diese indirekten Wirkungen sind nicht nur gesundheitsrelevant und gehen daher in die Grenzwertgebung ein, sondern sie sind auch ein möglicher Risikofaktor in der technischen Umwelt des Menschen. Durch die Einwirkung elektrischer oder magne-

Indirekte Wirkung eines elektrischen Feldes auf den Körper eines Menschen. Quelle: LUBW



Schwellenwerte für die Wirkungen elektrischer Ströme (Werte sind individuell verschieden, Kinder und Frauen besitzen niedrigere Wahrnehmungsschwellen)

Wirkungen	Frequenzabhängige Schwellenwerte der Stromstärke in mA			
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz	1 MHz
Schwerer elektrischer Schlag (Atemnot)	12–23	21–41	160–320	nicht bestimmt
Schmerzhafter elektrischer Schlag (Loslassschwelle)	8–16	12–24	112–224	nicht bestimmt
Schmerz bei Fingerkontakt	0,9–1,8	1,6–3,3	33–55	28–50
Berührungswahrnehmung bei Fingerkontakt	0,2–0,4	0,4–0,8	25–40	25–40

tischer Felder können wichtige elektrische oder elektronische Bauteile wie Airbags, ABS oder medizinische Geräte versagen. Um dieses Risiko zu minimieren, müssen solche Geräte eine bestimmte Störfestigkeit gegenüber Feldern aufweisen.

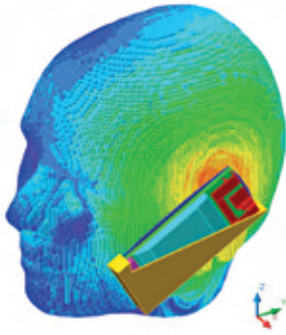
Auf den Spezialfall der Wechselwirkung mit Implantaten wird in Abschnitt 5.6 noch gesondert eingegangen.

5.2.3 WEITERE WIRKUNGEN

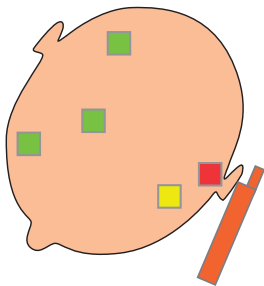
Darüber hinaus wurden weitere mögliche Wechselwirkungsmechanismen niederfrequenter Felder mit biologischer Materie diskutiert und untersucht, z. B. eine Einwirkung auf freie Radikale im Gewebe, verschiedene Möglichkeiten von Resonanzeffekten oder eine Kraftwirkung auf möglicherweise im Gewebe vorhandene magnetische Teilchen (Magnetite).

Ausgehend von solchen denkbaren primären Mechanismen wurden verschiedene Endpunkte in unterschiedlichen biologischen Systemen untersucht. Dabei betrachtete man unter anderem mögliche Auswirkungen auf das kardiovaskuläre System, das Immunsystem, das neuronale degenerative Geschehen und auf die Fortpflanzung und Entwicklung.

Die Weltgesundheitsorganisation WHO hat alle bisher diskutierten möglichen Wechselwirkungen niederfrequenter Felder einer umfassenden Bewertung unterzogen. Sie kommt zu dem Schluss, dass keine weiteren Mechanismen und Wirkungen identifiziert werden können, die eine Absenkung der Grenzwerte unterhalb der bisher empfohlenen Werte begründen könnten [32].



Exposition des Menschen durch
die hochfrequenten elektromagnetischen
Felder eines Handys
Quelle: IMST GmbH



- 10-g-Würfel, gering exponiert
- 10-g-Würfel, mäßig exponiert
- 10-g-Würfel, stark exponiert

Bestimmung des SAR-Wertes
am Kopf. Quelle: LfU

5.3 AKUTE WIRKUNGEN HOCHFREQUENTER FELDER

5.3.1 WÄRMEWIRKUNG

Als Basisgröße für die Beurteilung der Wirkung von Hochfrequenzstrahlung wird die Energie verwendet, die pro Zeiteinheit im Gewebe absorbiert wird. Diese spezifische Absorptions-Rate (SAR) wird in Watt pro Kilogramm (W/kg) ermittelt. Wird die absorbierte Leistung über den ganzen Körper gemittelt, erhält man den Ganzkörper-SAR-Wert. Werden nur Teile des Körpers exponiert, z. B. bei körpernahen Sendern, oder müssen Inhomogenitäten im Körper berücksichtigt werden wie bei der Augenlinse, so ist die Verwendung lokaler oder Teilkörper-SAR-Werte notwendig.

Die Ganz- oder Teilkörper-SAR-Werte werden in der Regel in 6-Minuten-Intervallen ermittelt. Diese Intervalle ergeben sich aus der thermischen Zeitkonstante, da erst nach etwa 6 bis 10 Minuten die Wärmeableitmechanismen (Wärmeleitung, Blutzirkulation) und die zugeführte Wärme ein Gleichgewicht erreichen.

Die im Körper hervorgerufenen Temperaturerhöhungen sind vom Ganzkörper-SAR-Wert abhängig. Unter Normalbedingungen führen beim erwachsenen Menschen Ganzkörper-SAR-Werte von 1 bis 4 W/kg zu einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von weniger als 1 °C. Durch körperliche Arbeit oder sportliche Betätigung kann eine wesentlich stärkere Körpererwärmung hervorgerufen werden. Beträgt der durchschnittliche Energieumsatz eines Menschen im Ruhezustand ungefähr 1 W/kg, erhöht er sich beim Gehen auf etwa 3 bis 5 W/kg. Dabei kann es zu einer Erwärmung um mehr als 2 °C kommen, ohne dass bei einem gesunden Menschen Beeinträchtigungen auftreten.

Die Reaktion des Organismus auf einen zusätzlichen Wärmeeintrag hängt auch von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der körpereigenen Thermoregulation ab. Die Thermoregulation kann bei Personen mit Fieber, bei Diabetikern, bei älteren Menschen und nach Einnahme bestimmter Medikamente vermindert sein. Ferner können Organe oder Gewebe mit geringer Wärmeleitfähigkeit und schlechter Durchblutung, zum Beispiel das Auge und der Hoden, die zugeführte Wärme schlechter abführen.

Bei der Bewertung von Hochfrequenzstrahlung verwendet man wie bei den niederfrequenten Feldern das Konzept der Basisgrenzwerte. Damit soll der Schutz des Menschen vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen gewährleistet werden. Den Basisgrenzwerten im Hochfrequenzbereich liegt ein Ganzkörper-SAR-Wert von 0,08 W/kg zugrunde. Damit wird sichergestellt, dass es auch für Ältere, Kranke oder Kinder nicht zu gesundheitlich beeinträchtigenden Temperaturerhöhungen kommen kann.

Der Basisgrenzwert wird dann in Feldstärken für das elektrische und das magnetische Feld außerhalb des Körpers umgerechnet. Diese abgeleiteten Grenzwerte sind aufgrund des im Abschnitt 5.3.3 genannten Absorptionsverhaltens und der je nach Körpergröße unterschiedlichen Resonanzfrequenzen stark frequenzabhängig.

Die festgelegten Grenzen für eine Temperaturerhöhung des gesamten Körpers im Hochfrequenzfeld gelten in gleicher Weise auch für einzelne Körperteile und Organe bei lokaler Erwärmung. Insbesondere im Nahbereich von Sendeantennen kann eine sehr ungleichmäßige Energieabsorption auftreten.

Wie in der Computersimulation gut zu sehen ist, erzeugt das Handy im Bereich des Ohres die höchste Leistungsflussdichte (Grafik links), sie kann hier um den Faktor 1.000 bis 2.500.000 stärker als die des Mobilfunkmasten sein. Das ist damit zu erklären, dass der Abstand der Handyantenne zum Kopf nur wenige Millimeter beträgt, während der Abstand zur Basisstation in der Regel bei mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern liegt.

Um eine übermäßige Erwärmung einzelner Körperteile (insbesondere des Auges) zu vermeiden, ist es wichtig, die absorbierte Leistung am Körper zu begrenzen und zusätzlich zu Ganzkörper-SAR-Werten eine Begrenzung durch einen Teilkörper-SAR-Wert einzuführen.

Eine übermäßige Erwärmung kann ausgeschlossen werden, wenn sich keine Stelle am Körper als Folge der Absorption um mehr als 1 °C erwärmt. Dies ist bei einem Teilkörper-SAR-Wert von 10 W/kg auch unter ungünstigen Bedingungen gegeben. Aus Vorsorgegründen wird noch ein Sicherheitsabschlag von Faktor 5 vorgenommen.

Daraus ergibt sich insgesamt, dass nach der in Deutschland gültigen Norm die SAR eines Handys über jeweils 10 g Körpergewebe gemittelt wird und an keinem Ort den Wert von 2 W/kg überschreiten darf.

Die Abbildung links unten zeigt schematisch die Exposition im Inneren des menschlichen Kopfes. Bei der messtechnischen Bestimmung des SAR-Werts eines Handys bei maximaler Sendeleistung muss nach dem am stärksten exponierten 10-g-Würfel gesucht werden. Die SAR-Messung erfolgt mit Hilfe eines sogenannten SAM-Phantoms, einer Kunststoffwanne, die mit gewebeäquivalenter Flüssigkeit gefüllt ist. Ein mit maximaler Sendeleistung funkendes Handy wird in genau definiertem Winkel an den Kopf des Phantoms gehalten. Die an einem Roboterarm befestigte Messsonde zeichnet im gesamten Innenbereich des Phantoms die elektrische Feldstärke auf. Aus der höchsten gemessenen Feldstärke wird der SAR-Wert des Handys berechnet. Gemessen wird sowohl mit dem Handy links als auch rechts am Kopf, wobei der höhere Wert bei den Handydaten als SAR-Wert angegeben wird.



Messung des SAR-Werts eines Handys: Die Messsonde (schwarz) am Roboterarm (orange) ermittelt im flüssigkeitsgefüllten SAM-Phantom (weiß) den Ort der höchsten Feldstärke.
Quelle: IMST GmbH

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 32–41**

5.3.2 HOCHFREQUENZTHERAPIE

In der Medizin nutzt man die Hochfrequenztherapie, um durch lokale Temperaturüberhöhungen einen therapeutischen Effekt zu erzielen, zum Beispiel zur Anregung des Stoffwechsels, Verbesserung der Durchblutung oder Schmerzreduktion. Dabei wird das Gewebe gezielt Teilkörper-SAR-Werten von 10 bis mehr als 50 W/kg ausgesetzt. Im Unterschied zur Rotlichtbehandlung, bei der die Infrarotwellen hauptsächlich die Hautoberfläche erwärmen, wirkt die Behandlung auch in der Gewebetiefe.

Die Kurzwellentherapie verwendet elektrische bzw. magnetische Felder mit einer Frequenz von 13,5 MHz, 27,12 MHz oder 40,7 MHz. Die umgesetzte Leistung beträgt bis zu 400 W. Die periodischen Ladungswechsel unter dem Einfluss des elektrischen Feldes bewirken eine gleichmäßige Durchwärmung des behandelten Gewebes. Das magnetische Wechselfeld einer Spule führt vor allem zur Erwärmung der gut leitenden Strukturen wie Bindegewebe und Muskulatur. Die Mikrowellentherapie ist der Kurzwellentherapie sehr ähnlich. Die elektro-

magnetischen Wellen der Frequenz 2.450 MHz werden mit Hilfe von speziellen Strahlern gebündelt an das Gewebe abgegeben, wo sie absorbiert und mit Leistungen bis zu 200 W in Wärme umgesetzt werden. Die Eindringtiefe von Mikrowellen ist geringer als von Kurzwellen.

5.3.3 ABSORPTION HOCHFREQUENTER STRALUNG

Sobald hochfrequente elektromagnetische Strahlung in biologisches Gewebe eindringt, erfolgt eine Umwandlung der Strahlungsenergie durch unterschiedliche Mechanismen.

Abhängig von physikalischen Eigenschaften wie z. B.

- der Frequenz des elektromagnetischen Feldes,
- der Leitfähigkeit des Gewebes und
- der Größe der vorhandenen Moleküle oder der Ladung von Ionen

kann es zu Polarisierungseffekten, Orientierungsschwingungen permanenter Dipole (z. B. Wasser), Schwingungs- und Rotationsbewegungen innerhalb von Molekülen oder Verschiebung freier Ladungsträger kommen.

*Kurzwellentherapie (links):
Hochfrequente Felder
(27,12 MHz) erwärmen die
behandelten Körperteile auch in
der Tiefe.*

*Mikrowellentherapie (rechts):
Mikrowellen (2450 MHz) ver-
ursachen eine oberflächennahe
Erwärmung.*

*Quelle: PHYSIOMED ELEKTRO-
MEDIZIN*



Bei all diesen Vorgängen entsteht infolge von Reibungsverlusten Wärme im Gewebe, was zu einer Temperaturerhöhung einzelner Körperteile oder des ganzen Körpers führen kann.

Die Absorption von Hochfrequenzstrahlung durch den menschlichen Körper ist stark frequenzabhängig: Die Eindringtiefe der Strahlung wird mit steigender Frequenz kleiner, das heißt, dass die Strahlungsenergie auf einem kürzeren Wegstück durch den Körper absorbiert, also in andere Energieformen umgewandelt wird. So beträgt beispielsweise bei 0,5 GHz die mittlere Eindringtiefe in Muskelgewebe ungefähr 17 mm, bei 2,45 GHz (Mikrowellenherd) noch 6 mm und oberhalb von 10 GHz nur noch 0,2 mm oder weniger.

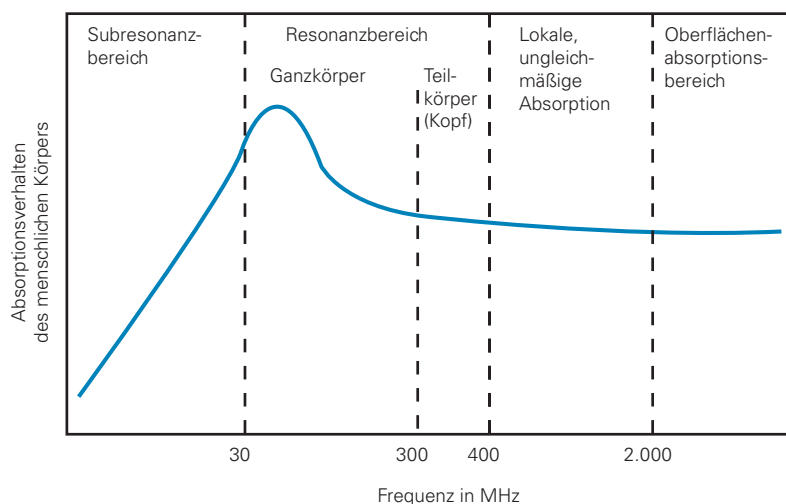
Neben der Frequenz hängt die Eindringtiefe hochfrequenter Strahlung in den Körper auch stark vom Wassergehalt des jeweiligen Gewebes ab. Bei Knochengewebe mit relativ geringem Wassergehalt ist die Eindringtiefe wesentlich höher als beispielsweise bei Nieren- oder Muskelgewebe mit hohem Wassergehalt.

Die Abbildung unten zeigt die Frequenzabhängigkeit des Absorptionsverhaltens. Im

so genannten Subresonanzbereich (bis etwa 30 MHz) ist die Wellenlänge viel größer als die Körperabmessungen. Hier ist die Eindringtiefe der Strahlung groß. Für den Körper eines Erwachsenen kommt es bei ungefähr 70 bis 100 MHz zur maximalen Absorption, da dann die Körperabmessungen und die Wellenlänge der Felder von ähnlicher Größenordnung sind. Man spricht vom „Antenneneffekt“, wenn die Körpergröße der halben Wellenlänge entspricht.

Aufgrund der geringeren Körperabmessungen liegt die Resonanzfrequenz für Kinder höher als bei Erwachsenen, entsprechend wird durch die Körperhaltung (z. B. sitzend) die Absorption beeinflusst. Im Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz ist die Wellenlänge der hochfrequenten Strahlung im Verhältnis zu den menschlichen Abmessungen klein, es kommt zu Teilkörperabsorption und schließlich zu reiner Oberflächenabsorption.

Bei der Übertragung von Ergebnissen aus Tierversuchen auf den Menschen muss beachtet werden, dass die Resonanzfrequenz der hochfrequenten Strahlung für kleine Versuchstiere wesentlich höher ist als beim Menschen (bei der Maus bei ungefähr 2,45 GHz), so dass Aussagen zum Frequenzbereich entsprechend relativiert werden müssen.



Absorptionsverhalten des menschlichen Körpers (Erwachsener) in Abhängigkeit von der Frequenz. Quelle: LUBW

5.3.4 WEITERE WIRKUNGEN

Weitere akute Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung werden oft als „athermische Wirkungen“ bezeichnet, um sie von den Wärmewirkungen abzusetzen. Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, wird nach dem Eindringen hochfrequenter Strahlung die Strahlungsenergie durch Wechselwirkungsprozesse in verschiedene andere Energieformen umgewandelt, bis schließlich durch Reibungseffekte (Dissipation) Wärme entsteht. Daher berücksichtigt das bestehende Grenzwertkonzept bereits wesentliche athermische Aspekte.

Um bestehende Kenntnislücken zu schließen, wurden im Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) in den Jahren 2002 bis 2008 insgesamt über 50 Studien durchgeführt.

Im Bereich Wirkungsmechanismen beschreibt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) den **Wissensstand vor Beginn des Forschungsprogramms** zusammenfassend wie folgt [33]:

Aus nicht reproduzierten Studien lagen einzelne Hinweise vor, dass bei Feldintensitäten unterhalb der Grenzwerte durch hochfrequente elektromagnetische Felder

- Schäden des Erbguts (DNS),
- Veränderungen der Umsetzung der genetischen Information in Zellproteine (Genexpression),
- Veränderungen im Zellstoffwechsel, der Zellfunktionen und der Stressreaktion in Zellen und
- für Zellen schädliche reaktive Sauerstoffspezies (ROS).

entstehen können. Des Weiteren wurde die Hypothese formuliert, dass das Hormon Melatonin bei Einwirken der hochfre-

quenten Felder in geringerem Maße gebildet werde. Dies könnte wiederum einen begünstigenden Einfluss auf die Brustkrebsentstehung nach sich ziehen, bei der Melatonin eine Rolle zu spielen scheint.

Es wurden Einflüsse auf das Hörsystem postuliert, da das Ohr das bei der Handynutzung am stärksten exponierte Organ ist. Hochfrequente Felder wurden auch als Auslöser für Tinnitus diskutiert. Es wurden Einflüsse auf das Auge und das gesamte visuelle System zu Bedenken gegeben.

Weiterhin wurde die Hypothese aufgestellt, dass die im GSM-Standard durch das Zeitschlitzverfahren hervorgerufene zusätzliche Frequenz von 217 Hz spezifische Wirkungen im menschlichen Organismus hervorrufen könne (Demodulation).

Das BfS fasst die **Ergebnisse der Studien des Forschungsprogramms** aus diesem Bereich wie folgt zusammen [33]:

„Soweit die Studien zu Wirkmechanismen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des DMF abgeschlossen sind, gibt es aus Sicht des BfS derzeit keine Hinweise auf neue Ansatzpunkte bzw. weiteren Forschungsbedarf zu möglichen Wirkmechanismen. Die Arbeiten zur DNS-Schädigung und zur differentiellen Genexpression sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen. Hierüber wird gesondert berichtet.“

Detaillierte Informationen zum Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm und den einzelnen Forschungsprojekten, die im Rahmen des DMF durchgeführt wurden, finden sich im Internet [34].

5.4 LANGZEITWIRKUNGEN

Die meisten Studien zu Langzeitwirkungen nieder- und hochfrequenter Felder untersuchen einen möglichen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und Krebs. Dabei geht es entweder um seine Entstehung (Krebsinitiation) oder seine Förderung (Krebspromotion). Bis heute konnten in den verschiedensten Forschungsprogrammen weltweit weder allgemein anerkannte Dosis-Wirkungs-Beziehungen noch die für eine mögliche Krebsentstehung maßgeblichen Wirkungsmechanismen ermittelt werden. Es gibt jedoch epidemiologische Studien, die auf die Möglichkeit eines Zusammenhangs hinweisen und daher bei der Bewertung genau betrachtet werden müssen.

5.4.1 NIEDERFREQUENTE FELDER UND KREBS

Im Jahr 2002 hat die IARC (International Agency for Research on Cancer) niederfrequente 50-Hz-Felder aufgrund der Ergebnisse epidemiologischer Studien zu Leukämie bei Kindern als „möglicherweise krebserregend“ (2b) eingestuft.

Für die Einstufung der verschiedensten Umweltagenzien und Chemikalien verwendet die IARC eine Skala mit fünf Stufen, die in der Tabelle unten dargestellt sind.

In einer umfassenden Bewertung niederfrequenter Felder durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) wurden neben den bestehenden Untersuchungen alle neueren Studien zur Krebsinitiation und -promotion nochmals genau beurteilt. Aufbauend auf dieser aktuellen Bewertung hat die WHO ein begleitendes „Fact Sheet“ mit dem Titel „Electromagnetic fields and public health – exposure to extremely low frequency fields“ auf ihrer Internetseite veröffentlicht, in dem u. a. Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise dargelegt werden [35].

Die wesentlichen Aussagen der WHO in diesem Fact Sheet sind nach BfS:

- Die neuen epidemiologischen Studien geben keinen Anlass, die Einschätzung zu ändern, dass Magnetfelder „möglicherweise kanzerogen“ sind. Allerdings ist die Aussagekraft der epidemiolo-

Skala der IARC zur Einstufung verschiedener Umweltagenzien und Chemikalien

Gruppe 1 – „für Menschen krebserregend“	ca. 100 Stoffe, z. B. Asbest, Cadmium, Radon und seine Zerfallsprodukte
Gruppe 2a – „für Menschen wahrscheinlich krebserregend“	über 50 Stoffe, z. B. Acrylamid (entsteht bei starkem Anbraten), Bitumendämpfe und Abgase von Dieselmotoren
Gruppe 2b – „für Menschen möglicherweise krebserregend“	über 200 Stoffe, z. B. sauer eingelegtes Gemüse und Kaffee, niederfrequente elektromagnetische Felder
Gruppe 3 – „nicht klassifizierbar“	ca. 500 Stoffe, z. B. Tee und Saccharine
Gruppe 4 – „für Menschen wahrscheinlich nicht krebserregend“	Caprolactam

gischen Studien durch methodische Probleme geschwächt (Grund: ein möglicher Selektionsbias). Zudem ist der zugrunde liegende Wirkmechanismus unbekannt und die epidemiologischen Beobachtungen werden von zahlreichen Studien am Tiermodell nicht unterstützt.

- Kindliche Leukämie ist bezogen auf die Weltbevölkerung eine relativ seltene Krankheit (weltweit etwa 49.000 neue Fälle pro Jahr). Ebenfalls selten ist die zeitlich gemittelte häusliche Magnetfeldexposition über $0,3 \mu\text{T}$ (nur etwa 1 % bis 4 % der Kinder sind über $0,3 \mu\text{T}$ exponiert). Wäre der beobachtete statistische Zusammenhang kausal, dann könnten weltweit zwischen 100 und 2.400 Fälle pro Jahr auf erhöhte Magnetfeldexpositionen zurückgeführt werden. Dies bedeutet, dass das berechnete Ausmaß begrenzt ist, selbst wenn Magnetfelder das Risiko tatsächlich erhöhen würden.
- Studien zu anderen Auswirkungen wie Krebs bei Erwachsenen, Depression und Selbstmord, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Entwicklungsstörungen, immunologische Veränderungen, Verhaltensänderungen, etc. zeigen keine Beeinflussungen durch Magnetfelder.

Die WHO empfiehlt:

- Um akute und gut untersuchte gesundheitsrelevante Wirkungen von Magnetfeldern zu vermeiden, sollten die Länder die auf internationaler Ebene erarbeiteten Grenzwertempfehlungen (ICNIRP 1998) einführen. (Dies ist in Deutschland durch die 26. BImSchV bereits erfolgt.) Bei Langzeitwirkungen wird die Wahrscheinlichkeit eines Kausalzusammenhangs zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition als schwach angesehen.

Nach Ansicht der WHO ergeben sich daraus folgende weitere Empfehlungen:

- Die Regierungen und die Industrie sollten die Forschung beobachten und Forschungsprogramme initiieren mit dem Ziel, die wissenschaftlichen Unsicherheiten zu reduzieren.
- Die Kommunikation mit allen zu Beteiligten (Stakeholdern) sollte forciert werden. Das betrifft auch die Koordination und Konsultation zwischen der Industrie, den örtlichen Behörden sowie den Bürgerinnen und Bürgern bereits in der Planungsphase für neue Anlagen zur elektrischen Energieversorgung.
- Es sollten Wege der Expositionsreduzierung beschritten werden, z. B. im Rahmen der Planung neuer Hochspannungsleitungen, Umspannwerke oder Geräte. Angemessene Maßnahmen zur Expositionsminimierung können von Land zu Land verschieden ausfallen. Willkürlich gesetzte, niedrigere Expositionsgrenzwerte werden als nicht gerechtfertigt angesehen.

Das BfS trägt die WHO-Empfehlungen zum vorsorglichen Gesundheitsschutz mit. Vor diesem Hintergrund plant das BfS, vor allem die Forschung zur Klärung der Datenlage zu intensivieren und die Kommunikation in diesem Bereich zu verstärken. Es wird empfohlen, Maßnahmen zur Expositionsminimierung im Sinne der WHO-Empfehlung bei Planung und Neubau von Anlagen sowie bei Geräteentwicklungen, aber auch im privaten Bereich zu berücksichtigen. Das BfS hat einen entsprechenden Maßnahmenkatalog erstellt.

5.4.2 HOCHFREQUENTE FELDER UND KREBS

Als Hauptquelle für eine langzeitige höhere Exposition mit Hochfrequenzfeldern kommen starke Radio- und Fernsehsender in Frage. In der Vergangenheit wurde eine Reihe von epidemiologischen Untersuchungen in der Nähe solcher Sender durchgeführt, die jedoch nach Aussage von Expertenkommissionen teilweise methodische Probleme hatten oder inkonsistent waren. Daher war zu dieser Fragestellung im Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) eine Studie enthalten.

Nach Prüfung dieser und weiterer neuer Studien kommt das BfS in seinem Abschlussbericht zum DMF (Mai 2008) zu folgender Aussage [36]:

■ Die neueren aussagekräftigeren Studien zum Kinderkrebsrisiko durch die Felder von Radio- und Fernsehsendern, die anstelle eines ökologischen Studienansatzes eine retrospektive individuelle Abschätzung der Exposition vorgenommen haben, schwächen deutlich die bisher inkonsistenten Einzelbefunde eines erhöhten Risikos aus ökologischen Studien. Nach Gesamtschau aller Studien und dem Fehlen einer biologischen Erklärung ergibt sich nach Meinung des BfS wenig Evidenz für einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang.

Einen möglichen Zusammenhang von Mobilfunkstrahlung und Krebs untersucht man am besten an viel telefonierenden Handynutzern, da die Exposition durch Basisstationen wesentlich schwächer ist. Dennoch wurden einzelne Studien in der Umgebung von Mobilfunksendern durchgeführt. Auf eine Bewertung solcher Studien wird in Abschnitt 5.7 hingewiesen.

Bereits im Jahr 2000 wurde die groß angelegte internationale Interphone-Studie über den möglichen Zusammenhang zwischen Handynutzung und dem Risiko, an einem Tumor im Kopfbereich zu erkranken, konzipiert. Die Studie wurde durch die EU, die Industrie und nationale Stellen der beteiligten 13 Länder finanziert und von der WHO koordiniert. Teilgenommen haben insgesamt etwa 6.500 Patienten aus 13 Ländern. Dabei wurde untersucht, ob die Erkrankten in der Vergangenheit mehr mobil telefoniert hatten als die gleich große Gruppe der Kontrollpersonen.

Im Mai 2010 wurden erste zusammengefasste Ergebnisse aus der INTERPHONE-Studie über mögliche Langzeitfolgen der Mobilfunknutzung veröffentlicht. In der fachlichen Stellungnahme des Bundesamtes für Strahlenschutz wird zusammengefasst [37]:

„Insgesamt wurde kein erhöhtes Risiko für Gliome oder Meningeome beobachtet, das auf die Nutzung von Mobiltelefonen zurückgeführt werden könnte. Es zeigen sich Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für Gliome bei der höchsten Expositionsgruppe, aber aufgrund von möglichen Verzerrungen und Fehlern ist eine kausale Interpretation dieses Zusammenhangs nicht möglich.

An der INTERPHONE-Studie haben nur Erwachsene teilgenommen, so dass sich aus der Studie keine Aussage über das Risiko der Mobiltelefonnutzung bei Kindern und Jugendlichen ableiten lässt. Nach heutigen Maßstäben waren die Mehrheit der Studienteilnehmer keine intensiven Mobiltelefonnutzer.

Die Nutzung von Mobiltelefonen hat stark zugenommen. Für Jugendliche und junge Erwachsene ist die Benutzung eines Mobiltelefons für eine Stunde am Tag oder sogar mehr nicht ungewöhnlich. Es ist daher dringend notwendig, die möglichen Auswirkungen von langjährigem intensivem Gebrauch von Mobiltelefonen genauer zu untersuchen, insbesondere bei Personen, die bereits in jungem Alter angefangen haben, häufig Mobiltelefone zu benutzen.“

5.4.3 WEITERE LANGZEITWIRKUNGEN HOCHFREQUENTER FELDER

Den Wissensstand vor Beginn des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms zu weiteren Langzeitwirkungen von Hochfrequenzstrahlung fasst das BfS wie folgt zusammen [33]:

- Aus in vivo- und in vitro- Studien lagen Hinweise vor, dass im Falle einer chronischen Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke erhöht werden könne.
 - Aus nicht reproduzierten tierexperimentellen Studien lagen Hinweise darauf vor, dass hochfrequente elektromagnetische Felder Lernen und Kognition negativ beeinflussen könnten.
 - Weiterhin mangelte es an tierexperimentellen Langzeitstudien über mehr als eine Generation hinweg, vor allem zum Mobilfunkstandard UMTS, dessen Signalcharakteristik sich von der GSM-Signalcharakteristik wesentlich unterscheidet. Generell bestand die Besorgnis, dass Kinder besonders empfindlich gegenüber negativen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder sein könnten. Epidemiologische Studien zu Langzeiteffekten durch Mobilfunk bei Kindern fehlten völlig.
 - Auch einen Einfluss auf das Hörsystem könnte man sich bei einer langen Exposition durch hochfrequente Felder vorstellen. In Ermangelung einer Erklärung zur Entstehung des Tinnitus wurde die Hypothese aufgestellt, dass der chronische Einfluss hochfrequenter Felder eine Ursache für die Entstehung dieses Phänomens sein könne.
- Als Ergebnis stellte das BfS fest:
- Durch die Studien des DMF wird die Hypothese einer Schädigung der Blut-Hirn-Schranke durch hochfrequente elektromagnetische Felder unterhalb der Grenzwerte nicht gestützt. Dies gilt sowohl für eine chronische Ganzkörperexposition, die auch vorgeburtliche Entwicklungsstadien bei Tieren umfasste, als auch für eine lokale akute Exposition am Kopf.
- In keiner der über drei und vier Generationen hinweg durchgeführten tierexperimentellen Studien mit ununterbrochener Exposition von Mobilfunkfeldern fanden sich Hinweise auf eine negative Beeinflussung des Immunsystems, sehr empfindlicher Nervenzellen (CA1-Neuronen) sowie der Stressantwort. Ebenso konnten keine Hinweise auf eine negative Beeinflussung von Lernen und Kognition gefunden werden.
 - Bei chronischer Ganzkörperexposition zeigte sich kein schädigender Einfluss auf Fortpflanzung und Entwicklung.
 - In einem etablierten und validierten Tiermodell für Tinnitus wurde ein möglicher Einfluss einer chronischen Exposition durch hochfrequente Felder auf die Entstehung des Tinnitus untersucht. Weder unterhalb noch oberhalb des Teilkörpergrenzwertes von 2 W/kg und weder in Verhaltenstests noch auf molekularer Ebene wurden Hinweise auf die Induktion von Tinnitus gefunden.

5.5 BEFINDLICHKEITSSTÖRUNGEN

Es gibt Menschen, die ihre z. T. starken Beschwerden auf alltagsbedingte Felder zurückführen. Bereits 1996/1997 hat eine Expertengruppe im Auftrag der Europäischen Kommission einen umfassenden Bericht zu dieser Thematik erstellt. Demnach werden Personen, die gesundheitliche Probleme der Verwendung oder der Nähe von Quellen elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder zuschreiben, als **elektrosensible Menschen** bezeichnet. Die Expertengruppe erfasste unter anderem die Verbreitung in Europa, genannte Symptome und Behandlungsmöglichkeiten.

Die Zuweisung der Symptome auf bestimmte Feldquellen hat sich seither verschoben. Mit dem starken Anwachsen der Mobilfunknutzung nach 2000 wurde verstärkt der Mobilfunk als Grund für eine Elektrosensibilität genannt und weniger die niederfrequenten Felder, die durch Haushaltsgeräte oder die Stromversorgung entstehen.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat im Jahr 2005 den Kenntnisstand im Fact Sheet 296 zusammengefasst. Darin heißt es [38]:

■ Elektrosensibilität ist durch eine Vielzahl unspezifischer Symptome gekennzeichnet, die von Fall zu Fall variieren. Die Symptome sind zweifellos real und können in ihrem Schweregrad stark schwanken. Was auch die Ursache der Störung sein mag, Elektrosensibilität kann für die betroffene Person stark beeinträchtigend sein. Es gibt keine eindeutigen Diagnosekriterien für Elektrosensibilität und es gibt auch keine wissenschaftliche Basis, um die Symptome mit der Einwirkung elektroma-

gnetischer Felder in Verbindung zu bringen. Überdies ist Elektrosensibilität weder ein medizinisches Krankheitsbild noch steht fest, dass es sich um ein eigenständiges medizinisches Problem handelt.

Um bestehende Kenntnislücken zu schließen, wurden im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms (DMF) auch mehrere Untersuchungen zu Befindlichkeitsbeeinträchtigungen durchgeführt. Im Abschlussbericht vom Mai 2008 zieht das Bundesamt für Strahlenschutz folgendes Fazit [36]:

■ Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern (EMF) und den Beschwerden elektrosensibler Personen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. Auch für die von den Betroffenen behauptete, im Vergleich mit der Allgemeinheit erhöhte Belastung mit Allergien und Chemikalien bzw. eine geringere Entgiftungskapazität der Leber ergaben sich keine Belege. Hinsichtlich sonstiger medizinischer Parameter wurden bei den elektrosensiblen Personen teilweise Abweichungen von der Allgemeinbevölkerung bzw. von den entsprechenden Kontrollpersonen gefunden. Es zeigte sich, dass die Elektrosensiblen eine heterogene Gruppe darstellen, die nicht mit einem einfachen Modell zu beschreiben ist. Als mögliche Erklärung für das Entstehen bzw. die Aufrechterhaltung der Elektrosensibilität bietet sich aber nach den Ergebnissen im DMF eine fehlerhafte Verarbeitung von Umwelteinflüssen bzw. eine schlechtere Anpassungsfähigkeit des Nervensystems an Umweltreize an.

5.6 BEEINTRÄCHTIGUNGEN BEI IM- PLANTATEN UND KÖRPERHILFEN

Implantate und Körperhilfen werden teils aus Kunststoff (zum Beispiel künstliche Herzklappen), teils aus Metall (künstliche Gelenke) oder auch aus einer Kombination von beidem hergestellt. So genannte aktive Implantate und Körperhilfen wie Herzschrittmacher, Nervenstimulatoren, implantierte Insulinpumpen oder Hörprothesen sind zusätzlich mit elektronischen Schaltkreisen ausgestattet.

Aktive Implantate und Körperhilfen können sowohl durch niederfrequente als auch durch hochfrequente Felder gestört werden. Dabei kommt es entscheidend auf die Störsicherheit des jeweiligen Geräts an. Metallische Prothesen können sich in seltenen Fällen in starken Hochfrequenzfeldern erwärmen und so zu einer Schädigung des umliegenden Gewebes führen.

Eine längere Störung von lebenserhaltenden aktiven Implantaten kann nicht nur

während der Exposition, sondern auch noch wesentlich später zu lebensbedrohlichen Situationen führen (z. B. bei Insulinpumpen).

Träger technischer oder aktiver Implantate sollten daher Fragen zur **elektromagnetischen Verträglichkeit** auf jeden Fall mit ihrem behandelnden Arzt abklären.

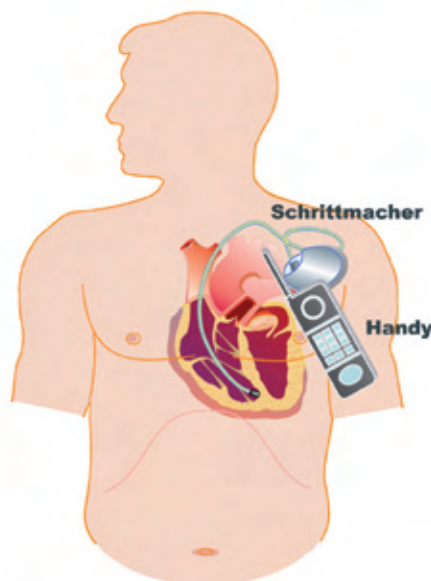
Eines der am häufigsten verwendeten aktiven Implantate ist der Herzschrittmacher. In Deutschland lebten 2007 ca. 500.000 Personen mit einem solchen Implantat. Daher dient der Herzschrittmacher hier als Beispiel für mögliche Wechselwirkungen von elektromagnetischen Feldern mit aktiven Implantaten. Dies kann analog auf andere aktive Implantate übertragen werden.

Der eigentliche Schrittmacher wird entweder im Bereich des Schlüsselbeins oder der Leiste implantiert, zum Herzen führt eine isolierte Zuleitung mit einer Elektrode (siehe Abbildung unten).

Die kritischste Einkopplung der elektromagnetischen Felder erfolgt in der Zuleitung. Beim Überschreiten einer frequenz-, modulations- und herzschrmmacherabhängigen Schwelle kommt es zur Beeinflussung der Funktion des Herzschrittmachers. Die Bandbreite der möglichen Beeinflussung kann von einer eher unbedeutenden einmaligen Intervallverlängerung bis hin zur Inhibition bzw. zum Herzrasen reichen.

Insbesondere bei Patienten ohne eigenen Herzrhythmus (atrioventrikulärer oder AV-Block) können sich lebensbedrohliche Si-

*Indirekte Wirkung eines elek-
trischen Feldes auf den Körper
eines Menschen. Quelle: LUBW*



tuationen entwickeln, wenn mehrere Schrittmacher-Reize ausbleiben. In der Praxis treten derartige Komplikationen jedoch äußerst selten auf. Gelegentlich werden Kreislaufbeeinträchtigungen bis hin zur Bewusstlosigkeit als Folge einer längeren Störbeeinflussung bei Herzschrittmacher-Patienten gemeldet.

Aus der Vielzahl elektrischer Verbraucher und Einrichtungen, die niederfrequente Felder erzeugen, sind nur wenige Quellen von starken Feldern imstande, eine Störung von Herzschrittmachern und anderen aktiven Implantaten herbeizuführen. Störungen sind z. B. nicht ausgeschlossen

- unmittelbar unter einer 380-kV-Hochspannungsfreileitung,
- im Überwachungsbereich von Artikelsicherungsanlagen und Metalldetektoren oder
- bei der körpernahen Verwendung von Geräten mit starken Motoren (z. B. Bohrmaschine).

Im Allgemeinen reicht bei Haushaltsgeräten mit kleinem Elektromotor (z. B. Mixer oder Föhn) ein Sicherheitsabstand von 20 cm aus. Von den Feldern der üblichen Hochspannungs- (110 kV und 220 kV) und Stromversorgungsleitungen geht in der Regel keine Gefahr für Träger von Implantaten aus.

Im Bereich der hochfrequenten Felder kann der Aufenthalt in unmittelbarer Nähe starker Rundfunk- und Fernsehsender gefährlich sein. Wo nötig, sind Warnschilder aufgestellt. Implantatträger sollten solche Bereiche meiden oder diese schnell passieren.

Die pulsmodulierten Felder, die bei der Handynutzung auftreten, können keine Störungen auslösen, wenn die betriebsbereiten Geräte in einem Abstand von mehr als 20 cm vom Implantat bzw. der Körperhilfe gehalten werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Störung durch Handys, die in höheren Frequenzbereichen arbeiten (GSM-1800 und UMTS-Netz), wird niedriger eingeschätzt.

In Krankenhäusern gab es in den letzten Jahren immer wieder Diskussionen darüber, in wie weit Handys andere empfindliche medizinische Geräte bzw. Patienten mit Implantaten stören könnten. Oft wurde daher in Krankenhäusern ein generelles Handyverbot verhängt.

Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) hat dazu 2008 ein Positionspapier verfasst [39]. Darin plädiert es dafür, Bereiche freizugeben, in denen die Nutzung von Mobilfunktechnik vom Krankenhausbetreiber erlaubt wird. Dagegen sei in allen nicht freigegebenen Bereichen die Handynutzung zu untersagen. Nach Ansicht des BfArM kann sonst der sichere Betrieb von Medizinprodukten auf Intensivstationen, in Eingriffsräumen, beim Transport von Patienten in Gängen und in Krankenzimmern nicht gewährleistet werden.

Etliche Kliniken (z. B. in Frankfurt und Hannover) haben inzwischen Handyverbote weitgehend wieder aufgehoben, nachdem Studien gezeigt hatten, dass das Risiko, medizinische Geräte durch Mobiltelefone zu stören, minimal ist. Nur in besonders sensiblen Bereichen (z. B. Intensivstation) bleibt das Handyverbot bestehen.

5.7 AUSGEWÄHLTE EINZELSTUDIEN

Für Grenzwertempfehlungen wird die Gesamtheit der vorliegenden Studien kritisch bewertet. Dennoch führen Medien und Interessengruppen immer wieder einzelne Studien als Beleg für ein besonderes Gefährdungspotenzial an. Daher hat das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) 2005 einige dieser kontrovers diskutierten Studien zusammengestellt und sowohl die Schlussfolgerungen der Autoren als auch die Stellungnahmen von Fachgremien hinzugefügt. Die Broschüre „Mobilfunk – Ein Gesundheitsrisiko? Studien – kontrovers diskutiert“ kann von der Internetseite des LGL heruntergeladen werden [40].

2007 gab das LGL die Broschüre „Mobilfunk: Mobilfunkbasisstationen und menschliche Befindlichkeit“ heraus [41]. Die LUBW veröffentlichte bereits 2004 die Broschüre „Mobilfunk und Gesundheit – Aktuelle Forschungsergebnisse im Überblick“ [42]. Sie gibt eine kompakte Einführung in das Thema und fasst wesentliche Erkenntnisse zusammen.

Eine neuere Zusammenstellung der Studien, die öffentliches Interesse erweckt haben, findet man beim BfS [43]. Einige davon wurden bereits vom LGL verwendet, andere sind erst kürzlich ins öffentliche Interesse gerückt.

Zusammenstellung der Studien, die öffentliches Interesse erweckt haben, und deren Bewertung durch das BfS.

Studie	Aussagen	Stellungnahme
Oberfeld-Studie: Umweltepide-miologische Untersuchung der Krebsinzidenz in den Gemeinden Hausmannsstätten und Vasoldsberg durch Dr. Gerd Oberfeld/Österreich. Die Oberfeld-Studie führte nach ihrer Veröffentlichung in Januar 2008 national und international zu kurzfristigen Diskussionen.	Die Oberfeld-Studie zeigt erheblich erhöhte Krebsrisiken in der Nähe eines C-Netz-Senders. Mitte Februar wurde von mehreren österreichischen Stellen (Mobilfunkbetreiber, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)) mitgeteilt, dass im besagten Untersuchungszeitraum kein C-Netz-Sender in Betrieb war und die Ergebnisse wurden als Falschmeldung bezeichnet.	Der Oberfeld-Studie fehlt die fachliche Grundlage, da nach Angaben des zuständigen Ministeriums in Österreich im Untersuchungszeitraum kein C-Netz-Sender in der Studienregion im Betrieb war. Weiterhin weist die Studie eine Vielzahl von schwerwiegenden methodischen Schwächen auf. Die Studie hat daher in Bezug auf den Mobilfunk keine Aussagekraft, verwertbare Schlüsse können daraus nicht gezogen werden. Es bleiben Fragen zur Sorgfalt und wissenschaftlichen Verantwortung bei derartigen umweltepidemiologischen Untersuchungen.
Die Interphone-Studie ist ein von der WHO koordiniertes internationales Gemeinschaftsprojekt, an dem Forschergruppen aus 13 Ländern beteiligt sind. Die im Oktober 2000 begonnene Interphone-Studie ist die größte Untersuchung, die den Zusammenhang zwischen Handynutzung und Hirntumoren ergründen soll. Durch die bisher einzigartig hohe Studienpopulation sollen auch kleine Risiken nachgewiesen werden. Das im Rahmen des DMF durchgeführte deutsche Teilprojekt ist abgeschlossen; die Ergebnisse sind veröffentlicht.	Die im deutschen Teil der Studie erarbeiteten Ergebnisse zeigen kein erhöhtes Risiko für Gliome, Meningiome oder das Akustikusneurinom (gutartiger Tumor des Hörnervs) bei einer Nutzungsdauer des Handys von weniger als 10 Jahren. Für Langzeitnutzer bietet der deutsche Teil noch zu geringe Fallzahlen, um eine Aussage zum Risiko zu treffen. Hier müssen die Ergebnisse der gemeinsamen Auswertung der Interphone-Studien abgewartet werden. Die deutsche Teilstudie zeigte auch kein erhöhtes Hirntumorrisiko bei Nutzung von schnurlosen Telefonen (DECT) oder bei Vorhandensein einer DECT-Basisstation im Schlafzimmer nahe am Bett. Auch hohe berufliche Exposition gegenüber RF-Feldern, vorwiegend durch Nutzung von drahtlosen Kommunikationsmitteln zeigte kein statistisch signifikant erhöhtes Hirntumorrisiko.	Die bislang im Rahmen der Interphone-Studie veröffentlichten Ergebnisse von Teilstudien zeigen konsistent keinen Zusammenhang zwischen Mobilfunk und einer Hirntumorerkrankung bei einer Nutzungsdauer von weniger als 10 Jahren und stützen damit nicht frühere Befunde erhöhter Risiken einer schwedischen Gruppe (Hardell). Eine umfassende Bewertung insbesondere der Langzeiteffekte wird erst nach Abschluss aller Teilstudien und der Zusammenführung der Einzelergebnisse durch die IARC (International Agency for Research on Cancer, eine Institution der WHO) möglich sein. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass diese umfassende Bewertung abschließende Antworten geben kann. Zum einen ist die Zahl der Langzeitnutzer über 10 Jahre nach wie vor sehr klein (Mobilfunk wird erst seit etwas mehr als 10 Jahren intensiver genutzt), zum anderen sind bei dieser Art Studie (Fall-Kontroll Studie) Verzerrungen der Risikoabschätzung durch Selektion, Recall Bias (verzerrte Erinnerung) und Unsicherheiten in der retrospektiven Expositionsabschätzung nicht völlig auszuschließen.

Studie	Aussagen	Stellungnahme
Der Bericht der „BioInitiative Working Group“, einer Gruppe von kritischen Wissenschaftlern aus Europa und den USA, wurde am 31. August 2007 veröffentlicht und sorgt seitdem national und international für anhaltende Diskussion.	Der Bericht basiert nach Angaben der „Bio-Initiative Working Group“ auf der Auswertung von rund 2000 vorhandenen Studien zur Wirkung hoch- und niederfrequenter elektromagnetischer Felder, wie sie etwa durch Mobilfunkgeräte und WLAN-Technik, aber auch durch Stromleitungen verursacht werden. Die Experten kommen darin zu dem Ergebnis, dass die derzeit geltenden Grenzwerte die Bevölkerung nicht ausreichend vor einem Gesundheitsrisiko durch hoch- und niederfrequente elektromagnetische Felder (EMF) schützen und fordern deshalb eine Senkung der Grenzwerte.	Der Bericht der „BioInitiative Working Group“ weist deutliche wissenschaftliche Schwächen auf: Insbesondere werden Vermischungen der gesundheitlichen Wirkungen von niederfrequenten und hochfrequenten Feldern vorgenommen, die fachlich wegen unterschiedlicher Wirkmechanismen nicht zulässig sind. Die überwiegende Mehrzahl der dem Bericht zugrunde liegenden Studien war nicht neu. Die Auswahl ist jedoch in mehreren Themenbereichen einseitig, sodass die Gruppe bei der Bewertung zu anderen Schlussfolgerungen kommt als das BfS und nationale und internationale Gremien. Die meisten zitierten Studien waren bekannt und wurden bei der Festlegung der derzeit gültigen Grenzwerte und bei den regelmäßigen Überprüfungen durch nationale Gremien bereits berücksichtigt. Auch im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms wurden die dem Report zugrunde liegenden Studien berücksichtigt und sind in die Gesamtbewertung eingeflossen.
REFLEX-Studie: Der Forschungsverbund REFLEX hat unter der Koordination von Prof. F. Adlkofer (VERUM-Stiftung, München) innerhalb des 5. EU-Rahmenprogramms die biologischen Wirkungen nieder- und hochfrequenter Felder in zahlreichen in-vitro-Studien, d.h. an verschiedenen Zellkulturen im Labor, untersucht. Die Veröffentlichung der REFLEX-Studie in 2003 sorgt seitdem national und international für anhaltende Diskussion.	Wirkungen von niederfrequenten elektrischen und magnetischen sowie von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf das Zellwachstum, die Ausformung der Zellen (Zell-Differenzierung) oder das programmierte Absterben von Zellen (Apoptose) konnten von mehreren Forschungsgruppen des REFLEX-Verbunds nicht gefunden werden. Die Ergebnisse in Bezug auf die Genexpression, d.h. die Umsetzung der genetischen Information in funktionsfähige Genprodukte, meist Proteine, waren vielfältig und komplex, jedoch gibt es keine Aussagen dazu, inwieweit diese Ergebnisse wiederholbar und biologisch relevant sind. Im Zentrum der Diskussion stehen beobachtete genschädigende Effekte (DNA Strangbrüche, Mikrokerne) sowohl durch niederfrequente als auch durch hochfrequenter Felder unterhalb der Grenzwerte. Publiziert wurden lediglich die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Rüdiger (Universität Wien). Im REFLEX Programm wurde GSM untersucht, eine aktuelle Studie beschreibt gentoxische Effekte unter UMTS-Exposition.	Prof. Adlkofer, der Koordinator des REFLEX Programms, stellt im EU-Bericht abschließend fest, dass alle Ergebnisse ausschließlich an Zellkulturen gewonnen wurden und daher nicht geeignet sind, Aussagen über die gesundheitliche Relevanz für den Menschen zu treffen. Diese Einschätzung gilt sowohl für die Ergebnisse für die Niederfrequenz als auch für die Hochfrequenz. Sie wird vom BfS geteilt. Die Verbreitung dieses Teils der REFLEX-Ergebnisse, z.T. noch vor den wissenschaftlichen Publikationen, hat zur Initiierung von mehreren Gentoxstudien geführt. Bisher konnten diese Wiederholungsstudien die Ergebnisse der Wiener Arbeitsgruppe (Prof. Rüdiger) nicht bestätigen (publiziert: Scarfi et al., Speit et al.). Die Mehrzahl der nach wissenschaftlichen Kriterien veröffentlichten Studien findet keine genschädigenden Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung. Ergänzung: Die Ergebnisse der Wiener Arbeitsgruppe wurden v.a. was die Art der Methodik und der Auswertung der Versuche betrifft, von Anfang an kritisch diskutiert. Eine neue Qualität erhält die Diskussion derzeit durch den Verdacht der Fälschung von Daten, der durch die aktuell veröffentlichte Studie zu UMTS (Schwarz et al., Int Arch Occup Environ Health 2008, 81: 755-767) ausgelöst wurde. Diese Publikation wurde nach Darstellung der Medizinischen Universität Wien Mitte August 2008 zurückgezogen, allerdings mit der Begründung, dass für die Einhaltung der Verblindung nicht garantiert werden könne. Die Medizinische Universität Wien teilt weiterhin mit, dass die nächste Aufgabe des dort eingerichteten Rats für Wissenschaftsethik darin bestehen wird, „sämtliche weitere Publikationen, an der dieselbe Autorin unter Anwendung derselben Versuchsanordnung beteiligt war, zu erheben und den zuständigen Herausgebern auch die Retraction dieser Publikationen zu empfehlen“ (http://www.meduniwien.ac.at/homepage/newsund-topstories), „Wissenschaft und Wahrheit“. Eine Aufklärung der Vorgänge ist auch im Interesse der Glaubwürdigkeit der Wissenschaft insgesamt dringend geboten.

Studie	Aussagen	Stellungnahme
NAILA-Studie: Eine Gruppe von Hausärzten in Naila hat unter der Leitung von Dr. med. Horst Eger eine statistische Auswertung von Patientenunterlagen aus dem Zeitraum zwischen 1994 und 2004 im Hinblick auf Krebsfälle in der Umgebung eines Mobilfunksendemasten vorgenommen. In der Studie werden zwei Regionen definiert, der sog. Nahbereich (weniger als 400 m von der Basisstation entfernt) und der Fernbereich (mehr als 400 m entfernt). Insgesamt werden so im Nahbereich 320 und im Fernbereich 647 Personen ermittelt. Die Veröffentlichung der NAILA-Studie in 2004 sorgt seitdem national für anhaltende Diskussion, die aber allmählich nachlässt.	Die NAILA-Studie zeigt eine etwa doppelt so hohe Wahrscheinlichkeit für Krebsneuerkrankungen im Nahbereich einer Basisstation im Vergleich zum Fernbereich (1994 bis 2004), wobei in den ersten 5 Jahren des Sendebetriebs keine signifikante Erhöhung beobachtet wurde, im Zeitraum 1999 bis 2004 – also nach 5 Jahren Betriebszeit – jedoch ein dreifach signifikant erhöhtes Krebsrisiko.	Die NAILA-Studie zeigt eine Vielzahl von methodischen Schwächen, die die Aussagekraft der Studie erheblich einschränken. So wurden Alter und Geschlecht der Patienten sowie andere Risikofaktoren für Krebs nicht berücksichtigt. Des Weiteren ist eine Untererfassung der Krebsfälle im Fernbereich nicht auszuschließen. Vor allem aber wurde keine individuelle Expositionsabschätzung der Felder von Mobilfunkbasisstationen vorgenommen. Besonders problematisch ist der kleine Stichprobenumfang. Die Autoren sagen selbst, dass es sich bei der Studie um eine kleinräumige Untersuchung handelt, die mit einfachen Methoden durchgeführt wurde und rein explorativen Charakter hat. Im DMF wurden mehrere tierexperimentelle und epidemiologische Studien zu Krebserkrankungen durch Mobilfunk durchgeführt. Diese ergaben keine Hinweise auf ein erhöhtes Krebsrisiko.
Mobilfunkkritische Ärzteinitiativen stellen einen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und unspezifischen gesundheitlichen Beschwerden her und legen Material vor, das diesen von ihnen postulierten ursächlichen Zusammenhang beweisen soll. (v.a. Frau Dr. Waldmann-Selzam und Herr Dr. Eger, die Mitglieder vom „Bamberger Appell“ und dessen Vorläufer „Freiburger Appell“ waren.)	Eine Vielzahl unterschiedlicher Beschwerden, v.a. Schlafstörungen, Kopfschmerzen und Konzentrationsstörungen, aber auch Tinnitus, Herzbeschwerden, Sehstörungen, Gelenkschmerzen, Juckreiz, Hautausschläge, Wachstumsstillstand, Allergien, Schwindel, Gewichtsabnahme, Störungen der Schilddrüse, Haarausfall, Nasenbluten, Schlaganfälle, Charakterveränderungen u.v.m. werden auf die Exposition gegen elektromagnetische Felder v.a. des Mobilfunks ursächlich zurückgeführt.	In einem unter der Leitung des BfS unter Anwesenheit von BMU, Wissenschaftlern und mobilfunkkritischen Ärzten geführten Fachgespräch im August 2006 wurden Möglichkeiten und Grenzen im Umgang mit medizinischen Befundberichten erörtert. Die bisher vorgelegten Fallbeschreibungen genügen nicht den Kriterien des Robert-Koch-Instituts für medizinische Kasuistiken. Berichtete Beschwerden und Erkrankungen werden nicht systematisch und konsequent durch medizinisch anerkannte diagnostische Verfahren objektiviert. Eine vorurteilsfreie, nachvollziehbare Untersuchung alternativer Erklärungen und deren systematischer Abschluss erfolgt nicht. Aus den vorliegenden Unterlagen ergeben sich insgesamt keine Ansätze, die über das hinausführen, was bereits innerhalb des DMF und in anderen wissenschaftlichen Studien untersucht wurde. Die vorliegenden Fallbeschreibungen sind nicht geeignet, die behaupteten ursächlichen Zusammenhänge zu belegen. Aktuelle wissenschaftliche Studien, die den Leitlinien der guten epidemiologischen Praxis genügen, sprechen gegen solche Zusammenhänge. Diese Einschätzung wird gestützt durch eine aktuelle Auswertung, in der der Frage nachgegangen wurde, ob sich der von Ärzteinitiativen postulierte „dramatische Anstieg“ verschiedener Erkrankungen im zeitlichen Zusammenhang mit der Ausbreitung des Mobilfunks anhand von Public Health Daten aus Datenbanken oder Studien nachvollziehen lässt, was jedoch nicht der Fall war (zur Nieden et al. 2009, Int. J. Hyg. Environ. Health). Das BfS ist, unabhängig von diesen Fakten, auch weiterhin daran interessiert, den z.T. von starken Beschwerden betroffenen Einzelpersonen zu helfen und sucht u.a. in Zusammenarbeit mit der Bundesärztekammer, hierfür geeignete Wege zu finden.

Studie	Aussagen	Stellungnahme
Die TNO-Studie wurde im Jahr 2003 im Auftrag der niederländischen Regierung durchgeführt. Dabei wurde im Rahmen einer Doppelblindstudie der Einfluss elektromagnetischer Felder von GSM- und UMTS- Mobilfunkbasisstationen auf das menschliche Wohlbefinden und kognitive Funktionen untersucht.	Bei der Exposition mit UMTS-Signalen wurde eine schwache, aber statistisch signifikante Reduktion des Wohlbefindens in beiden Gruppen beobachtet. Bei GSM-Exposition zeigte sich kein Einfluss.	Der niederländische Gesundheitsrat bestätigte der TNO-Studie in wesentlichen Teilen eine gute Qualität. Er sprach sich aber auch für eine verbesserte Replikationsstudie aus, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Abschließend kam der Gesundheitsrat zu dem Urteil, dass die Ergebnisse der TNO-Studie nicht erlauben, zu entscheiden, ob ein Zusammenhang zwischen der Exposition mit elektromagnetischen Feldern und einem verminderten Wohlbefinden oder gesundheitlichen Effekten existiert. Die TNO-Studie wurde mittlerweile in der Schweiz mit einem verbesserten Studiendesign wiederholt, die Ergebnisse konnten dabei nicht reproduziert werden (Regel et al. 2006). Auch die DMF-Studien zu den Endpunkten Wohlbefinden und Kognition konnten die TNO-Studien nicht stützen.
Mit der Salford-Studie wurde die Beeinflussung der Durchlässigkeit der Blut-Hirnschranke sowie das Auftreten von so genannten „Dunklen Neuronen“, d.h. geschädigten Nervenzellen bei Ratten durch Mikrowellen untersucht (in 2003).	50 Tage nach einer einmaligen, 2-stündigen Hochfrequenz-Exposition konnte bei den exponierten Ratten vermehrt Albumin im Gehirn nachgewiesen werden, was als Marker für die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke gilt. Zudem wurde das Auftreten degenerierter Nervenzellen beschrieben.	Den Hinweisen, die sich aus den Studien der Arbeitsgruppe Salford bezüglich einer Schwächung der Blut-Hirn-Schranke ergaben, wurde in einer Vielzahl von Studien nachgegangen. Keine dieser internationalen Studien fand entsprechende Hinweise. Auch die im Rahmen des DMF durchgeführten Studien stützen die Ergebnisse von Salford et al. nicht. Auf der BEMS-Tagung 2007 wurde aus der Arbeitsgruppe Salford berichtet, dass sie selbst die Ergebnisse nicht mehr reproduzieren können. Dies scheint nach wie vor der Fall zu sein. Insgesamt zeigen aktuelle Studien keinen schädigenden Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Blut-Hirn-Schranke. Auch die Ergebnisse zu den sogenannten „Dunklen Neuronen“ ließen sich in einer im DMF durchgeführten Studie nicht bestätigen.
Die Repacholi-Studie beschäftigt sich mit der Kanzerogenität von Mobilfunkfeldern (1997) bei Labortieren.	Es wurde im Vergleich zu scheinexponierten Tieren ein signifikant erhöhtes Risiko für Lymphome (Lymphknotenvergrößerungen beziehungsweise Lymphknotenschwellungen und Tumoren des Lymphgewebes) bei der exponierten Gruppe beobachtet.	Die Repacholi-Studie konnte in mehreren Reproduktionsstudien (in Australien und Italien) nicht reproduziert werden. Eine vergleichbare Studie mit Mäusen des Stammes AKR, die im DMF durchgeführt wurde, zeigte keine erhöhte Lymphominzidenz nach chronischer GSM-oder UMTS-Befeldung.
Die Flachsmeer-Studie wurde 2002 in der unmittelbaren Nähe einer Mobilfunkbasisstation durchgeführt. Es handelt sich um eine Machbarkeitsstudie, die durch das Land Niedersachsen (Ministerium für Frauen, Arbeit und Soziales) finanziert wurde.	Die Studie hat gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, die Schlafqualität von Anwohnern von Mobilfunkbasisstationen experimentell zu untersuchen. Ein geeignetes Studiendesign wurde entwickelt und die benötigte Zahl von Probanden bestimmt. Der Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern wurde hier nicht untersucht, die Basisstation war die gesamte Zeit in Betrieb und das gesamte Untersuchungskollektiv entsprechend exponiert. Die Exposition wurde nicht bestimmt.	Die Studie selbst liefert keine Aussage zum Zusammenhang zwischen Schlafqualität und elektromagnetischen Feldern. Da bestehende Basisstationen aus Betriebsgründen nicht abgeschaltet werden können, wurde die vom BfS in Auftrag gegebene und von der Charité Berlin durchgeführte Folgestudie bundesweit an 20 Standorten ohne Mobilfunkversorgung im Umkreis von mobilen Basisstationen realisiert. Diese wurden im verblindeten Design an- und abgeschaltet. Es wurde kein Zusammenhang zwischen Schlafqualität und elektromagnetischen Feldern gefunden. Allerdings war die Schlafqualität von Personen, die wegen gesundheitlicher Auswirkungen von Sendemasten besorgt waren, signifikant schlechter, und zwar auch dann, wenn die Basisstation außer Betrieb war. Dies spricht dafür, dass nicht die elektromagnetischen Felder selbst, sondern die Besorgnis darüber Schlafstörungen verursacht.

6. Grenzwerte

Kompakte Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 42–43

Es gibt Grenzwertempfehlungen verschiedener nationaler und internationaler Gremien für den Aufenthalt in elektrischen und magnetischen Feldern. International anerkannt ist die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), die in Zusammenarbeit mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und anderen Gremien Grenzwertempfehlungen zum Schutz der Bevölkerung und auch von Arbeitnehmern vor der Einwirkung nichtionisierender elektromagnetischer Felder aufgestellt hat.

Diese Vorschläge wurden nach und nach von Gesetzgebern auf internationaler und nationaler Ebene aufgegriffen und mit kleinen Abweichungen im eigenen Geltungsbereich eingeführt. Daher stimmt die deutsche Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) mit der Empfehlung des Rates der Europäischen Union zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder aus dem Jahre 1999 auch weitgehend überein. Die Grenzwerte werden von der Strahlenschutzkommission (SSK) durch regelmäßige Neubewertung der Literatur überprüft [44]. Die Schutzwirkung der Grenzwerte für den Bereich des Mobilfunks wurde jüngst durch das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm des Bundesamts für Strahlenschutz bestätigt.

Bei der Festlegung von Grenzwerten für elektromagnetische Felder muss zwischen so genannten Basisgrenzwerten und abgeleiteten Grenzwerten (Referenzwerten) unterschieden werden:

Basisgrenzwerte beruhen auf gesicherten Schwellenwerten der unmittelbar im Gewebe wirksamen physikalischen Einflussgrößen, die wiederum frequenzabhängig sind. Im Niederfrequenzbereich ist die wirksame physikalische Einflussgröße die Stromdichte in mA/m^2 , im Hochfrequenzbereich die Spezifische Absorptionsrate SAR in W/kg im Gewebe. Die Schwellenwerte werden unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren festgelegt.

Eine messtechnische Überprüfung der Basisgrenzwerte ist in der Regel nicht möglich, da nur die Feldstärke bzw. die Leistungsflussdichte außerhalb des Körpers gemessen werden kann. Es werden daher **abgeleitete Grenzwerte** (Referenzwerte) festgelegt, die in der Umgebung des Menschen messtechnisch ermittelt werden können. Messbare Größen sind zum Beispiel die elektrische Feldstärke in V/m , die magnetische Flussdichte in μT und die Leistungsflussdichte in mW/m^2 . Die Referenzwerte wurden so abgeleitet, dass die Einhaltung des Referenzwertes in jedem Fall die Einhaltung des entsprechenden Basisgrenzwertes bedeutet.

6.1 EMPFEHLUNGEN DER EUROPÄISCHEN UNION

Der Rat der Europäischen Union hat 1999 eine „Empfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder“ veröffentlicht. Ziel dieser Empfehlung ist es, die Bevölkerung vor nachweislich gesundheitsschädigenden Auswirkungen zu schützen und den EU-Mitgliedsstaaten einen Gemeinschaftsrahmen für eigene Grenzwerte zu geben. Die Empfehlung stellt allgemeine Grundsätze und Methoden für den Schutz der Bevölkerung auf, wobei es den einzelnen Staaten überlassen bleibt, detaillierte und darüber hinausgehende Vorschriften zu erlassen. Im Einklang mit den Empfehlungen der ICNIRP werden frequenzabhängige Basisgrenzwerte und Referenzwerte zur Begrenzung der Exposition festgelegt.

Über die Basisgrenzwerte besteht in allen internationalen und nationalen Fachgremien weitgehend Einvernehmen. Sie wurden auf der Grundlage ausreichend abgesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse festgelegt.

Basisgröße für die Wirkung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder ist die im menschlichen Körper hervorgerufene Stromdichte in A/m^2 . Bei den Frequenzen der Energieversorgung werden

von der ICNIRP und der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) als Basisgrenzwerte für beruflich exponierte Personen 10 mA/m^2 und für die Allgemeinbevölkerung 2 mA/m^2 (siehe Tabelle unten) empfohlen. Die Stromdichte wird dabei über eine Fläche von 1 cm^2 gemittelt.

Basisgröße für die Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den menschlichen Körper ist die Spezifische Absorptionsrate (SAR) in W/kg . Als Basisgrenzwerte werden von der ICNIRP und der SSK für beruflich exponierte Personen ein Ganzkörper-SAR-Wert von $0,4 \text{ W/kg}$ und ein Teilkörper SAR-Wert von 10 W/kg (gemittelt über 10 g Gewebemasse) angegeben. Für die Allgemeinbevölkerung werden ein Ganzkörper-SAR-Wert von $0,08 \text{ W/kg}$ und ein Teilkörper-SAR-Wert von 2 W/kg für Kopf und Rumpf bzw. 4 W/kg bei Gliedmaßen empfohlen (siehe Tabelle unten).

Die höheren Grenzwerte für die Exposition am Arbeitsplatz resultieren daraus, dass beruflich exponierte Personen aus Erwachsenen bestehen, die unter weitgehend kontrollierbaren Bedingungen für maximal die Dauer eines Arbeitstages elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind. Die allgemeine Bevölkerung umfasst dagegen alle Menschen unterschiedlichen Alters und Gesundheitsstatus, die bis zu 24 Stunden pro Tag exponiert sein können.

Basisgrenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 0 Hz bis 300 GHz (Allgemeinbevölkerung). Quelle: EU, 1999

Frequenzbereich	Magnetische Flussdichte in mT	Stromdichte in mA/m^2	Mittlere Ganzkörper-SAR in W/kg	Lokale SAR (Kopf, Rumpf) in W/kg	Lokale SAR (Gliedmaßen) in W/kg	Leistungsflussdichte in W/m^2
0 Hz–1 Hz	40	8	—	—	—	—
1 Hz–4 Hz		$8/(f/\text{Hz})$	—	—	—	—
4 Hz–1 kHz		2	—	—	—	—
1 kHz–100 kHz		$(f/\text{Hz})/500$	—	—	—	—
100 kHz–10 MHz		$(f/\text{Hz})/500$	0,08	2	4	—
10 MHz–10 GHz		—	0,08	2	4	—
10 GHz–300 GHz		—	—	—	—	10

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 42–43**

Die Basisgrenzwerte liegen um einen Sicherheitsfaktor 50 unterhalb der Schwellenwerte, bei denen akute Wirkungen nachgewiesen werden konnten. Damit wird den Umgebungsbedingungen, der individuellen Empfindlichkeit und dem unterschiedlichen Alter und Gesundheitszustand von Einzelpersonen in der Bevölkerung Rechnung getragen.

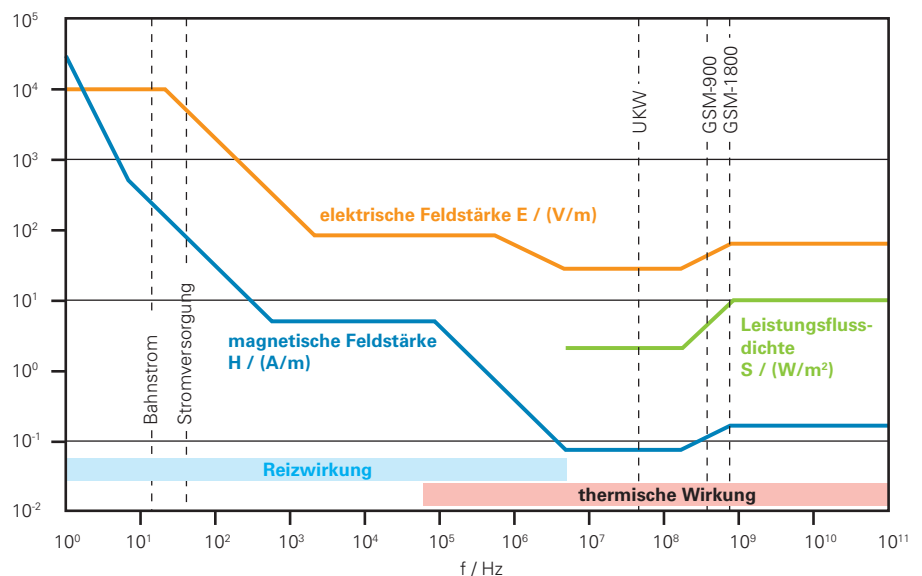
Die Referenzwerte für die Expositionsbegrenzung werden aus den Basisgrenzwerten für eine maximale Kopplung des Feldes im exponierten menschlichen Körper ermittelt. Die Abbildung unten gibt die Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder für den Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 100 GHz als ungestörte Effektivwerte an. In einigen Frequenzbereichen ist der Referenzwert nicht konstant, sondern ändert sich mit der Frequenz f .

6.2 REGELUNGEN IN DEUTSCHLAND

In Deutschland wurde 1996 zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern die Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) von der Bundesregierung mit Zustimmung des Bundesrates erlassen [45]. Die Bundesregierung und der Bundesrat werden dazu im § 23 Absatz 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) ermächtigt. Die darin festgelegten Grenzwerte basieren auf den international anerkannten Empfehlungen der ICNIRP und der SSK.

Die Verordnung enthält Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb von Niederfrequenz- und Hochfrequenzanlagen. Sie gilt für ortsfeste Anlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden und nicht einer Genehmigung nach § 4 BImSchG bedürfen.

Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 1 Hz bis 100 GHz für die Allgemeinbevölkerung (ungestörte Effektivwerte).
Quelle: LfU



Im Niederfrequenzbereich sind die relevanten Frequenzen von 16 2/3 Hz und 50 Hz berücksichtigt. Im Hochfrequenzbereich fallen Anlagen, die Frequenzen zwischen 10 MHz und 300 GHz ausstrahlen und eine bestimmte Sendeleistung überschreiten, unter die Verordnung. Nicht einbezogen sind Rundfunksender der Kurz- und Mittelwelle. Für deren Frequenzbereiche von 100 kHz bis 10 MHz kann auf die Empfehlungen der ICNIRP und der SSK zurückgegriffen werden [44].

Die Einschränkung auf wirtschaftlich bzw. gewerblich genutzte Anlagen bedeutet, dass gegenwärtig alle Anlagen, die solchen Zwecken nicht dienen (z. B. Amateurfunk), nicht unter die 26. BImSchV fallen. Auch nicht-ortsfixe Anlagen (z. B. elektrische Geräte und Handys) werden von der 26. BImSchV nicht erfasst.

Auch in der Normenreihe DIN VDE 0848 sind Immissionsgrenzwerte zum Schutz der Bevölkerung festgelegt. Mit Inkrafttreten der 26. BImSchV haben diese jedoch ihre Bedeutung in den entsprechenden Fre-

quenzbereichen verloren. Die DIN VDE 0848 soll jedoch durch die entsprechenden Fachkommissionen der DIN an die Verordnung angepasst werden oder sie ergänzen. Wie der Entwurf einer Norm für den Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz (VDE 0848-3-1/A1 vom Mai 2002) zeigt, sind viele Aspekte noch in Bearbeitung.

Für den Bereich des Arbeitsschutzes wurde im Jahr 2002 die berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B11 für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit unter der Einwirkung elektromagnetischer Felder veröffentlicht [46].

Da beruflich exponierte Personen in der Regel unter kontrollierbaren Bedingungen und in einem begrenzten Zeitraum elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind, liegen hier die Grenzwerte höher. Auf der Grundlage von Basiswerten wurden die Referenzwerte so festgelegt, dass selbst unter ungünstigsten Expositionsbedingungen die Schwellen biologischer Wirkungen nicht erreicht werden.

Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen gemäß 26. BImSchV

Frequenz in Hz	Elektrische Feldstärke in kV/m	Magnetische Flussdichte in µT
50	5	100
16 2/3	10	300

Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen gemäß 26. BImSchV

Frequenz in MHz	Elektrische Feldstärke in V/m	Magnetische Feldstärke in A/m
10 bis 400	27,5	0,073
400 bis 2.000	$1,375 \times \sqrt{f/\text{MHz}}$	$0,0037 \times \sqrt{f/\text{MHz}}$
2.000 bis 300.000	61	0,16

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf den Seiten 42–43**

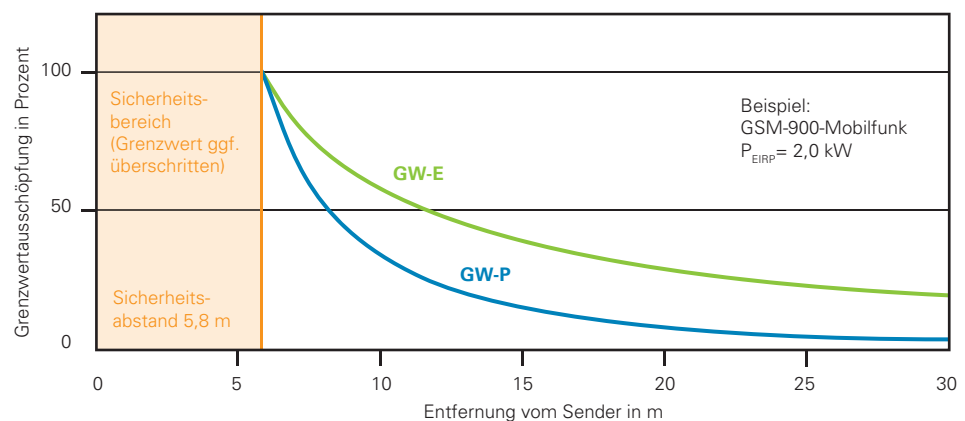
Weil das elektromagnetische Feld in Sendernähe am stärksten ist, gibt es für jede Anlage einen **Sicherheitsabstand**. Dieser wird für die Hauptstrahlrichtung bei voller Anlagenauslastung, d. h. für den ungünstigsten Fall, berechnet und ist in der Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur ausgewiesen. Beim Mobilfunk liegen typische Sicherheitsabstände im Bereich weniger Meter, beim Rundfunk bei bis zu einigen hundert Metern. Im Bereich außerhalb des Sicherheitsabstandes werden die Grenzwerte garantiert eingehalten.

Der quadratische Zusammenhang zwischen Feldstärke und Leistungsflussdichte führt dazu, dass zu den Grenzwerten der 26. BImSchV, die in Feldstärkeeinheiten angegeben sind, im Hochfrequenzbereich auch entsprechende Grenzwerte der Leistungsflussdichte existieren. Werden gemessene Feldstärken auf Feldstärke-Grenzwerte bezogen, so erhält man die **Grenzwertausschöpfung** GW-E für die elektrische Feldstärke (siehe auch Seite 97). Analoges gilt für die Grenzwertausschöpfung GW-P, wenn die Leistungsflussdichte verwendet wird.

Der GW-P-Wert ist immer das Quadrat des GW-E-Wertes. Bei der Beurteilung einer gegebenen Grenzwertausschöpfung muss daher stets die Bezugsgröße genannt werden. Eine Grenzwertausschöpfung von zwei Prozent der elektrischen Feldstärke entspricht einer Grenzwertausschöpfung von 0,04 % der Leistungsflussdichte. Beide Zahlenwerte repräsentieren dieselbe Immission.

Am 29. Juli 2009 hat der Bundestag das Gesetz zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NiSG) beschlossen. Das Gesetz gilt für den Betrieb von Anlagen zur medizinischen Anwendung und für den Betrieb von gewerblichen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen betriebener Anlagen mit Anwendungen außerhalb der Medizin. Zur Konkretisierung bedarf es noch entsprechender Rechtsverordnungen. Ein Verbot der Nutzung von Solarien durch Minderjährige ist im Gesetz bereits enthalten.

*Sicherheitsabstand und Verlauf
von GW-E und GW-P
Quelle: LfU*



6.3 SITUATION IM AUSLAND

Die meisten europäischen Staaten haben die Werte der EU-Ratsempfehlung von 1999 – sofern sie überhaupt gesetzliche Regelungen erlassen haben – als gesetzlich festgelegte Grenzwerte übernommen [47].

In einigen EU-Mitgliedsländern gelten niedrigere Grenzwerte. In Italien etwa wird unterschieden in Expositionsgrenzwerte, die generell nicht überschritten werden dürfen, und Vorsorgegrenzwerte, die in allen Bereichen gelten, an denen sich Menschen länger als vier Stunden aufhalten können. Im Mobilfunkbereich liegen die italienischen Expositionsgrenzwerte einheitlich bei 20 V/m (ICNIRP: 42–61 V/m), die Vorsorgewerte sind bis zu einem Faktor zehn niedriger (bezogen auf die elektrische Feldstärke) als nach ICNIRP [48, 49].

In der Schweiz gelten so genannte Anlagegrenzwerte. Diese beziehen sich auf die von einer einzelnen Anlage verursachten Felder und auf Orte, an denen sich Menschen längere Zeit aufhalten, wie beispielsweise

Wohnungen, Schulen oder Krankenhäuser. Die Anlagegrenzwerte liegen beim Mobilfunk um den Faktor zehn, bei Hochspannungsleitungen um den Faktor 100 unter den ICNIRP-Werten [50]. Es ist anzumerken, dass auch in Deutschland an den meisten Orten die Schweizer Anlagegrenzwerte eingehalten werden (vgl. auch Kapitel 4).

Umgekehrt sind in Österreich höhere Grenzwerte gültig. Die Abweichungen zu ICNIRP sind jedoch marginal. Erwähnenswert ist das „Salzburger Modell“, das 1998 im Bundesland Salzburg eingeführt wurde. Dabei wurde ein Vorsorgewert für die Leistungsflussdichte von 1 mW/m^2 , später noch darunter, für die Summe aller durch Mobilfunkanlagen verursachten Immissionen festgelegt. Dieser Wert hatte keine Rechtsverbindlichkeit und wurde auch in Salzburg des Öfteren nicht eingehalten. Er beruhte auf einer Einzelstudie [51], deren Autoren stets klarstellten, dass ihre Ergebnisse keine Grenzwertfestsetzung rechtfertigen [52]. Inzwischen wendet die Stadt Salzburg diese Vorsorgewerte nicht mehr an.



III. Anhang

Elektromagnetische Felder im Alltag

Abkürzungen und Erläuterungen

A	Ampere, Einheit für die Stärke des → elektrischen Stroms
Absorption	Aufnahme von Strahlungsenergie und Umwandlung in Wärme
Amplitude	Maximalwert einer periodischen Schwingung
Athermische Effekte	Effekte, die nicht mit einer Erwärmung des Gewebes einhergehen
B	→ Magnetische Flussdichte
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung, Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Die 26. BImSchV ist die Verordnung über elektromagnetische Felder.
Bluetooth	Übertragungsstandard für die Vernetzung von Geräten per Funk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Digitale, verbesserte schnurlose Telekommunikation), Übertragungsstandard für schnurlose Telefone
DMF	Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm, 2002-2008
DSL	Digital Subscriber Line (engl. für Digitaler Teilnehmeranschluss), Digitaler Übertragungsstandard zur Kommunikation zwischen DSL-Modem und DSLAM, um einen Breitband-Internetzugang über einfache Kupferleitungen zur Verfügung zu stellen.
DSLAM	Der Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM) (deutsch: DSL-Zugangskonzentrator) im Schaltschrank des Telefonanbieters ist das Gegenstück zum DSL-Modem am anderen Ende der Kupferleitung.
DVB-T	Digital Video Broadcasting Terrestrial, aktueller Standard für digitales Antennenfernsehen in Europa
E	→ Elektrische Feldstärke
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power, äquivalente isotrope Strahlungsleistung. Sie gibt an, mit welcher Sendeleistung man eine in alle Raumrichtungen gleichmäßig abstrahlende Antenne (Kugelstrahler) versorgen müsste, um im → Fernfeld dieselbe Leistungsflussdichte zu erreichen wie mit einer bündelnden Antenne.
Elektrisches Feld	Elektrischer Zustand des Raumes, der von ruhenden (elektrostatisches Feld) oder bewegten elektrischen Ladungen und zeitlich veränderlichen magnetischen Feldern (elektromagnetisches Feld) erzeugt wird.

Elektrische Feldstärke	Maß für die Stärke des $\rightarrow$ elektrischen Feldes, Einheit Volt pro Meter (V/m)
Elektrische Ladung	Eigenschaft materieller Teilchen (Ladungsträger), Ursache elektrischer Felder und der elektromagnetischen Wechselwirkung. Es gibt positive und negative elektrische Ladungen. Einheit der Ladung ist Coulomb (C).
Elektrische Spannung	Maß für die Arbeit, die erforderlich ist, um eine Ladung in einem elektrischen Feld von einem Punkt zum anderen zu bringen, dividiert durch die Ladung, Einheit Volt (V)
Elektrischer Strom	Bewegte elektrische Ladungen, Einheit Ampere (A)
Elektrosmog	Sammelbezeichnung für unerwünschte Abstrahlungen technisch erzeugter elektrischer und magnetischer Felder: Der Begriff Smog setzt sich aus den englischen Wörtern smoke (Rauch) und fog (Nebel) zusammen und steht für eine Belastung der Umwelt.
EMF	Elektromagnetisches Feld, elektromagnetische Felder
Emission	Aussendung, Austrag. Hier: Summe aller Felder, die von einer Antenne ausgehen.
Epidemiologische	Untersuchung, die mit größeren Gruppen der Bevölkerung durchgeführt wird, um unbekannte Zusammenhänge zwischen Ursache und Verbreitung von Krankheiten zu ermitteln. Die häufigsten Typen sind die Fall-Kontroll-Studie und die Kohortenstudie.
ERP	Equivalent Radiation Power, äquivalente Strahlungsleistung. Die ERP unterscheidet sich von der EIRP dadurch, dass zum Vergleich nicht der idealisierte Kugelstrahler, sondern eine in der Praxis realisierbare Antenne Halbwellendipol herangezogen wird.
ESL	Energiesparlampe
Fernfeld	Strahlungsfeld in großer Entfernung von der Quelle
Frequenz	Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, Einheit Hertz (Hz)
GSM	Weltweit verbreiteter Standard für den digitalen Mobilfunk. In Europa liegen die verwendeten Frequenzen um 900 MHz (GSM-900) und um 1800 MHz (GSM-1800), in den USA u. a. bei 1900 MHz (GSM-1900).
GIL	Gasisolierter Leiter
H	$\rightarrow$ Magnetische Feldstärke
HSPA	High Speed Packet Access ist eine Weiterentwicklung von UMTS, die höhere Übertragungsraten ermöglicht. Sie gliedert sich in HSDPA zur Beschleunigung des Downlinks und HSUPA für den Uplink.
Hz	Hertz, Einheit der $\rightarrow$ Frequenz
IARC	International Agency for Research on Cancer; Die Internationale Agentur für Krebsforschung ist eine Einrichtung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Lyon/Frankreich.
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung), Oberschleißheim. Unabhängige Vereinigung von Wis-

	senschaftlern zur Erforschung der Auswirkung nichtionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, weltweiter Berufsverband von Ingenieuren aus den Bereichen Elektrotechnik und Informatik, der Fachtagungen veranstaltet, Fachzeitschriften herausgibt und bei der technischen Normung mitwirkt.
Induktion	Vorgang, bei dem durch Änderung des von einem Leiter umschlossenen magnetischen Flusses ein elektrischer Strom (Wirbelstrom) erzeugt wird.
Influenz	Vorgang, bei dem in einem Körper durch äußere Felder Ladungen umverteilt werden, so dass an seiner Oberfläche lokal Überschüsse an positiven und negativen Ladungen auftreten.
Immission	Einwirkung, Eintrag. Hier: Feld oder Summe aller Felder, die auf die Umwelt oder den Menschen einwirken.
ionisierend	Ionisierende Strahlung bezeichnet Teilchenstrahlung oder elektromagnetische Strahlung, die aus Atomen oder Molekülen Elektronen entfernen kann, so dass positiv geladene Ionen oder Molekülreste zurückbleiben (Ionisation). Ionisierende Strahlung geht u. a. von radioaktiven Stoffen aus und ist gesundheitsschädlich.
Kohortenstudie	Untersuchung, in der eine Gruppe von Personen (Kohorte) mit bekannten Expositionsbedingungen über längere Zeit beobachtet wird. Dabei wird versucht, die verschiedenen Expositionen mit dem Auftreten von Krankheiten in Verbindung zu bringen.
Kontaktstrom	Strom zwischen einer Person und einem Gegenstand
KW	Kurzwellen: Dekameterwellen (10 bis 100 m bzw. 3 bis 30 MHz)
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LW	Langwellen: Kilometerwellen (1 bis 10 km bzw. 30 bis 300 kHz)
Latenzzeit	Zeit zwischen Reiz und Wirkung
Leistung	Pro Zeit verrichtete Arbeit oder aufgewandte Energie, Einheit Watt (W)
Leistungsflussdichte	Maß für die Stärke einer hochfrequenten Strahlung, Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2)
Leukämie	Krebs der weißen Blutzellen, Ursachen weitgehend unbekannt. Inzidenzhäufigkeit jährlich 40 bis 50 Fälle je 1 Million Einwohner. Es gibt mehrere Typen mit unterschiedlichem Krankheitsverlauf und unterschiedlicher Heilungswahrscheinlichkeit.
LTE	Long Term Evolution (LTE) ist ein Übertragungsstandard für Mobilfunk und die nach UMTS nächste Mobilfunkgeneration (4G). LTE erlaubt eine besonders effiziente Datenübertragung; die verwendeten Frequenzen liegen zwischen 800 MHz (LTE-800) und 2.600 MHz (LTE-2600).

Magn. Feldstärke	Maß für die Stärke eines Magnetfeldes, Einheit Ampere pro Meter (A/m)
Magn. Flussdichte	Maß für den magnetischen Fluss pro Fläche, Einheit Tesla (T)
Metastudien	Vergleichende und bewertende Reihe von einzelnen epidemiologischen Untersuchungen nach gleichen Vorgaben
Mikrowellen	elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen zwischen 1 mm und 1 m (300 MHz bis 300 GHz)
MIMO	Multiple Input Multiple Output, bezeichnet in der Nachrichtentechnik die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen zur drahtlosen Kommunikation
MW	Mittelwellen: Hektometerwellen (100 bis 1.000 m bzw. 0,3 bis 3 MHz)
Modulation	Änderung einer hochfrequenten Trägerwelle zur Übertragung von Informationen. Es gibt Amplituden-, Frequenz- und Phasenmodulation.
Monitoring	Beim Monitoring wird das elektromagnetische Spektrum an vielen Messpunkten landesweit gemessen, um Aussagen über die Immissionen der Gesamtbevölkerung mit elektromagnetischen Feldern zu gewinnen.
Netzfrequenzen	Für die Übertragung von elektrischer Energie werden je nach Land verschiedene Frequenzen verwendet, in Deutschland für die allgemeine Stromversorgung 50 Hz und für die Bahn 16,7 Hz.
Nichtionisierend	Im Gegensatz zur ionisierenden Strahlung kann die nichtionisierende Strahlung aufgrund ihres geringen Energiegehalts Molekularbindungen nicht zerstören. Die Absorption nichtionisierender Felder wird mit Hilfe des SAR-Wertes bestimmt.
S	→ Leistungsflussdichte
SAR	Spezifische Absorptions-Rate, beschreibt, wie viel Leistung pro Kilogramm Körpergewicht (bzw. biologischem Material) absorbiert wird (in W/kg), wenn der Körper hochfrequenter Strahlung ausgesetzt ist. Grenzwerte in Deutschland: Ganzkörper 0,08 W/kg; Teilkörper 2 W/kg, gemittelt über 10 g Körpergewebe
Selektionsbias	Durch eine ungewollte Selektion von Patienten können bereits bei Studienbeginn systematische Unterschiede zwischen den Gruppen, die miteinander verglichen werden sollen, entstehen. So kann ein Unterschied im Endergebnis lediglich darauf beruhen, dass in der einen Gruppe z. B. Patienten mit schwereren Erkrankungsformen oder ausgeprägterem Risikoprofil beobachtet wurden. Der gemessene Unterschied ist dann lediglich ein scheinbarer Unterschied.
Sendeleistung	Die von einer Antenne abgestrahlte elektrische Leistung, angegeben in Watt (W), als → ERP oder →EIRP
Skin-Effekt	Effekt, bei dem der Strom aus dem Inneren eines Leiters an seine Oberfläche verdrängt wird
SSK	Strahlenschutzkommission. Deutsches Wissenschaftsgremium, berät das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in Fragen des Schutzes vor den Gefahren ionisierender und nichtionisierender Strahlen.

StMUG	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
T	Tesla, Einheit der → magnetischen Flussdichte
TETRA	TETRA (terrestrial trunked radio) ist ein digitaler Mobilfunkstandard. Mit TETRA kann der gesamte betriebliche Mobilfunk von Anwendern wie Behörden, Industrie- oder auch Nahverkehrsunternehmen abgewickelt werden.
UKW	Ultrakurzwellen: Meterwellen (1 bis 10 m bzw. 30 bis 300 MHz)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, Übertragungsstandard für Mobilfunk und die nach GSM nächste Mobilfunkgeneration (3G). UMTS erlaubt eine schnellere Datenübertragung, die verwendeten Downlinkfrequenzen liegen in Deutschland um 2.100 MHz (UMTS-2100). Im europäischen Ausland gibt es vereinzelt bereits UMTS-900 Netze.
V	Volt, Einheit der → elektrischen Spannung
VoIP	Voice over Internet Protocol, digitaler Telefondienst über eine Internetverbindung
W	Watt, Einheit für die elektrische → Leistung
Wellenlänge	Räumlicher Abstand zwischen zwei Wellentälern oder zwei Wellenbergen einer Welle, kleinster Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle
WHO	Weltgesundheitsorganisation
WLAN	Wireless Local Area Network, funkgestütztes lokales Netzwerk
Wirbelstrom	Durch Induktion in einem leitfähigen Körper erzeugter elektrischer Strom

DARSTELLUNG GROSSER UND KLEINER ZAHLENWERTE

Abkürzung von Größenordnungen durch Zehnerpotenzen und Vorsilben.
Beispiel: 75 000 000 Hz = 75 Megahertz = 75 MHz

Faktor als Dezimalzahl	Zehnerpotenz	Vorsilben	Abkürzung
1 000 000 000 000	10^{12}	Tera	T
1 000 000 000	10^9	Giga	G
1 000 000	10^6	Mega	M
1 000	10^3	Kilo	k
0,001	10^{-3}	Milli	m
0,000 001	10^{-6}	Mikro	μ
0,000 000 001	10^{-9}	Nano	n
0,000 000 000 001	10^{-12}	Pico	p

Literatur und Internetquellen

II KAPITEL 2

NATÜRLICHE ELEKTROMAGNETISCHE FELDER

- [1] Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam: Informationen zum Erdmagnetfeld
www.gfz-potsdam.de > Suche: „Erdmagnetfeld“ oder „Deklinationsrechner“
- [2] Max-Planck-Gesellschaft: Forschung an magnetotaktischen Bakterien
www.mpg.de > Suche: „Bakterien mit Magnetsinn“ Pressemitteilung vom 20.11.2005
www.max-wissen.de > Suche: „Bakterien navigieren mit Kompass“:
- [3] Spiegel-Online: Forschungsergebnisse zum Magnetsinn von Zugvögeln
www.spiegel.de > „Zugvögel können Magnetfeld der Erde sehen“ vom 21.09.2004
- [4] BLIDS – Der Blitz Informationsdienst von Siemens
www.blids.de > Für Sie > Blitze in Zahlen

II KAPITEL 3

NIEDERFREQUENTE UND STATISCHE FELDER

- [5] Bundesamt für Strahlenschutz: Andere Anwendungen elektromagnetischer Felder
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > statische/niederfrequente Felder > Andere Anwendungen
- [6] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BauA):
„Schienengebundene Transportsysteme. Teil 2: Exposition durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder an Fernbahn, S-, U-Bahn und Straßenbahn“ Forschungsbericht Fb 800
www.baua.de > Publikationen > Schriftenreihe > Forschungsberichte > Forschungsberichte 1998 > Fb 800
- [7] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt: Magnetfelder von Fahrleitungen
www.bafu.admin.ch > Themen > Elektromog > Quellen > Eisenbahn > Magnetfelder von Fahrleitungen
- [8] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:
„Erfassung der niederfrequenten magnetischen Exposition der Bürger in Bayern“
Materialien Nr. 134, 1998 Teile der Studie sind im Internet verfügbar:
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > statische/niederfrequente Felder > Vorkommen im Alltag
- [9] Siemens AG: Gasisolierte Übertragungsleitungen
www.siemens.de > Energie > Stromübertragung > Gasisolierte Übertragungsleitungen
- [10] Bundesamt für Strahlenschutz: Felder von Energiesparlampen
„Informationen zu elektromagnetischen Emissionen von Kompaktleuchtstofflampen (Energiesparlampen)“ (2009)
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > BfS-Texte zum Thema
- [11] Schweizerisches Bundesamt für Gesundheit (BAG): Induktionskochherd
www.bag.admin.ch > Themen > Strahlung, Radioaktivität und Schall > Elektromagnetische Felder EMF > EMF Faktenblätter > Induktionskochherd

II KAPITEL 4

HOCHFREQUENTE FELDER

- [12] Bundesnetzagentur: Funkanlagenstandorte
www.bundesnetzagentur.de > Sachgebiete > Telekommunikation > technische Regulierung Telekommunikation > Elektromagnetische Felder (EMF) > Statistik
sowie Bundesnetzagentur: Marktbeobachtung
www.bundesnetzagentur.de > Sachgebiete > Telekommunikation > Marktbeobachtung TK-Markt > Mobilfunkdienste > Teilnehmerentwicklung
- [13] Bundesnetzagentur: EMF-Datenbank für Sender und Messstandorte
<http://emf.bundesnetzagentur.de>
- [14] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Minimierung von Immissionen, Schirmung
www.lfu.bayern.de > Strahlung > Fachinformationen > Nichtionisierende Strahlung > Minimierung
- [15] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit:
Förderung der Erfassung elektromagnetischer Felder (FEE-2)
www.stmug.bayern.de > Umwelt > Strahlenschutz > FEE-2-Projekt
- [16] Informationszentrum Mobilfunk: Immissionen von Mobilfunk Basisstationen in Bayern
Broschüre „Wissenschaft(f)t Vertrauen“ (2009)
www.izmf.de > Service > Infomaterial > Informationen zu Messreihen
- [17] Informationen zu SAR-Werten von Handys:
HANDYWERTE.DE
www.handywerte.de
CONNECT – Magazin für Telekommunikation und Handys
www.connect.de Googleuche: „Strahlungsbestenliste“
- [18] Bayerisches Landesamt für Umwelt: EMF-Monitoring
EMF-Monitoring in Bayern 2002/2003 (April 2006) bzw. 2006/2007 (August 2008)
www.lfu.bayern.de > Strahlung > Fachinformationen > Nichtionisierende Strahlung > Messung und Bewertung elektromagnetischer Felder
- [19] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Digitaler Rundfunk im 21. Jahrhundert „Digitaler Hörfunk und digitales Fernsehen in Deutschland“ (09/2005)
www.bmwi.de > Suchfunktion verwenden oder Google
- [20] Kommission zur Ermittlung des Finanzbedarfs der Rundfunkanstalten:
16. Bericht (12/2007), www.kef-online.de > Berichte > 16. Bericht
- [21] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW:
„Messung der Immissionen elektromagnetischer Felder im Umfeld einer TETRA BOS-Sendeanlage“ LANUV Fachbericht 11 (2009)
www.lanuv.nrw.de > Publikationen > Online-Shop
- [22] Bayerisches Staatsministerium des Innern: BOS-Funkrichtlinie
„Bestimmungen für Frequenzuteilungen zur Nutzung für das Betreiben von Funkanlagen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)“
www.stmi.bayern.de > Sicherheit > Feuerwehr > Kommunikation

- [23] Bundesamt für Strahlenschutz: Gesundheitliche Auswirkungen von TETRA
 „Gesundheitliche Auswirkungen von TETRA“
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Hochfrequente Felder > Stellungnahmen
 und Publikationen des BfS zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern
- [24] Breitbandinitiative Bayern: Strahlenbelastung bei Funk-Breitband
 „Hochfrequenz-Immissionen durch funkbasierte Breitbanddienste“ Teil 1 (09/2007)
 „Hochfrequenz-Immissionen durch funkbasierte Breitbanddienste“ Teil 2 (09/2008)
www.breitband.bayern.de > Strahlenbelastung bei Funk-Breitband
- [25] Bundesnetzagentur: Sachgebiet Amateurfunk
www.bundesnetzagentur.de > Sachgebiete > Telekommunikation > Regulierung
 Telekommunikation > Frequenzordnung > Amateurfunk
- [26] Bundesamt für Strahlenschutz: Warensicherungsanlagen
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > BfS Texte zum Thema >
 Warensicherungsanlagen
- [27] EMF-Forschungsprogramm: DECT, WLAN, WiMAX, Bluetooth, Babyfone u.v.m.
 „Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in
 Haushalt und Büro“ (07/2005)
www.emf-forschungsprogramm.de > Forschungsvorhaben > Dosimetrie >
 Abgeschlossene Forschungsprojekte Dosimetrie
- [28] Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlungsarme DECT-Schnurlostelefone
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > strahlungsarme DECT-Telefone
- [29] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:
 „Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg –
 Ergebnisse des Funkwellenmessprojektes 2009“
www.lubw.de > Themen > Elektromagnetische Felder > Messungen > Funkwellen-
 messprojekt 2009

II KAPITEL 5

BIOLOGISCHE WIRKUNGEN

- [30] UNEP/WHO/IRPA, Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields,
 Geneva 1987
- [31] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and
 electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74(4) 494-522, 1998.
- [32] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Gesundheitliche Aspekte niederfrequenter
 Felder (2007) „Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria
 Monograph No. 238“, www.who.int/emf
- [33] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm
 „Das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm – Ein wichtiger Beitrag zur transpa-
 renten Wissenschaft und zu offenen Fragen des Strahlenschutzes“ (2008)
www.bfs.de > Druckerzeugnisse > Broschüren
- [34] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
 Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF)
www.emf-forschungsprogramm.de (Stand November 2008)

- [35] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Belastungen durch niederfrequente Felder „Exposure to extremely low frequency fields -Fact Sheet No. 322” (2007)
www.who.int/emf > EMF publications & information resources > Fact sheets and archives
- [36] Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm:
 „Ergebnisse des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms – Bewertung der gesundheitlichen Risiken des Mobilfunks” (Stand 15.05.2008),
 Buchhandel: Wirtschaftsverlag NW, ISBN 978-3-86509-826-9, ca. 4,50 Euro.
- [37] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Interphonestudie
 „INTERPHONE-Studie findet kein erhöhtes Hirntumorrisiko durch Handynutzung – BfS rät weiterhin zur Vorsorge” (2010) und “Fachliche Stellungnahme des BfS zu den Ergebnissen und Schlussfolgerungen der INTERPHONE-Studie zum Risiko für Hirntumore aufgrund von Handynutzung” (2010)
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Stellungnahmen und Publikationen des BfS zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern
- [38] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Elektrosensibilität
 „Electromagnetic hypersensitivity - Fact Sheet N°296” (2005)
www.who.int/emf > EMF publications & information resources > Fact Sheets and archives
- [39] Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM):
 Mobilfunk in Krankenhäusern „Nutzung von Mobilfunktechnik in medizinischen Einrichtungen“ (06.05.2008)
www.bfarm.de > Medizinprodukte > Informationen über Risiken > Empfehlungen des BfArM
- [40] Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL):
 „Mobilfunk – Ein Gesundheitsrisiko? Studien –kontrovers diskutiert” (05/2005)
www.lgl.bayern.de > Publikationen > Umweltmedizin
- [41] Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL):
 „Mobilfunk: Mobilfunkbasisstationen und menschliche Befindlichkeit” Band 18 (12/2007), www.lgl.bayern.de > Publikationen > Umweltmedizin
- [42] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW): Mobilfunk und Gesundheit – Aktuelle Forschungsergebnisse im Überblick (Juni 2004)
www.lubw.de > Elektromagnetische Felder > Informationen > von LUBW und Land
- [43] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Beurteilung von Studien über Mobilfunkstrahlung „Studien, die öffentliches Interesse geweckt haben“ (2008)
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Hochfrequente Felder > Stellungnahmen und Publikationen des BfS zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

II KAPITEL 6

GRENZWERTE

- [44] Strahlenschutzkommission: Prüfung der Grenzwerte durch die SSK
 „Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern” (09/2001)
www.ssk.de > Strahlenschutz Themen > Elektromagnetische Felder > 2001

- [45] Gesetze im Internet: Gesetzliche Grenzwerte für elektrische und magnetische Felder „Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder vom 16. Dezember 1996 – 26. BImSchV)“ (12/1996)
www.gesetze-im-internet.de > Gesetze/Verordnungen > 2 > 26. BImSchV
- [46] Bundesamt für Strahlenschutz: Berufsgenossenschaftliche Vorschriften im Umgang mit elektromagnetischen Feldern „BGV B11 Elektromagnetische Felder“ (06/2001)
www.bfs.de > Gesetze und Regelungen > Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz > 1 Rechtsvorschriften B > 1B-37.2
- [47] Deutscher Bundestag: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kotting-Uhl, Katrin Göring-Eckardt, Cornelia Behm „Planung, Aufstellung und Grenzwerte von Mobilfunkanlagen im Kontext der freiwilligen Selbstverpflichtung der Mobilfunkbetreiber von 2001“ (07/2007)
<http://drucksachen.bundestag.de> > Bundestagsdrucksache 16/6133
- [48] Weltgesundheitsorganisation WHO: Grenzwerte in Italien „Electromagnetic Fields (EMF) Protection: Italy“ (06/2004)
www.who.int > Health topics > E > Electromagnetic fields > Worldwide standards database Europe > Italy
- [49] Weltgesundheitsorganisation WHO: Grenzwerte in Italien „Decreto del presidente del consiglio dei ministri: Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz“ (07/2003)
www.who.int > Health topics > E > Electromagnetic fields > Worldwide standards database > Europe > Italy > GU n.199
- [50] Schweizerische Eidgenossenschaft: Die NISV-Verordnung „Verordnung vom 23. Dezember 1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)“ (12/1999)
www.admin.ch > Suche: NISV
- [51] Neuropsychobiologie: Auswirkung von gepulster HF-Strahlung auf den menschlichen Schlaf „Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep“ (1996)
 Neuropsychobiology Vol. 33 No. 1
www.doi.org > Resolve a DOI name > 10.1159/000119247
- [52] Salzburger Fenster, Interview mit J. Rösche, April 2000

WEITERE INFORMATIONEN ZU EINZELNEN THEMEN

- Informationsseiten der LUBW
www.lubw.de > Elektromagnetische Felder > Mobilfunk
- Informationsseiten des Bayerischen Landesamtes für Umwelt LfU
www.lfu.bayern.de > Strahlung
- Bundesamt für Strahlenschutz:
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder

- Schweizerisches Bundesamt für Umwelt
www.bafu.admin.ch > Elektromog
 Hier ist auch unter Publikationen die Broschüre „Elektromog in der Umwelt“ (2005) als Datei im pdf-Format herunterladbar.
- WIK-EMF und Umwelt
 wöchentlicher WIK-EMF-Brief und weitere Publikationen
www.wik-emf.org
- EMF-Portal des Forschungszentrums für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit
www.emf-portal.de > Unter der Rubrik „Feldquellen“ können eine Vielzahl von technisch erzeugten Quellen elektromagnetischer Felder abgefragt werden. Man erhält Informationen über die Stärke der auftretenden Felder.
- Informationszentrum Mobilfunk e. V.:
 Dialogpartner und Informationsdienstleister zum Thema mobile Kommunikation
www.izmf.de
- Elektromoginfo
 Informationsseite zum Thema Elektromog von Dipl. Ing. Ralf Dieter Wölfl
www.elektromoginfo.de
- Bahnstrom
 Deutsche Bahn AG: Über 100 Jahre Eisenbahn unter elektrischem Fahrdrat
 Geschichte der Elektrifizierung des Schienennetzes
www.deutschebahn.com > Konzern > Geschichte > Themen > Bahnstrom
- Feldberechnungsprogramme
 Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH:
 Feldberechnungsprogramm WinField®
www.fgeu.de
- Wikipedia: kostenloses Onlinelexikon de.wikipedia.org
 Stichworte: Frequenzband; Amateurband; Amateurfunk; RFID; DECT; Bluetooth; WLAN; GSM; UMTS; TETRA; elektromagnetische Strahlung; Elektromagnetisches Spektrum; Elektromagnetische Welle; Inverse-square law (en.wikipedia.org)
- ukwtv.de: Liste bekannter Rundfunksender
www.ukwtv.de > Sendertabelle
- Informationszentrum gegen Mobilfunk:
 Betreiber des größten deutschsprachigen Elektromog-Forums
www.izgmf.de > Forum

Bildnachweis

INSTITUTION	SEITE
AllgäuDSL	90 u.
AVM GmbH	95 u.
Bayerisches StMI, Projektgruppe DigiNet	89 o.
BMW Group	74 o.
Bundesnetzagentur, Bonn	77
FGEU mbH, Berlin	19 o., u.; 63 o., m.
GeoForschungsZentrum, Potsdam	9; 53
Gigaset Communications	95 o.
IDV GmbH, Langenselbold	68
IMST GmbH, Kamp-Lintfort	37; 85 o.; 108 o.; 109
Landeshauptstadt München	23 u.
LfU, Augsburg	3 r., 15 z4.l., 23 o., u.; 25 o.; 27 o.; 43; 70; 74 l.u., r.u.; 76; 79 r.o., r.u.; 80; 81; 83; 84; 85 u.; 88; 91 m.u.; 98; 108 u.; 126; 128
LUBW, Karlsruhe	U1 l, r.o., r.u.; 3 l.; 8; 13 l.u., r.u.; 15 z2.l., z3.l., z4.r., z6.l.; 17 o.; 19 o.(l.), u.(l.); 25 m.u.; 27 o., m.u.; 31 o.; 35 r.; 44; 46; 47 o., u., u.(l.), u.(m.); 48; 49; 51 z2.l., z3.l., z4.r., z6.l.; 52; 58; 59; 60; 61; 62; 63 o.(l.), m.(l.), u.; 65 o.; 69 u.; 72 o., u.; 73; 79 l.u.; 87; 88; 91 o.; 93; 97; 99; 100; 101; 104; 105; 106; 111; 118
Motorola	89 u.
Mike Rupprecht (DK 3WN.info)	92
Nokia Siemens Networks	78
p ² systems GmbH	90 o.
PHYSIOMED ELEKTROMEDIZIN AG	33; 110
Sharp Electronics	94 u.
Shutterstock.com	U1 r.m.; 6; 11; 13 l.o., m.o., r.o., r.m.; 15 z1.l., z5.l., z5.r., z6.r., z8.l., z8.r., z9.l.; 17 l.u., m.u., r.u.; 21; 23 o.(l.), o.(r.); 25 l.u., r.u.; 27 l.u., r.u.; 29; 31 l.u., m.u., r.u.; 35 l.o., m.o.; 39; 41 r.o., r.u.; 47 u.(r.); 51 z1.l., z5.l., z5.r., z6.r., z8.l., z8.r., z9.l.; 54; 55; 56 o.; 57; 69 o.; 70; 94 o.; 96; 103; 130
Siemens AG, München	64, 65 u.
Transrapid International GmbH & Co. KG	56 u.
Wikipedia (GNU)	41 l., 72, 86

l = links; r = rechts; m = mitte; o = oben; u = unten; z = Zeile (nur S. 15 und S. 51); () = Bild in Bild

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Postfach 10 01 63 · 76231 Karlsruhe · Internet: www.lubw.de

Bayerisches Landesamt für Umwelt · 86177 Augsburg
Internet: www.lfu.bayern.de