



Elektromagnetische Felder im Alltag

Aktuelle Informationen über Quellen, Einsatz und Wirkungen

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)
Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
86177 Augsburg, www.lfu.bayern.de

BEARBEITUNG

LUBW – Referat 34 Technischer Arbeitsschutz, Lärmschutz,
Martin Hoffmann, Clemens Mehnert

LfU – Referat 25 Lärmschutz beim Verkehr, Elektromagnetische Felder,
Dr. Thomas Kurz, Marcus de Ridder, Dr. Michael Gerke

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) – Referat 73
Lärm, nichtionisierende Strahlen und Immissionsschutz bei Motoren und Kraftstoffen,
Dr. Evi Vogel

LAYOUT

LfU auf konzeptioneller und gestalterischer Grundlage für die Erstauflage von
ÖkoMedia GmbH
Kulturpark Berg, Teckstraße 56, 70190 Stuttgart, www.oekomedia.com

BEZUG

Die Broschüre ist als gedruckte Version und als PDF-Version kostenlos erhältlich:
Baden-Württemberg: <https://pd.lubw.de/10537>
Bayern: www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_mf_00006.htm
BAYERN|DIREKT: 089 / 122220

STAND

Dezember 2017, 4. aktualisierte Auflage, Januar 2020 (2.000)

DRUCK

MURR GmbH, Im Husarenlager 6a, 76187 Karlsruhe
Gedruckt auf Recyclingpapier

BILDNACHWEIS

Seite 139

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 abschließend geklärt, wird aber weiterhin intensiv erforscht.

Auch wenn die Diskussionen über mögliche Beeinträchtigungen, vor allem durch den Mobilfunk, nicht mehr so intensiv sind wie zu Beginn des Netzausbaus, besteht weiterhin Bedarf an sachlichen Informationen. Mit dieser aktualisierten Broschüre stellen wir der interessierten Öffentlichkeit den Stand der Kenntnisse über Eigenschaften und Wirkungen elektromagnetischer Felder zur Verfügung. Die Darstellung orientiert sich an gesicherten Fakten und ist allgemein verständlich gehalten. In einem fachlichen Teil bietet sie Möglichkeiten zur Vertiefung. Offene Fragen werden in den wissenschaftlichen Zusammenhang eingeordnet. Dadurch ist ein hohes Maß an Objektivität 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.



E. Bell

Eva Bell

Präsidentin der Landesanstalt
für Umwelt Baden-Württemberg



C. Kumutat

Claus Kumutat

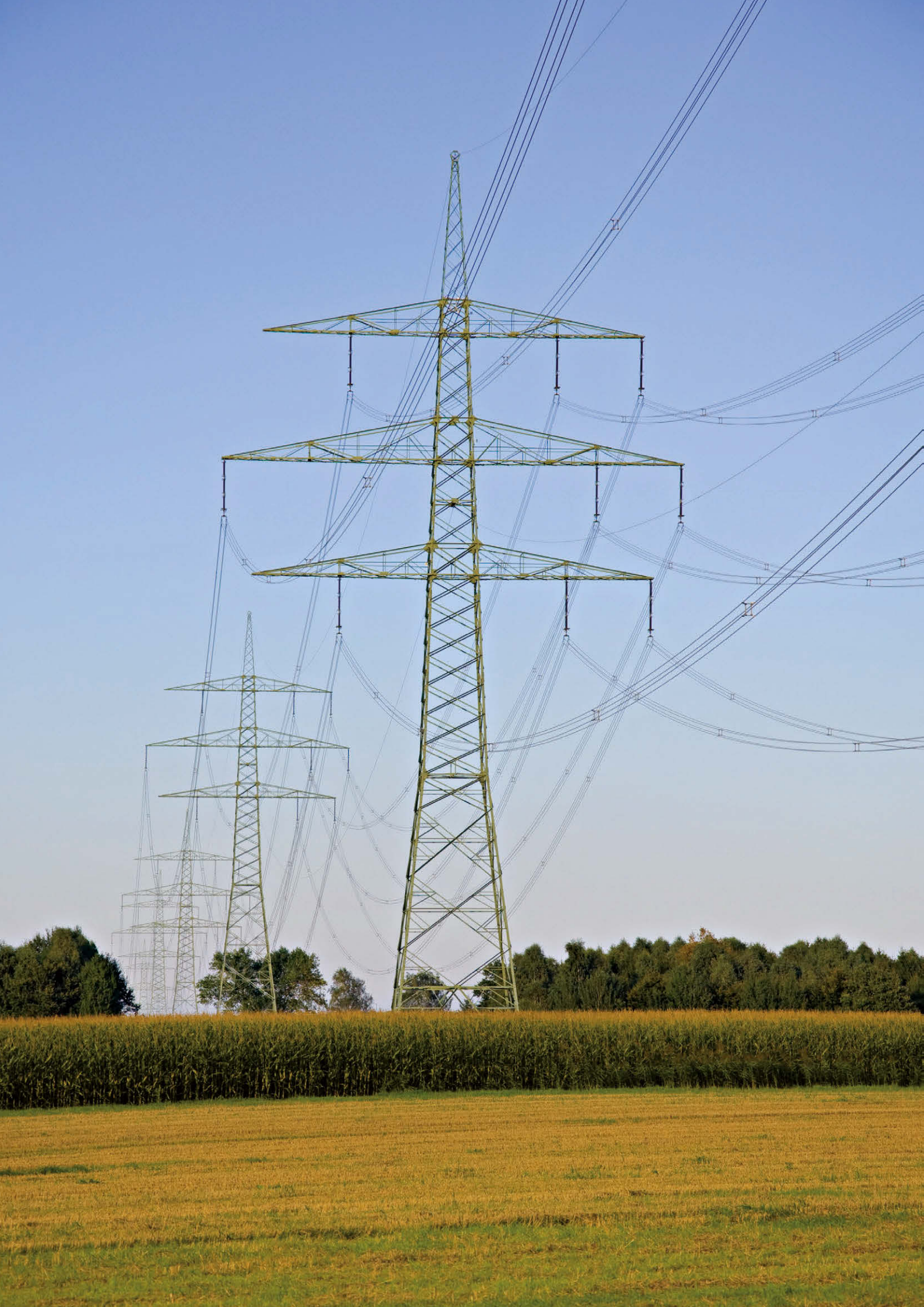
Präsident des Bayerischen Landesamtes
für Umwelt

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 Öffentliche Stromversorgung	56
3.1.1 Netzebenen	57
3.1.2 Technik und Felder	59
3.1.3 Sondersysteme	63
3.2 Bahnstrom	64
3.3 Statische Felder	67
3.4 Felder im Haushalt	68
4 HOCHFREQUENTE FELDER	74
4.1 Grundlagen und Messgrößen	74
4.2 Zulassung und Überwachung von Funksendeanlagen	76
4.3 Mobilfunk	77
4.3.1 Entwicklung des Mobilfunks	77
4.3.2 Mobilfunknetze in Deutschland	78
4.3.3 Mobilfunktechnologien	78
4.3.4 Bauformen von Mobilfunkantennen	79
4.3.5 Abstrahlung einer Mobilfunkantenne	80
4.3.6 Netzstruktur	83
4.3.7 Immissionen eines Handys	84
4.3.8 Tipps zur Vorsorge	84
4.4 Rundfunk	85
4.5 BOS-TETRA-Digitalfunk	86
4.6 Stationäre Internet-Funklösungen	87
4.7 Richtfunk	88

INHALTSVERZEICHNIS

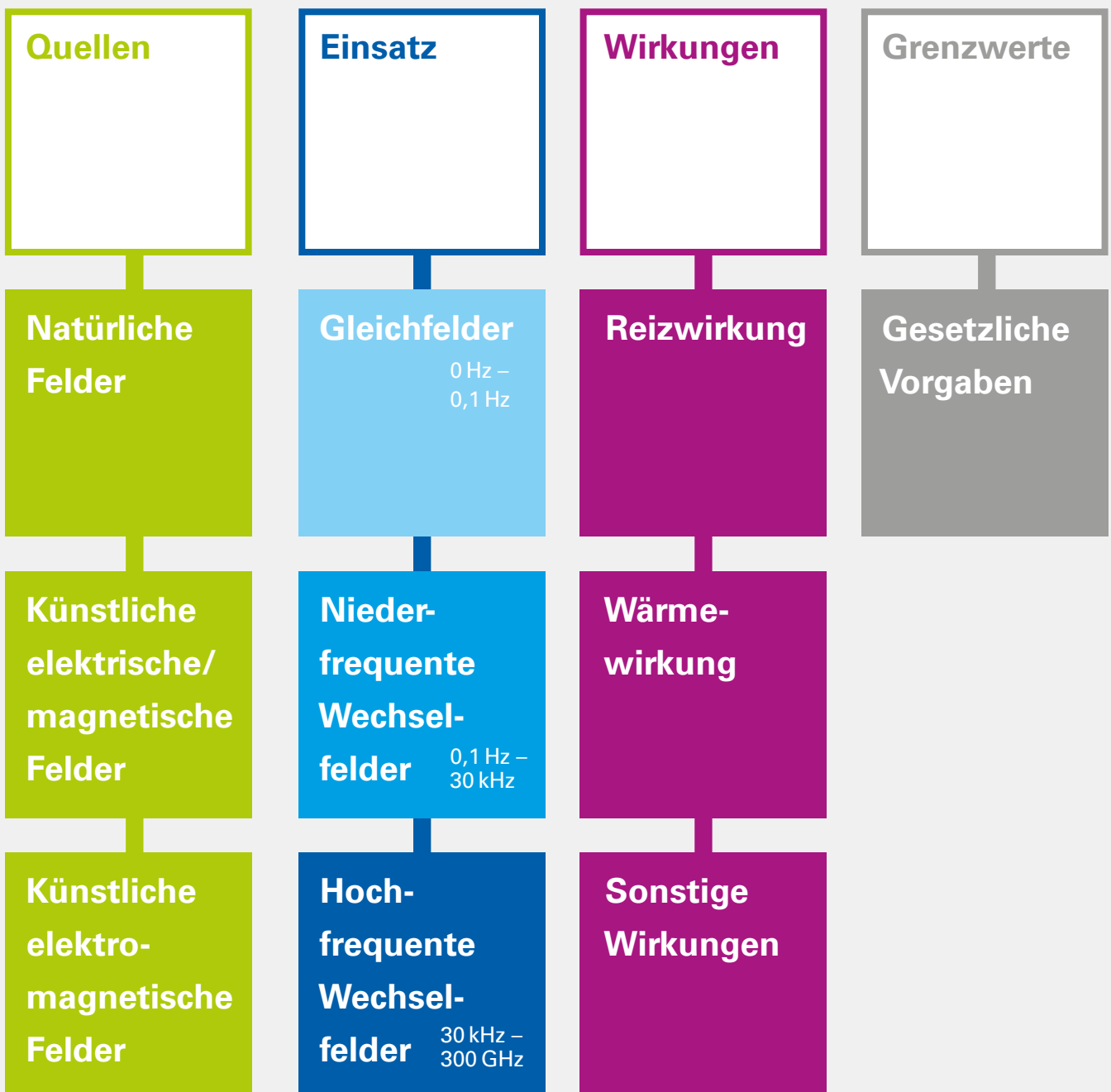
4.8	Amateurfunk	89
4.9	Weitere Anwendungen	90
4.9.1	Warensicherungssysteme	90
4.9.2	Artikelerkennung und Nahfeldkommunikation	91
4.9.3	Mikrowellenherde	91
4.9.4	Schnurlostelefone (DECT)	92
4.9.5	Drahtlose Heimnetzwerke (WLAN)	92
4.9.6	Bluetooth	93
4.9.7	Babyfone	94
4.9.8	Neue Funktechnik für Haus und Auto	94
4.10	EMF-Monitoring in Bayern und Baden-Württemberg	96
4.10.1	Bayern	96
4.10.2	Baden-Württemberg	98
4.10.3	Vergleich der Untersuchungen	99
5	BIOLOGISCHE WIRKUNGEN	100
5.1	Einführung	100
5.2	Akute Wirkungen statischer Felder	101
5.3	Akute Wirkungen Niederfrequenter Felder	101
5.3.1	Reizwirkungen	103
5.3.2	Indirekte Wirkungen	104
5.3.3	Weitere Wirkungen	106
5.4	Akute Wirkungen Hochfrequenter Felder	106
5.4.1	Wärmewirkung	106
5.4.2	Hochfrequenztherapie	108
5.4.3	Absorption Hochfrequenter Strahlung	109
5.4.4	Weitere Wirkungen	110
5.5	Langzeitwirkungen	110
5.5.1	Niederfrequente Felder und Krebs	111
5.5.2	Hochfrequente Felder und Krebs	112
5.5.3	Weitere Langzeitwirkungen Hochfrequenter Felder	113
5.6	Befindlichkeitsstörungen	115
5.7	Beeinträchtigungen bei Implantaten und Körperhilfen	116
5.8	Grundsätzliches zur Bewertung wissenschaftlicher Studien	118
6	GRENZWERTE	120
6.1	Regelungen in Deutschland	121
6.2	Empfehlungen der Europäischen Union	123
6.3	Situation in Europa	125
III. ANHANG		127
	ABKÜRZUNGEN UND ERLÄUTERUNGEN	128
	LITERATUR UND INTERNETQUELLEN	133
	BILDNACHWEIS	139



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.

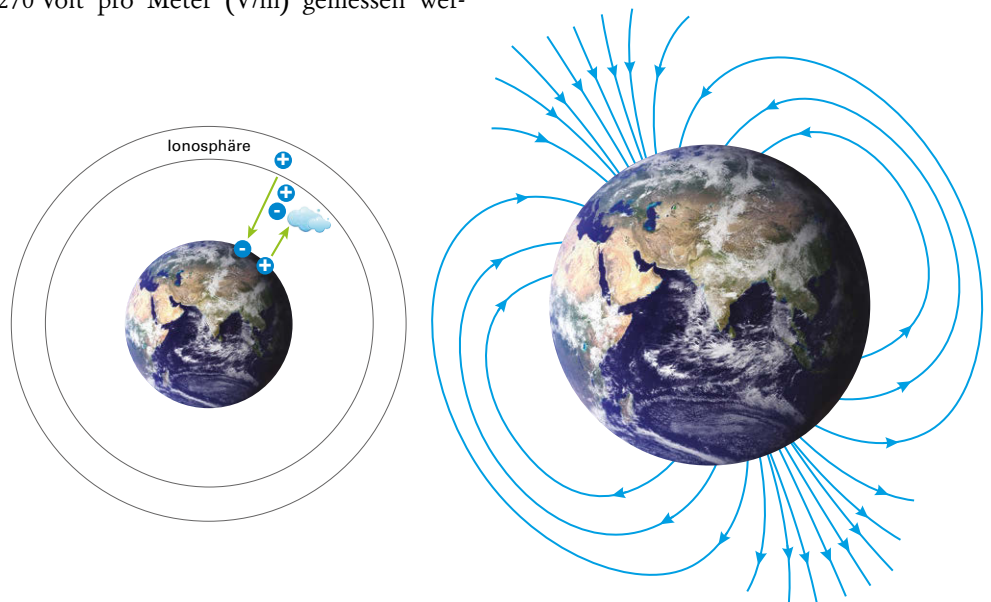
Das Erdmagnetfeld ist ein statisches Magnetfeld, das die ganze Erde vom Südpol bis zum Nordpol umgibt (Abbildung unten). An den Polen ist es etwa doppelt so stark wie am Äquator. Die Feldlinien verlaufen am Äquator parallel und an den Polen senkrecht zur Erdoberfläche. In Mitteleuropa treten die Linien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

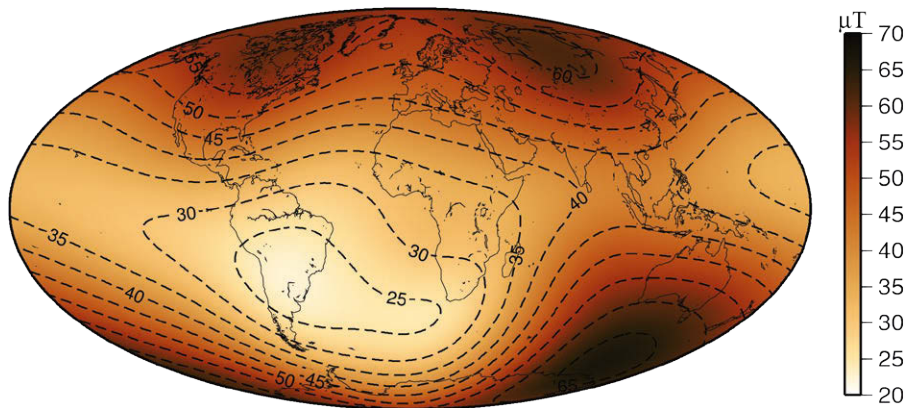
Auch elektrische Felder kommen auf der Erde vor. Sie treten vor allem zwischen dem Erdboden und höheren Atmosphärenschichten (Ionosphäre) auf und werden hauptsächlich durch die Sonnenstrahlung und den Sonnenwind verursacht. Bei wolkenlosem Himmel kann im freien Gelände ein elektrisches Gleichfeld von 130 bis 270 Volt pro Meter (V/m) gemessen wer-

den. 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.

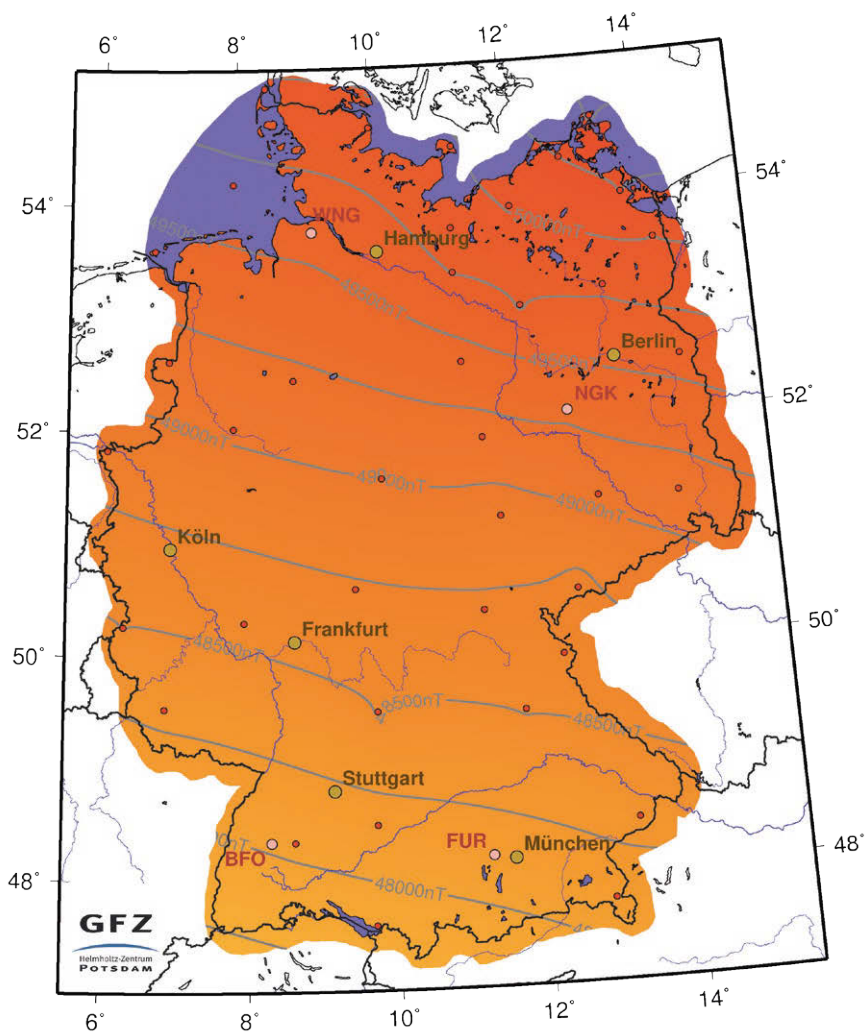
Natürliche elektromagnetische Strahlung tritt hauptsächlich in Form von Wärmestrahlung (Infrarot), sichtbarem Licht und ultravioletter Strahlung der Sonne auf. Auch Feuer und Blitze sind Quellen natürlicher elektromagnetischer Strahlung.

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 Mikrottesla, an den Polen ist sie etwa doppelt so groß.



Magnetische Flussdichte in Deutschland. In Baden-Württemberg und Bayern liegt sie bei etwa 48 Mikrottesla.

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.

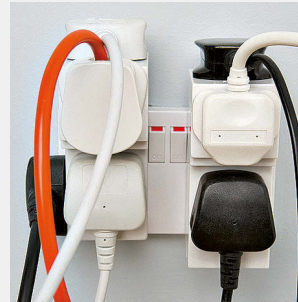
ELEKTROGERÄTE UND VERKABELUNG

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.

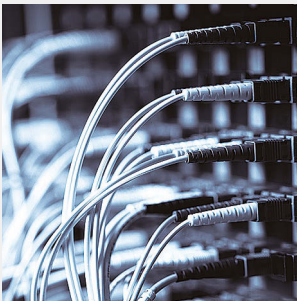
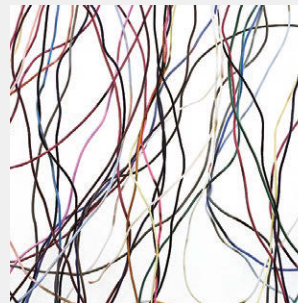
- Maß für die Stärke eines elektrischen Feldes: **Elektrische Feldstärke E** , gemessen in Volt pro Meter (V/m)
- Maß für die Stärke eines Magnetfeldes: **Magnetische Flussdichte B** , gemessen in Tesla (T)

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 Kilohertz 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 (vergleiche S. 15).

Die wechselseitige enge Verknüpfung von elektrischem und magnetischem Feld ist umso stärker, je höher die Frequenz ist. Bei Frequenzen über 30 Kilohertz 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 Kilometer pro Sekunde

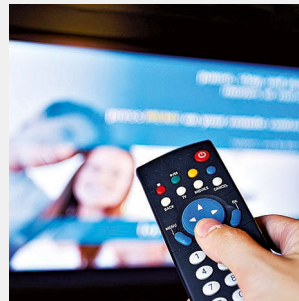
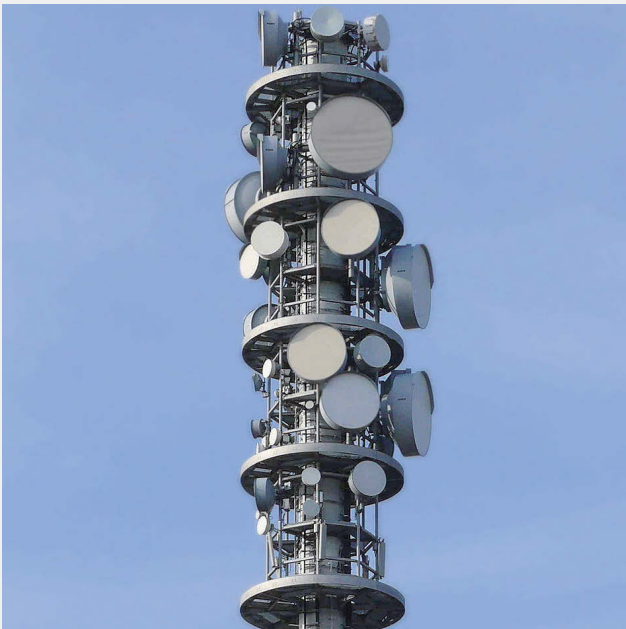
(km/s). Diese Eigenschaft wird zur Informationsübertragung bei Radio, Fernsehen und Mobilfunk genutzt.

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

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

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. Von niederfrequenten Wechselfeldern wird gesprochen, wenn eine Frequenz von 0,1 Hertz bis 30 Kilohertz 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).

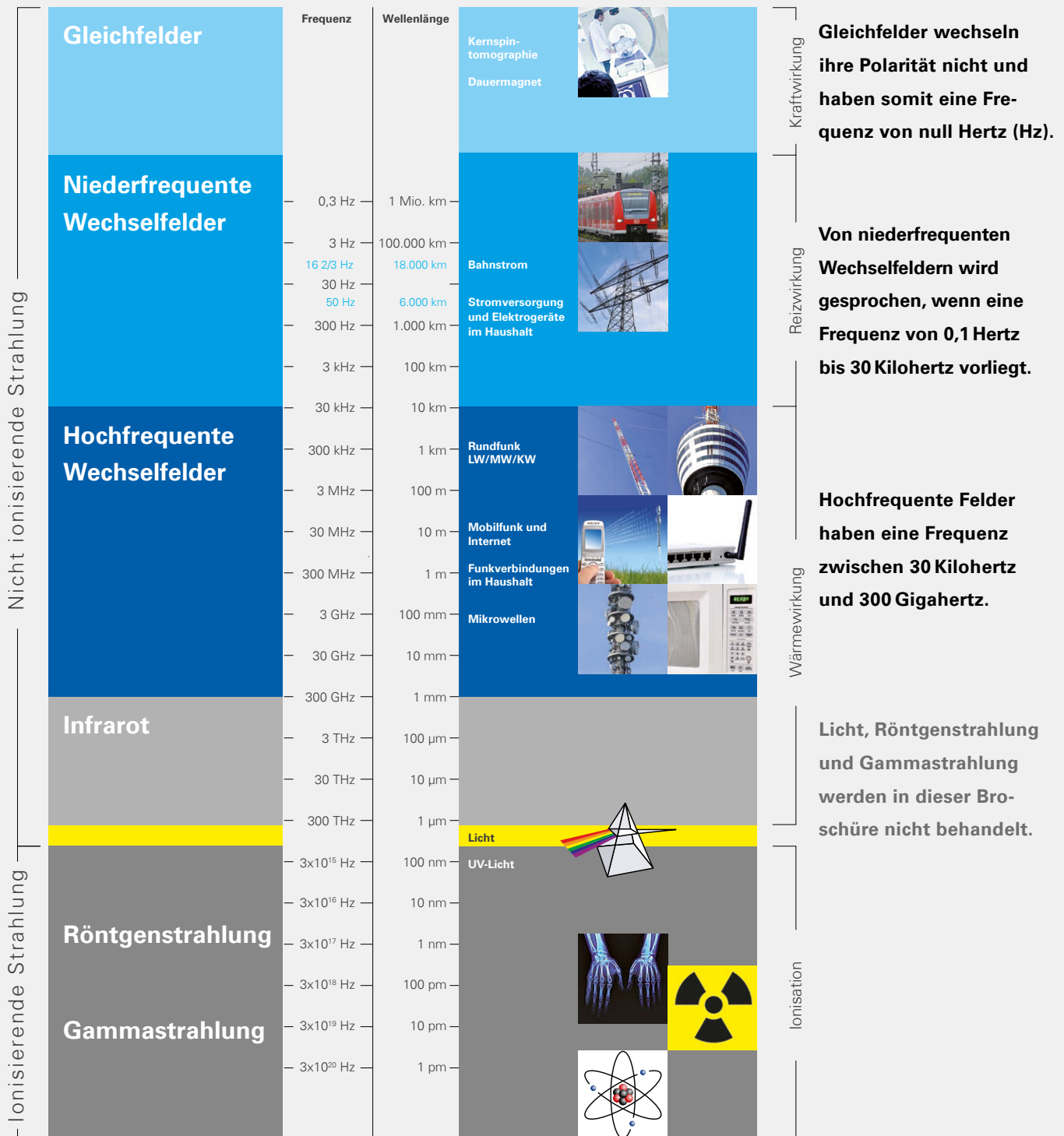
Hochfrequente Felder haben eine Frequenz zwischen 30 Kilohertz und 300 Gigahertz. Die meisten modernen Informationsmedien, die drahtlos funktionieren, nutzen hochfrequente Wechselfelder, um Daten zu übertragen. Bei entsprechender Stärke können sie in Gliedmaßen, die ihnen ausgesetzt sind, eine Wärmewirkung 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 Nanometer (nm) liegt ionisierende Strahlung vor.

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf Seite 50

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

Das elektromagnetische Spektrum



Einsatz

Gleichfelder

0 Hz –
0,1 Hz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 67–68

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 Hertz).

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 Volt 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

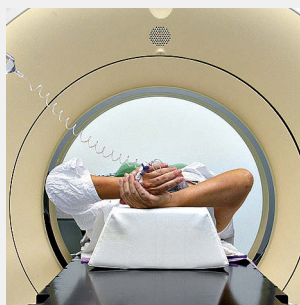
werden entweder mit Permanentmagneten oder Elektromagneten erzeugt. Permanentmagnete bestehen aus Eisen, Kobalt oder Nickel und sind dauermagnetisch. Sie werden z.B. in Elektromotoren, Lautsprechern, und vielen anderen Geräten eingesetzt.

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. 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 elektrisches Gleichfeld auf.



Tafelmagnete,
Kernspintomograph,
Lautsprecher.

Einsatz

Nieder- frequente Wechsel- felder

0,1 Hz –
30 kHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 56–66

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

WECHSELSTROM 50 HERTZ (HZ)

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

Die Abbildungen rechts 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 ma-

gnetischen 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.

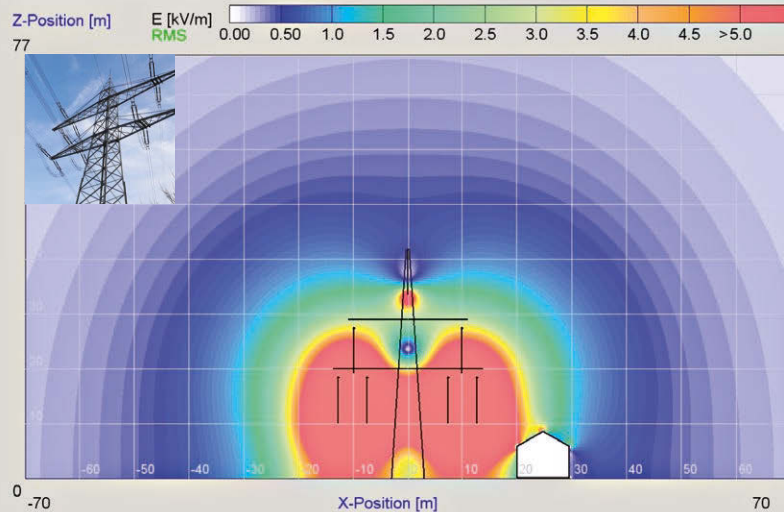
BAHNSTROM 16,7 HERTZ (HZ)

Das elektrifizierte Netz der Deutschen Bahn AG (DB) wird mit Wechselstrom der Frequenz 16,7 Hertz betrieben. Die Stromversorgung des Zuges erfolgt über die Strom führende 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

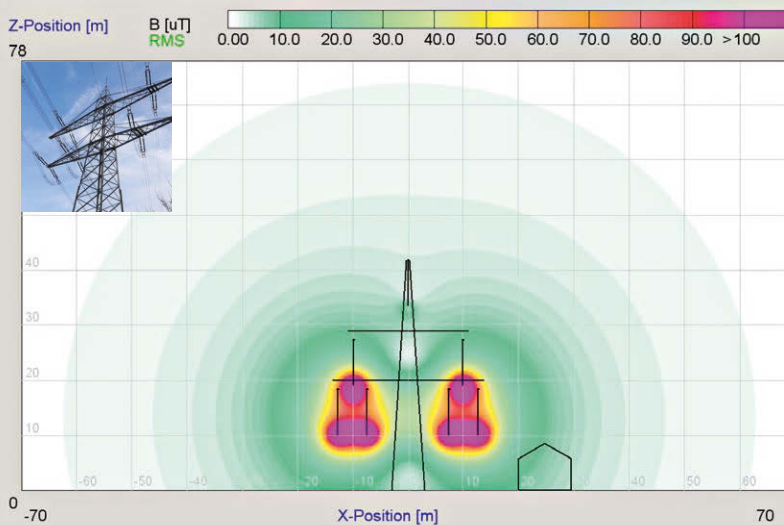
Phasenlage: 123 123, Belastung: 2 x 1000 A



Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer 380 Kilovolt-Freileitung.

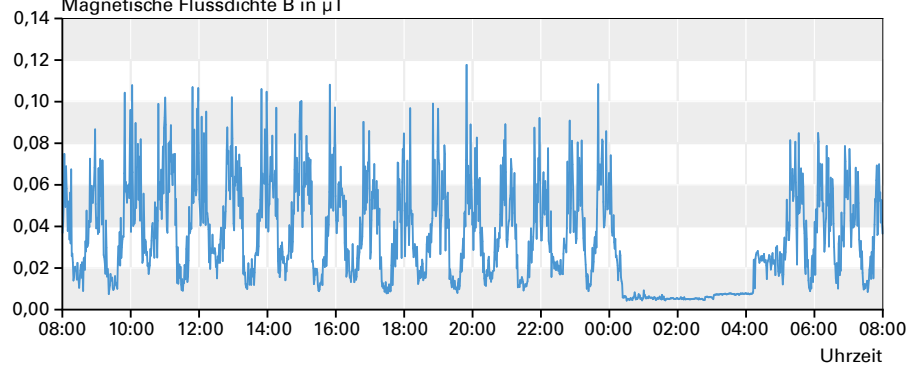
Magnetische Flussdichte der 380-kV-Freileitung im Schnitt

Phasenlage: 123 123, Belastung: 2 x 1000 A



Verlauf der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 380 Kilovolt-Freileitung.

Magnetische Flussdichte B in µT



Tagesgang der magnetischen Flussdichte an der Ammergaubahn in Murnau am Staffelsee in ca. 80 m Entfernung von der Bahnstrecke.

Einsatz

Nieder- frequente Wechsel- felder

0,1 Hz –
30 kHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 68–72

Tipps dazu auf den Seiten 71 und 72

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 Meter) 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 Mikrotelsa 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 Kilohertz umwandelt. Körpernahe Lampenordnungen 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 Kilohertz. 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-Hertz-Wechselspannung umgewandelt. Dabei entstehen höherfrequente Felder im Kilohertz-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.

Magnetische Flussdichten in Mikrottesla in der Nähe von elektrischen Haushaltsgeräten (50 Hertz-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
Haarföhn	6-2.000	0,1-7	0,01-0,3
Elektrorasierer	15-1.500	0,08-9	0,01-0,3
Bohrmaschine	400-800	2-3,5	0,08-0,2
Elektrosäge	250-1.000	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 Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 77–84

Tipps dazu auf Seite 84

Hochfrequente Wechselfelder 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.

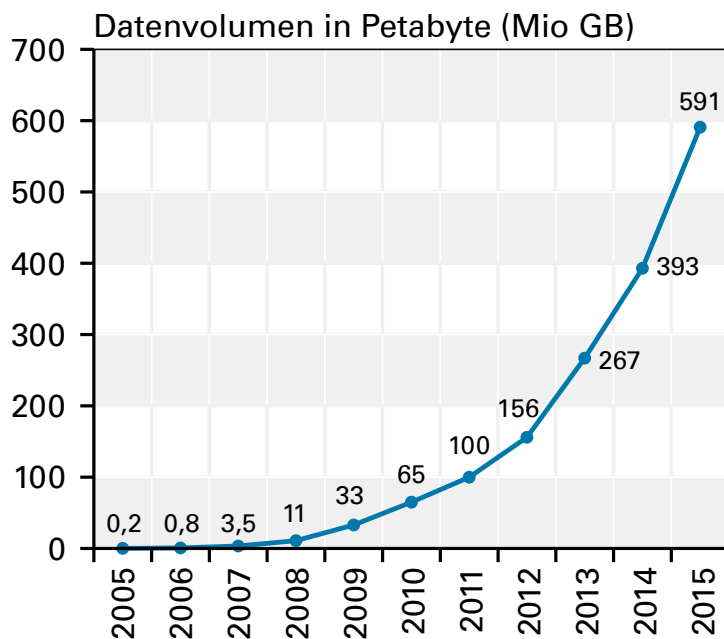
Funksendeanlagen dürfen nur mit einer Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur betrieben werden. Der Betreiber meldet der Bundesnetzagentur die geplante Sendeleistung sowie Art, Ausrichtung, Aufstellort und Montagehöhe der Antennen. Daraus resultieren für diesen Standort bestimmte Sicherheitsabstände,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

In Baden-Württemberg lagen Mitte 2016 für rund 11.000 Standorte ortsfester Funksendeanlagen Standortbescheinigungen vor, in Bayern waren es rund 14.000 Standorte. In Baden-Württemberg war an rund 8.900 und in Bayern an rund 11.900 Standorten mindestens eine Mobilfunksendeanlage installiert. Moderne Smartphones unterstützen neben dem GSM-Standard auch den UMTS- und LTE Standard und wechseln je nach Verfüg-

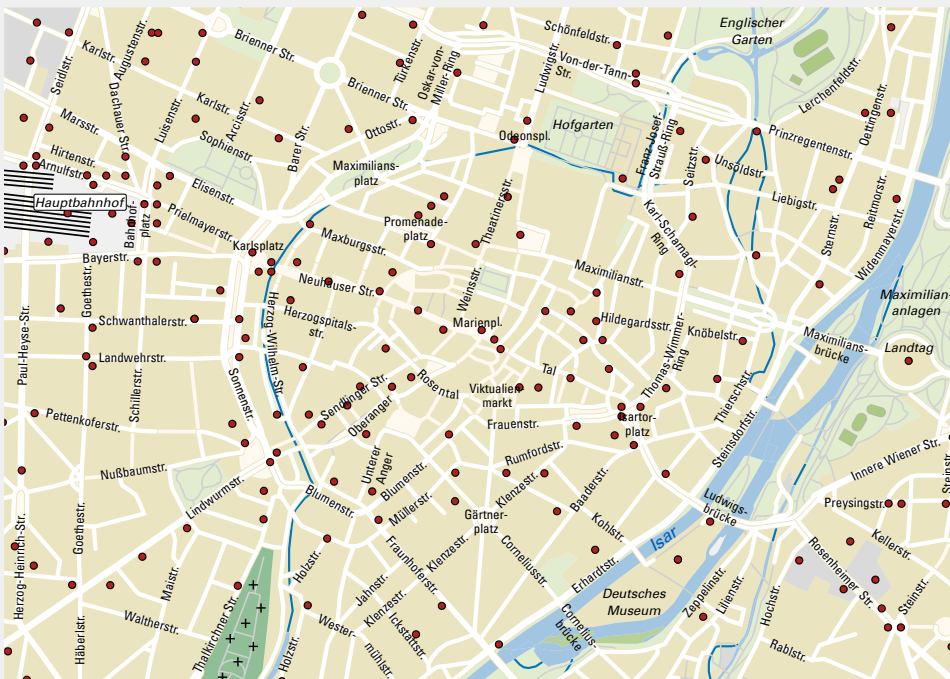
barkeit automatisch zwischen den Netzen. Wegen der hohen Nachfrage nach mobilem Internet (siehe Grafik S. 23) werden die LTE-Netze mit hohem Tempo weiter ausgebaut; die Bedeutung der GSM- und UMTS-Netze schwindet hingegen. In Folge des steigenden Angebots und der starken Nachfrage nach Mobilfunkdiensten 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.

Meist ist nicht die Reichweite der begrenzende Faktor, sondern die Kapazität: Jede Basisstation kann nur eine bestimmte Menge an Gesprächen und Daten gleichzeitig übertragen. Die Größe einer Funkzelle ergibt sich somit aus der Teilnehmerdichte. Innerstädtisch sind die Sendemasten deshalb viel dichter aufgestellt als auf dem Land. Die Karte S. 23 unten zeigt die Standorte der genehmigungspflichtigen Mobilfunkbasisstationen in der Münchner Innenstadt. Auf der Internetseite der Bundesnetzagentur sind alle genehmigungspflichtigen Sender Deutschlands in der EMF-Datenbank (Internet <http://emf3.bundesnetzagentur.de>) verzeichnet.



Datenvolumen im Mobilfunk, Zahlen aus den Jahresberichten der Bundesnetzagentur.



Standorte genehmigungspflichtiger Mobilfunkstationen in der Münchner Innenstadt. Kartenausschnitt ca. 3,1 km x 2,2 km.
Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung (Stand August 2016).

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

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

STRAHLUNG DER HANDYS

Die Sendeleistung des Handys ist von der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation abhängig. Bei schlechter Verbindungsqualität ist eine deutlich höhere Sendeleistung erforderlich als bei guter Versorgung. Bei gutem Empfang wird die Sendeleistung von Mobilfunkendgeräten stark reduziert (siehe Grafik S. 25 oben). UMTS und LTE können die Sendeleistung erheblich effizienter regulieren als in GSM, sie sind daher aus Vorsorgegründen vorzuziehen.

Im Ruhezustand befinden sich Handys in einem reinen Empfangsmodus und senden fast nicht. Ein Handy, das in derselben Funkzelle bleibt, hat zur Anwesenheitskontrolle alle 1 bis 12 Stunden einen kurzen Funkkontakt mit der Basisstation. Moderne Smartphones bauen deutlich häufiger Datenverbindungen zum Internet auf. Durchschnittlich wird im Abstand von wenigen Minuten ein Funkkontakt zum Internet hergestellt. Dies Verhalten wirkt sich unter anderem auf die Akkulaufzeit aus: Die Akkuladung einfacher Mobiltelefone kann zwei Wochen lang reichen, Smartphones müssen meist täglich an die Steckdose.

Im Dauersendebetrieb befindet sich ein Handy nur bei Telefongesprächen und Datenverbindungen. Einen etwa eine Sekunde dauernden Sendevorgang gibt es beim Wechsel der Funkzelle, Anwesenheitskontrolle sowie beim Versenden oder Empfangen einer Kurzmitteilung.

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

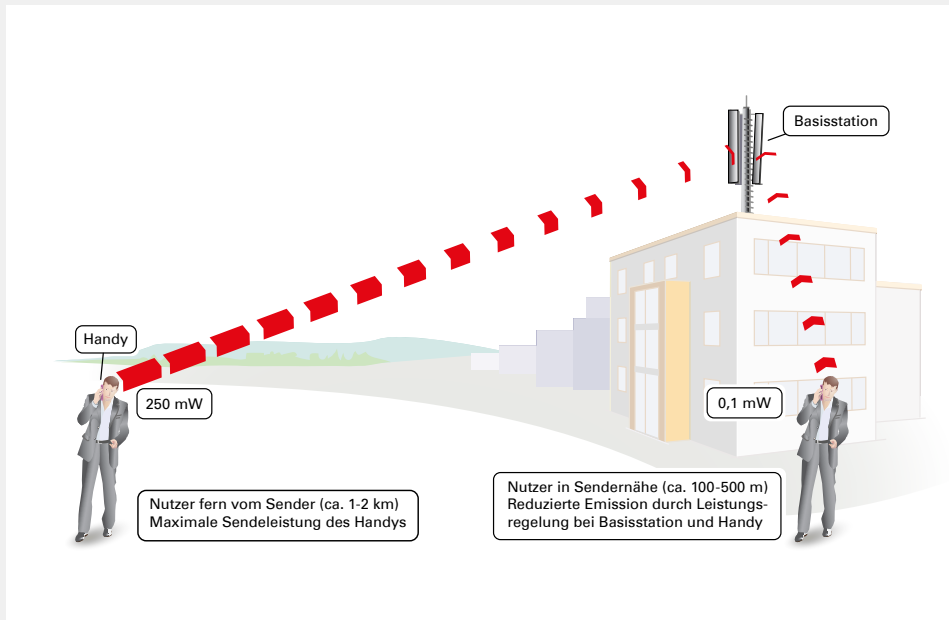
- Strahlungsarme Handys verwenden
- Lange Telefonate nur bei guter Netzversorgung führen (alle Empfangsbalken)
- Handy nicht an den Kopf halten, sondern Freisprecheinrichtung oder kabelgebundenes Headset benutzen
- UMTS-Handys im UMTS-Modus (3G) verwenden

STRAHLUNG DER MOBILFUNKANTENNEN

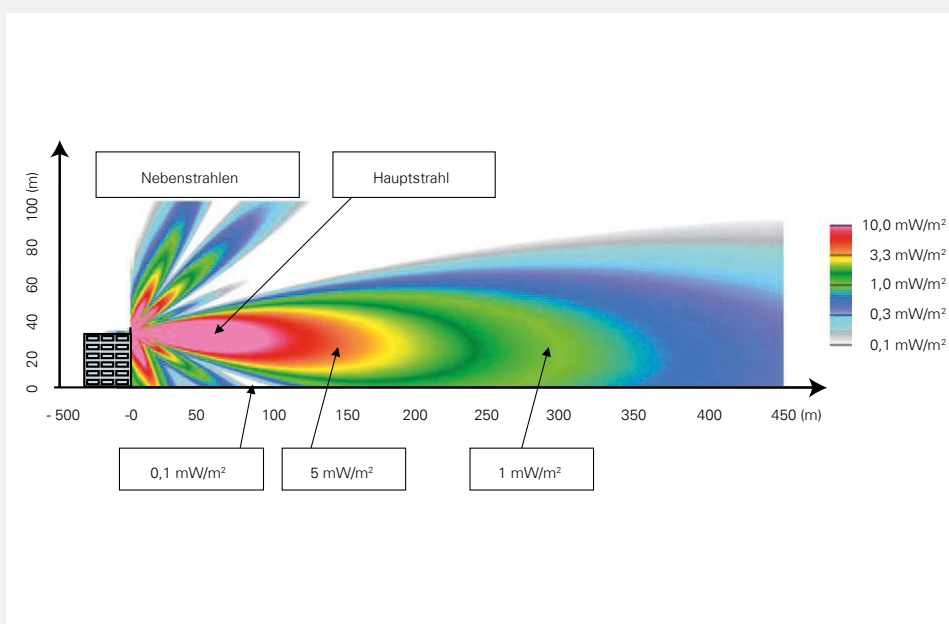
Als Sendeantennen kommen meist Sektorantennen zum Einsatz, sie bündeln den Strahl horizontal und vertikal. Sektorantennen werden gezielt in eine bestimmte Richtung ausgerichtet. Die starke vertikale Bündelung bewirkt, dass der Bereich unterhalb der Antenne wesentlich weniger hochfrequenten elektromagnetischen Wellen ausgesetzt ist, als man dies von der Entfernung her erwarten würde. Deutlich wird dies anhand der Grafik S. 25 unten.

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



Leistungsregelung bei Basisstation und Handy:
Je besser die Funkverbindung zwischen Handy und Basisstation ist, desto mehr wird die Sendeleistung reduziert.



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

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 85–88**

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

RUNDFUNK (RADIO UND FERNSEHEN)

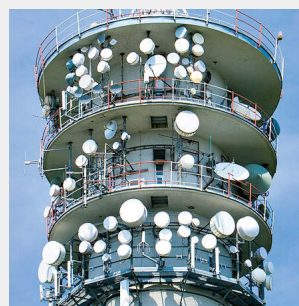
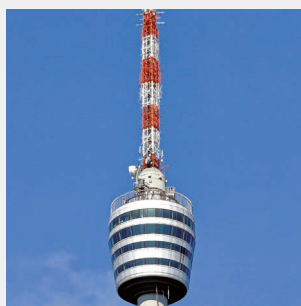
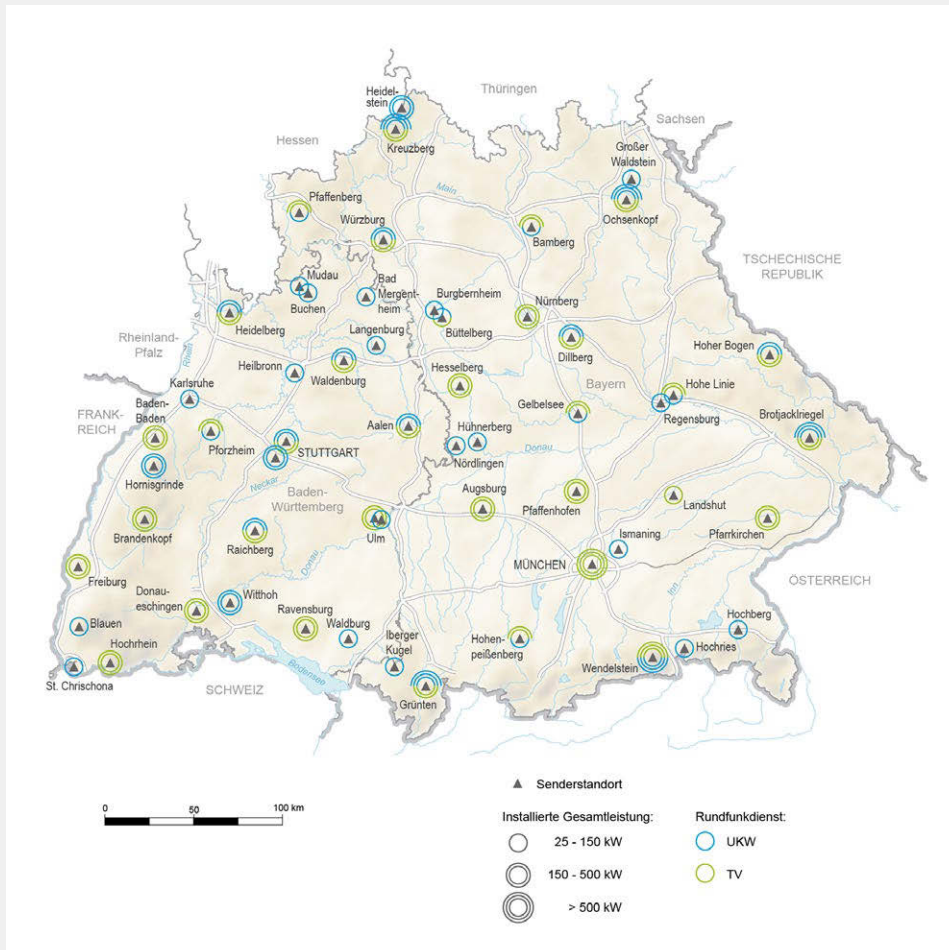
Hochfrequente elektromagnetische Wellen werden auch für Radio- und Fernsehübertragungen genutzt. Beides wird unter dem Begriff Rundfunk zusammengefasst. Anders als beim Mobilfunk mit seinen rund 74.000 leistungsschwachen Sendemasten, die oft nur ein Gebiet von einem Quadratkilometer bedienen, arbeitet 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 Megabit pro Sekunde inklusive VoIP-Telefonanschluss angeboten, deren Leistungsfähigkeit sich teilweise von normalem DSL nicht mehr unterscheidet. Die Immissionen 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.



Verschiedene Informationstechnologien benötigen unterschiedliche Sendeleistungen. Es werden deswegen unterschiedlich starke elektromagnetische Wellen abgestrahlt.

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 91–95**

**Tipps dazu auf den
Seiten 92 und 94**

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 Milliwatt im Ruhebetrieb. Die mittlere Sendeleistung liegt im normalen Betrieb sowohl bei der Basis als auch bei den Mobilteilen unter 10 Milliwatt, die maximale Sendeleistung ist auf 100 Milliwatt beschränkt.

Schnurlose Telefone basieren fast ausschließlich auf dem digitalen DECT-Standard und senden bei Frequenzen um 1.900 Megahertz. Die maximale Sendeleistung beträgt 250 Milliwatt, die mittlere Sendeleistung etwa 10 Milliwatt. 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.

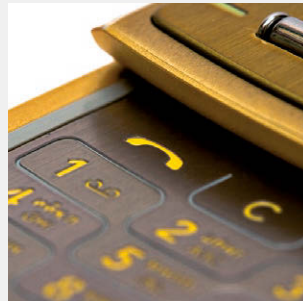
Geräte, die über das Stromnetz verbunden sind, erzeugen keine nennenswerten elektromagnetischen Felder. Bei den Funk-Babyfonen sind diejenigen zu bevorzugen, die nur dann senden, wenn ein Geräusch vorhanden ist. Aus Vorsorgegründen empfiehlt es sich bei allen Geräten, einen Mindestabstand von 2 m zum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

MIKROWELLENHERDE

Mikrowellenherde arbeiten mit elektromagnetischen Wellen hoher Leistung bei Frequenzen um 2.450 Megahertz. 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 86–91

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 Hertz und 3 Gigahertz 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-Technik 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-

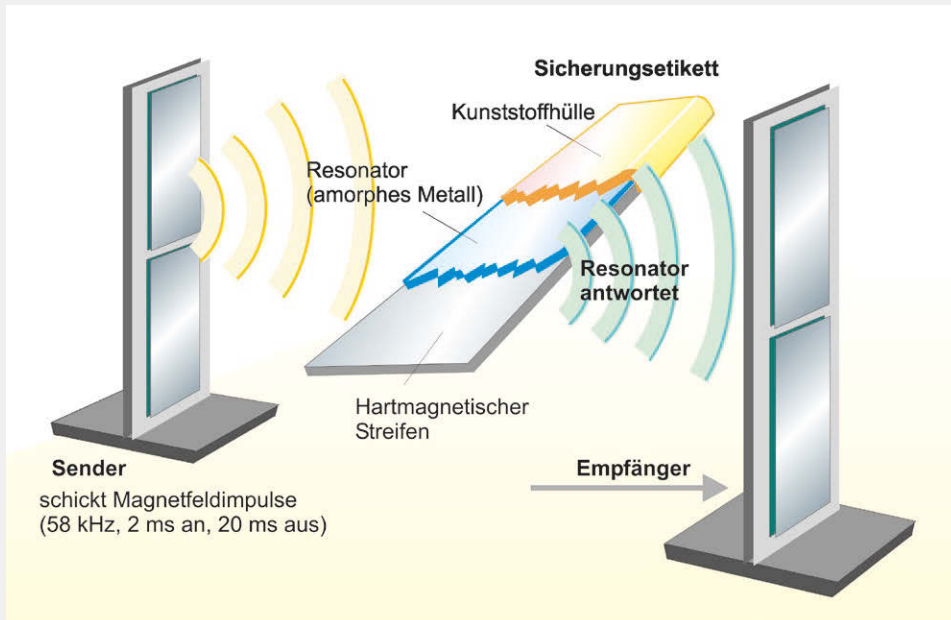
gerät zum Auslesen der Transponder. Gelangt ein Transponder in die Nähe eines Lesegeräts, wird er von dessen Feld aktiviert. Der Transponder enthält einen elektronischen Speicherchip und sendet die darauf gespeicherten Daten an das Lesegerät. Diese Technik wird z. B. bei Klebeetiketten, Scheckkarten,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

BOS-TETRA-DIGITALFUNK

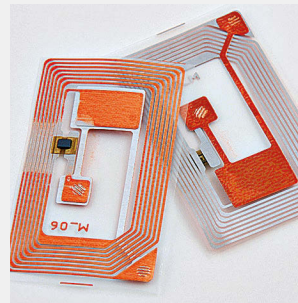
Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie Feuerwehren, Rettungsdienste und Polizei werden zukünftig deutschlandweit über ein gemeinsames digitales Funknetz verfügen, das auf dem internationalen TETRA-Standard basiert. In Bayern und Baden-Württemberg wurden insgesamt ca. 1.600 TETRA-Basisstationen errichtet und im Gegenzug ca. 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 elek-
tromagnetische Wellen
aus.**



**Innenleben einer
RFID-Karte.**

Wirkungen

Wechselwirkungen mit dem Körper

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 100–102

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 niederfrequente Felder der Wechselstromversorgung

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 Hertz)

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.

■ Niederfrequente Felder (0,1 Hertz–30 Kilohertz)

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

■ Hochfrequente Felder (30 Kilohertz–300 Gigahertz)

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



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



Mikrowellentherapie:
Mikrowellen (2.450 Megahertz) verursachen eine oberflächennahe Erwärmung.
Weitere Informationen finden Sie auf Seite 108.

Wirkungen

Reizwirkung

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 101–106

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 Milli- onstel der Stärke außerhalb des Körpers.

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

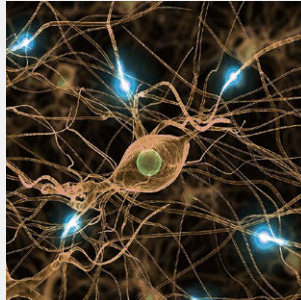
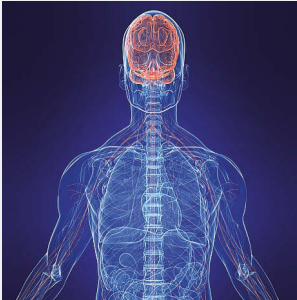
REIZWIRKUNGEN

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 Hertz bis 1 Kilohertz

- für die allgemeine Bevölkerung 2 Milliampere pro Quadratmeter
- bei beruflicher Exposition 10 Milliampere pro Quadratmeter und
- bei überwachter Exposition in der medizinischen Diagnostik oder im Rahmen einer Therapie 100 Milliampere pro Quadratmeter

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



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 Hertz und 300 Hertz.

Wirkungen

Wärme- wirkung

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 106–110

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 Megahertz dringt die Strahlung wenig gehindert in den Körper ein. Bei 70 bis 100 Megahertz 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 Megahertz 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 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.

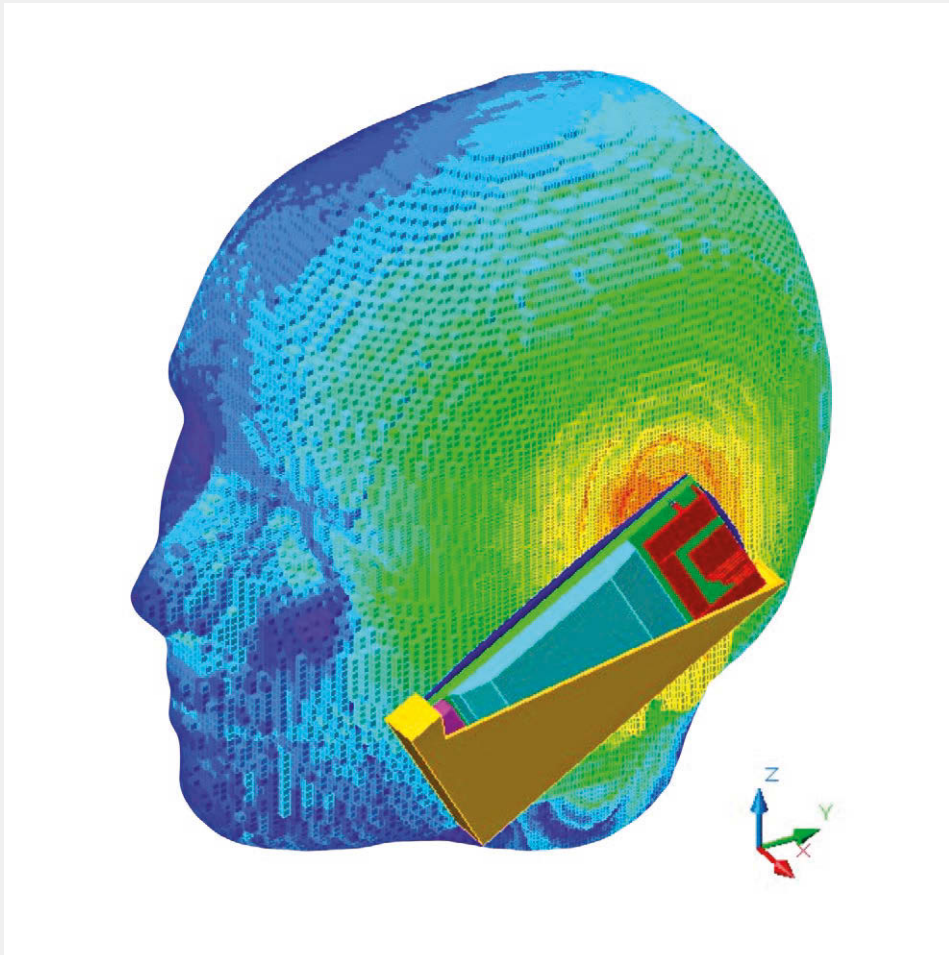
Ganzkörper-SAR-Werte von 1 bis 4 Watt pro Kilogramm führen bei Erwachsenen zu einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von weniger als 1 °C. Körperliche Ar-

beit oder sportliche Betätigung kann eine wesentlich stärkere Erwärmung hervorrufen. Beträgt der Energieumsatz eines Menschen im Ruhezustand ungefähr 1 Watt pro Kilogramm, erhöht er sich beim Gehen auf etwa 3 bis 5 Watt pro Kilogramm. 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 Watt pro Kilogramm 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 Watt pro Kilogramm, 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 Temperaturerhöhungen gezielt genutzt, um einen therapeutischen Effekt zu erzielen. Dabei werden Teilkörper-SAR-Werte von 10 bis über 50 Watt pro Kilogramm angewendet.



Exposition des Menschen durch die hochfrequenten elektromagnetischen Felder eines Handys.

Wirkungen

Sonstige Wirkungen

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 110–114

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.

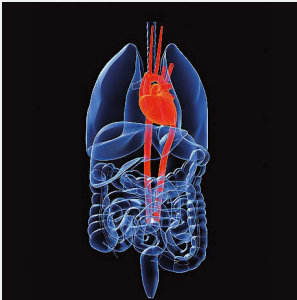
NIEDERFREQUENTE FELDER UND KREBS

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

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.



**Elektromagnetische
Felder werden als mögli-
cherweise krebserregend
eingestuft.**

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), Bitumendämp- fe und Abgase von Dieselmotoren
Gruppe 2b – „für Menschen möglicherweise krebserregend“	über 200 Stoffe, z. B. konserviertes saures Gemü- se und Kaffee, elektromagne- tische Felder
Gruppe 3 – „nicht klassifizierbar“	ca. 500 Stoffe, z. B. Tee und Saccharine
Gruppe 4 – „für Menschen wahrscheinlich nicht krebserregend“	Caprolactam (kristalliner Feststoff)

Wirkungen

Sonstige Wirkungen

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 115–118

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 beein-

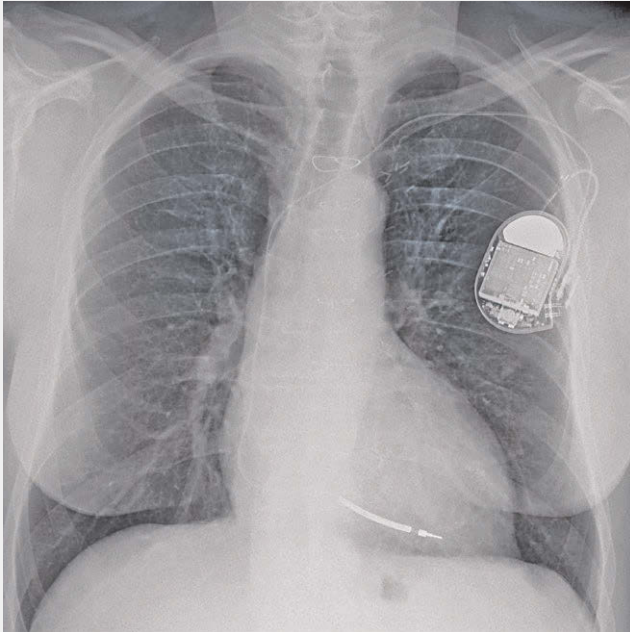
trächtigen. Störungen sind z. B. nicht ausgeschlossen

- unmittelbar unter einer 380-Kilovolt-Hochspannungsfreileitung
- im Überwachungsbereich von Artikelsicherungsanlagen und Metalldetektoren
- bei der körpernahen Verwendung von Geräten mit starken Motoren wie z. B. Bohrmaschinen und
- bei statischen Magnetfeldern über 500 Mikrottesla.

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, Cochleaimplantate 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

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.

Bedingungen für die Dauer von 8 Stunden pro Arbeitstag ausgesetzt sind. Hier liegen die Grenzwerte bei 10 Milliampere pro Quadratmeter (Stromdichte) bzw. 0,4 Watt pro Kilogramm (Ganzkörper-SAR-Wert) und 10 Watt pro Kilogramm (Teilkörper-SAR-Wert).

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 120–125

Basisgrenzwerte beruhen auf gesicherten Schwellenwerten der im Gewebe wirkenden Einflussgrößen. Im Niederfrequenzbereich ist dies die Stromdichte in Milliampere pro Quadratmeter, im Hochfrequenzbereich die Spezifische Absorptionsrate (SAR) im Gewebe in Watt pro Kilogramm. 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.

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 gesetzlichen Regelungen beinhalten Grenzwerte mit hohem Sicherheitsfaktor.

Der empfohlene Basisgrenzwert für die Stromdichte bei niederfrequenten Feldern im Körper beträgt generell 2 Milliampere pro Quadratmeter. Im Hochfrequenzbereich werden ein Ganzkörper-SAR-Wert von 0,08 Watt pro Kilogramm und ein Teilkörper-SAR-Wert von 2 Watt pro Kilogramm empfohlen.

Die 26. BImSchV enthält Anforderungen an ortsfeste Anlagen mit Frequenzen zwischen 0 Hertz und 300 Gigahertz. Beispielsweise muss bei 50 Hertz Wechselstromleitungen für das elektrische Feld ein Grenzwert von 5 Kilovolt pro Meter eingehalten werden und eine magnetische Flussdichte von 100 Mikrottesla. Im Mobilfunkbereich sind die einzuhaltenden Grenzwerte von der Frequenz abhängig, bei LTE mit Frequenzen über 2 Gigahertz sind es 61 Volt pro Meter für das elektrische Feld und 0,16 Ampere pro Meter für die magnetische Feldstärke. Nicht ortsfeste Quellen wie Haushaltsgeräte oder Handys werden von der 26. BImSchV nicht erfasst.

Für beruflich exponierte Menschen gelten höhere Grenzwerte, da sie den elektromagnetischen Feldern unter kontrollierbaren

Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen gemäß der 26. BImSchV

Frequenz in Hz	Elektrische Feldstärke in kV/m	Magnetische Flussdichte in μT
0	-	500
1 bis 8	5	$40.000/f^2$
8 bis 25	5	$5.000/f$
25 bis 50	5	200
50 bis 400	$250/f$	200
400 bis 3.000	$250/f$	$80.000/f$
3.000 bis 10.000.000	0,083	27

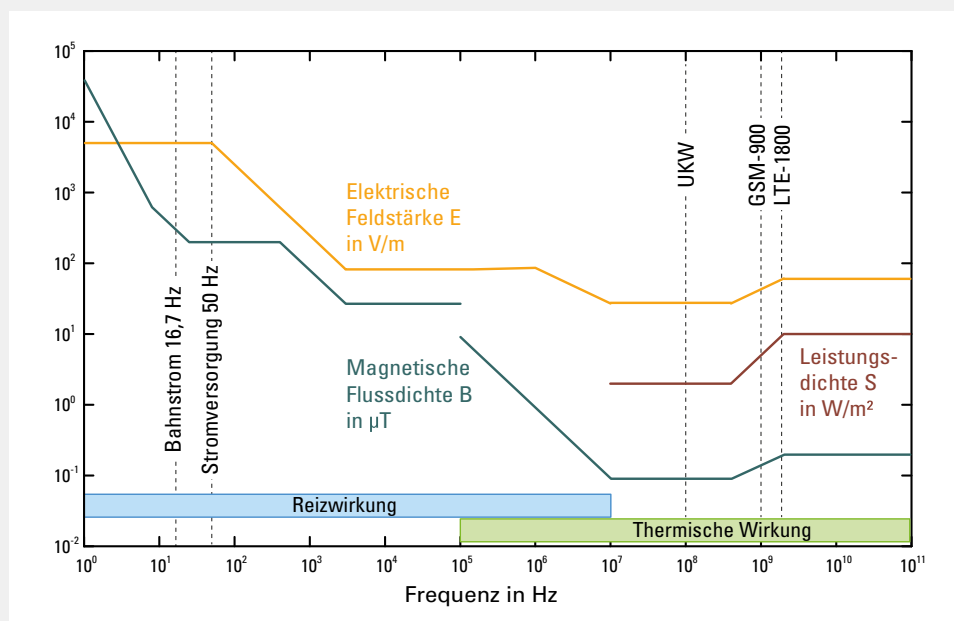
Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen gemäß der 26. BImSchV

Frequenz in MHz	Elektrische Feldstärke in V/m	Magnetische Feldstärke in A/m
0,1 bis 1	87	$0,73/f$
1 bis 10	$87/\sqrt{f}$	$0,73/f$
10 bis 400	28	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.

In Deutschland maßgebliche Referenzwerte auf Grundlage der 26. BImSchV. Die Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen oberhalb 0,1 MHz sind hier als magnetische Flussdichte dargestellt.



Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 1 Hz bis 100 GHz für die Allgemeinbevölkerung in Deutschland (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. Es bildet sich auch dann aus, 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 (siehe Abb. 3).

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, auch als magnetische Feldstärke H bezeichnet, wird in Ampere pro Meter (A/m) angegeben.

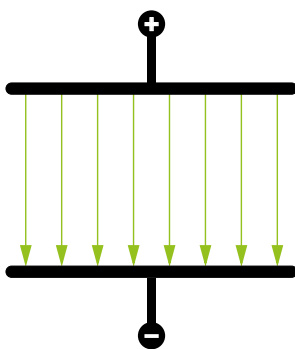


Abb. 1: Homogenes elektrisches Feld (Plattenkondensator; idealisiert).

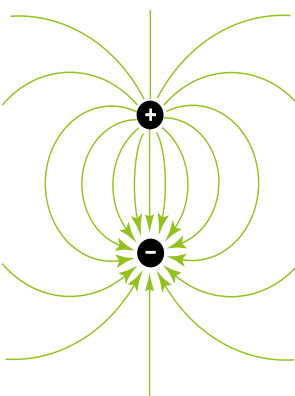


Abb. 2: Inhomogenes elektrisches Feld zweier Ladungen (Dipol).

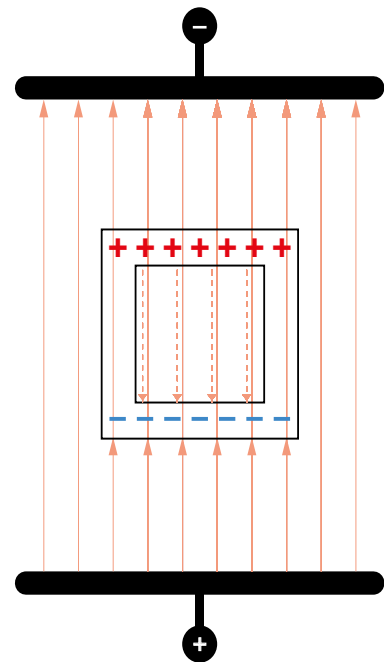


Abb. 3: Ein externes Feld führt bei guten Leitern zu einer Ladungsverschiebung. Dadurch wird im Innern ein Gegenfeld erzeugt (im Bild gestrichelt dargestellt). In der Folge neutralisieren sich die Felder.

Die magnetische Flussdichte B gibt die Stärke des magnetischen Feldes H in Materie an, ihre Maßeinheit lautet Tesla (T). 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, die Permeabilität μ , direkt verknüpft. In Luft entspricht 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 Abb. 4 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 (siehe Abb. 5).

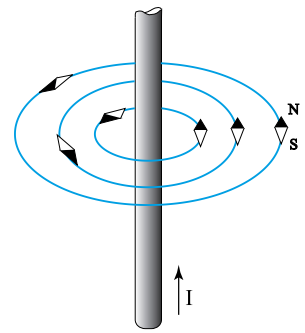


Abb. 4: Magnetfeldlinien eines stromdurchflossenen Leiters.

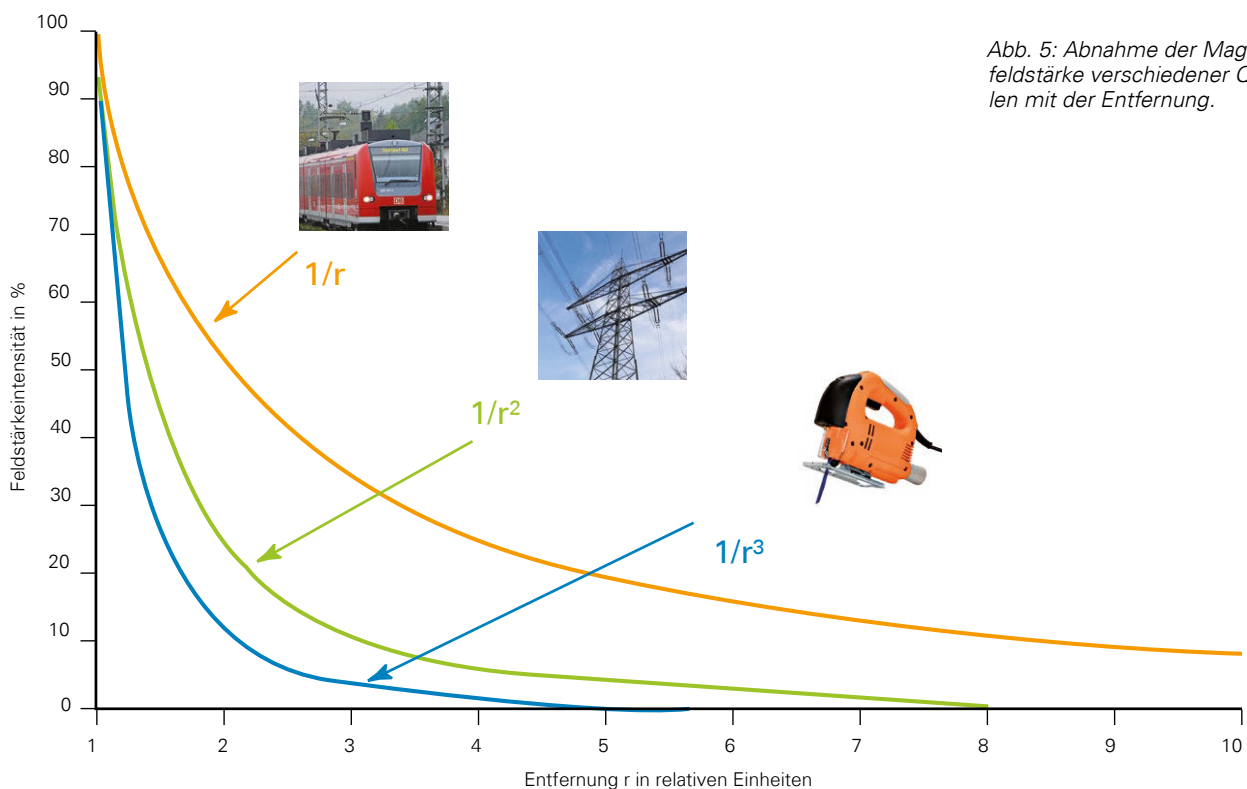


Abb. 5: Abnahme der Magnetfeldstärke verschiedener Quellen mit der Entfernung.

$1/r$: 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. Typischerweise erfolgt dieser Polaritätswechsel in Form einer Sinusschwingung, wie sie in der Abb. 6 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 angegeben. Beim Mobilfunk liegt die Wellenlänge zwischen 15 und 30 cm.

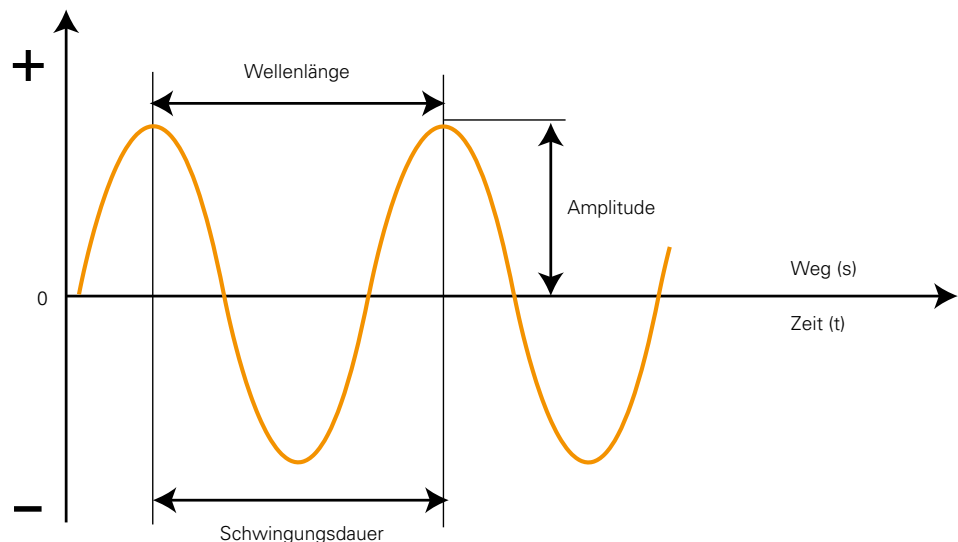
Wasserwellen wandern mit der Zeit über die Wasseroberfläche; an einem festen Ort schwankt der Wasserstand fortwährend. Ein Schiff, das auf einer festen Stelle ankert, schwingt an dieser Stelle auf und ab. Die Zeitdauer zwischen zwei Wellenbergen

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 angegeben.

Abb. 6: Verlauf einer sinusförmigen Welle.



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, 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 Abb. 7), 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.

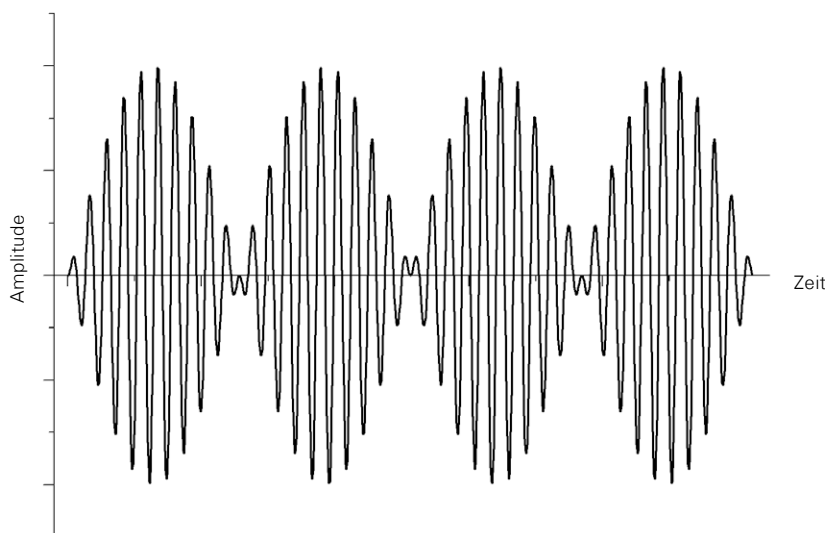


Abb. 7: Die einfachste Form einer Modulation: Amplitudenmodulation.

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 Kiloherz (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 umfasst einen weiten Frequenzbereich (Abb. 8). 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, auch Radiofrequenzband genannt, setzt sich zusammen aus den Bereichen Langwelle (LW), Mittelwelle (MW), Kurzwelle (KW) und Ultrakurzwelle (UKW).

Im Bereich von 300 MHz bis 300 GHz spricht man von Mikrowellen. Den Mikrowellenbereich nutzen zum Beispiel Fernsehsender, Mobilfunknetze, Radaranlagen und Mikrowellenherde. Zwischen 300 GHz und 384 THz (1 mm bis $0,78 \mu\text{m}$) liegt der Bereich der infraroten oder auch Wärmestrahlung. Jenseits davon, bei Frequenzen zwischen 384 THz und 789 THz (780 nm bis 380 nm), nimmt das menschliche Auge die Strahlung wahr: Hier haben wir es mit dem sichtbaren Licht zu tun.

Das elektromagnetische Spektrum wird in den Bereich der nicht ionisierenden und der ionisierenden Strahlung aufgeteilt. Zur ionisierenden Strahlung zählen die kurzwellige ultraviolette Strahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung. Aufgrund ihrer hohen Energie ist sie in der Lage, Bindungen zwischen Atomen und Molekülen im Körper zu lösen. Die Grenze zwischen den beiden Bereichen liegt bei Wellenlängen zwischen 100 nm und 200 nm. Ionisierende Strahlen sind nicht Gegenstand dieser Broschüre; hier wird ausschließlich auf den Bereich der nichtionisierenden Strahlung bis 300 GHz eingegangen (Niederfrequenz bis Mikrowellen).

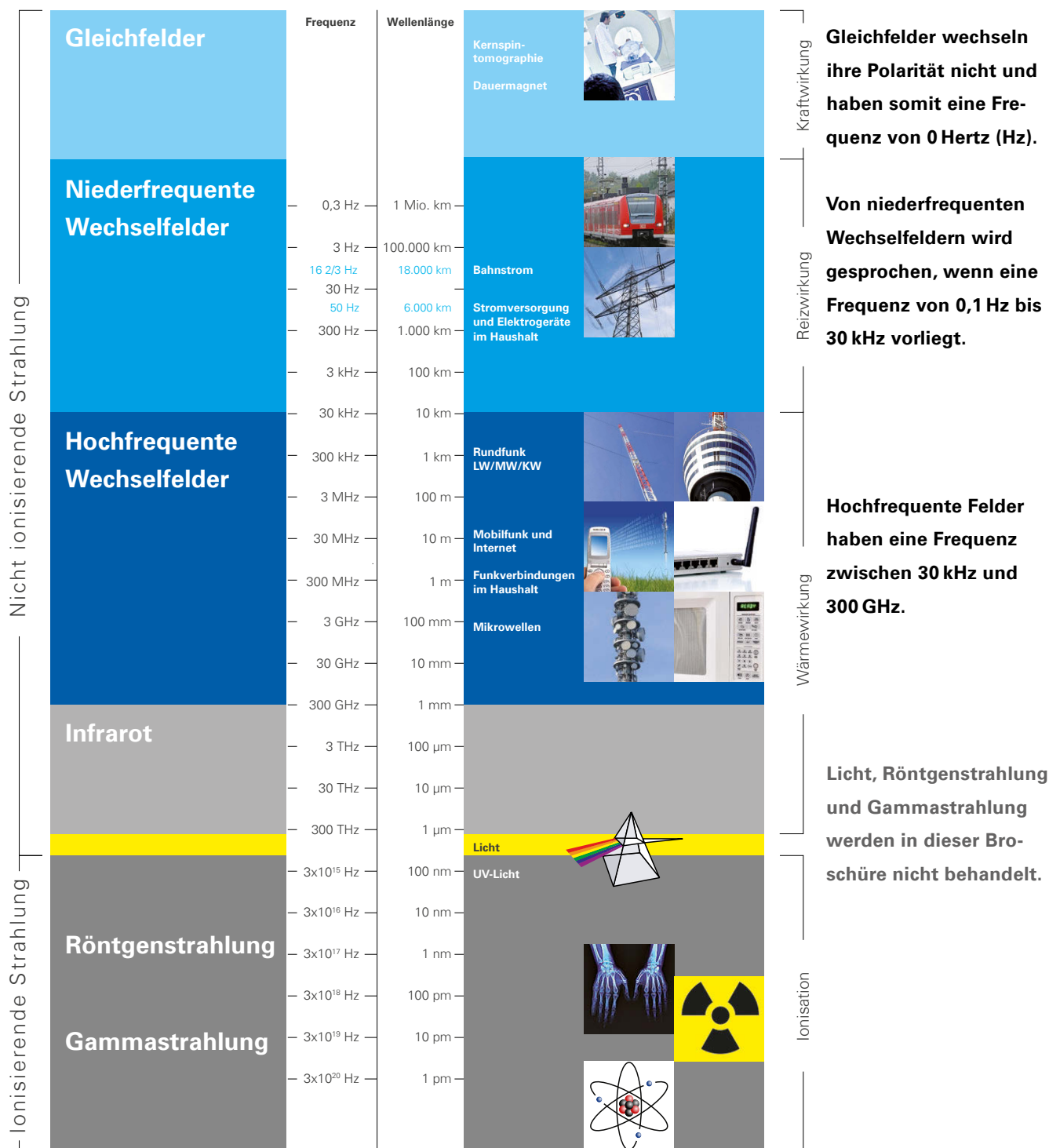


Abb. 8: Elektromagnetisches Spektrum

2 Natürliche elektromagnetische Felder

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

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 sowie die natürliche elektromagnetische Strahlung der Sonne (Licht- und Wärmestrahlung).

Der letzte sog. Polsprung erfolgte vor etwa 780.000 Jahren. 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.

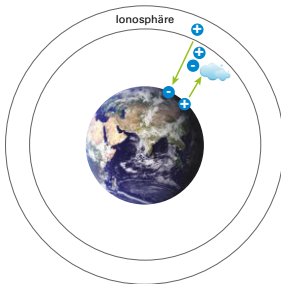


Abb. 9: Elektrisches Feld der Erde.

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 (siehe Abb. 9). 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.

Im Winter ist die Feldstärke 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 sogar Werte von etwa 200.000 V/m erreicht.

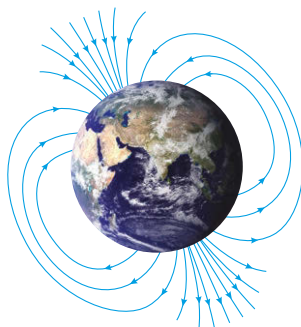


Abb. 10: Feldlinien des Erdmagnetfeldes (schematisch).

2.2 MAGNETFELD DER ERDE

Die geomagnetischen Pole der Erde fallen nicht genau mit ihren geographischen Polen zusammen und sind auch nicht ortsfest. Das Erdmagnetfeld verändert sich im Laufe der Jahrhunderte, in unregelmäßigen Abständen kehrt sich die Polarität sogar um.

Das statische Erdmagnetfeld, das die ganze Erde vom Südpol bis zum Nordpol umgibt (Abb. 10), hat am Äquator eine Flussdichte von ca. $30 \mu\text{T}$ und an den Polen von ca. $70 \mu\text{T}$ (Abb. 11). 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 (Abb. 10) 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 Inklinationswinkel („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° .

Zum Erdmagnetfeld tragen drei Anteile bei:

- Das Feld des flüssigen Erdkerns (Hauptfeld, Anteil ca. 96 %)
- Oberflächennahe magnetisierte Mineralien in der Erdkruste (Krustenfeld, Anteil ca. 2 %)

- Effekte der äußeren Atmosphäre, die sich unter dem Einfluss der Sonneneinstrahlung und des Sonnenwindes ständig ändern (Magnetosphäre und Ionosphäre, Anteil ca. 2 %).
- Weitere Informationen sowie einen Online-Erdmagnetfeldrechner gibt es beim Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam [1].

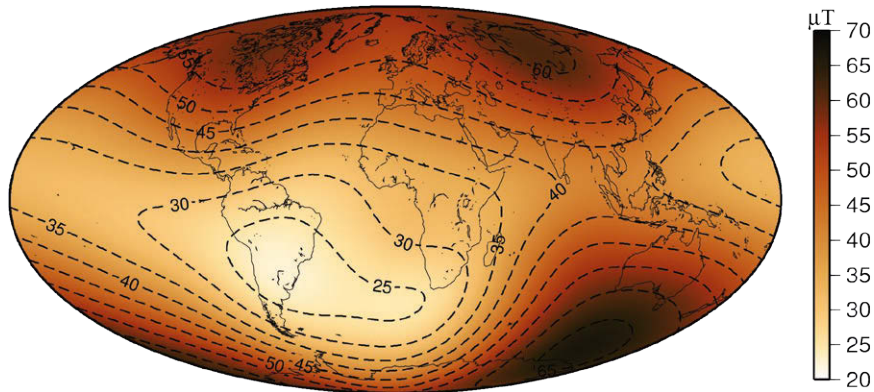


Abb. 11: Das Magnetfeld der Erde hat am Äquator eine Flussdichte von ca. $30 \mu\text{T}$, an den Polen ist es etwa doppelt so groß, Stand 2015.

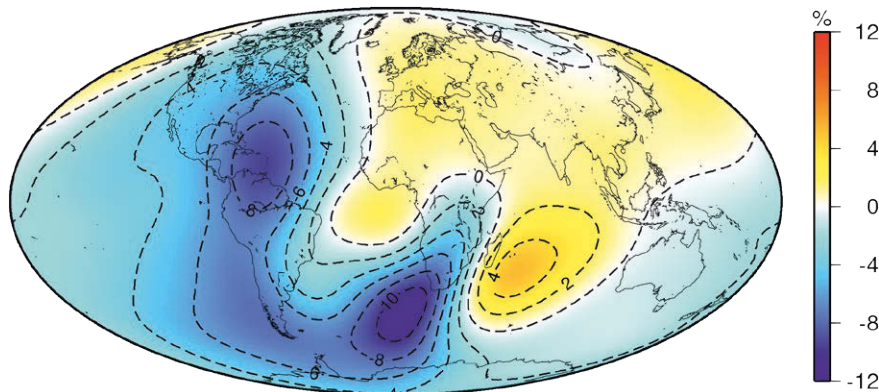


Abb. 12: Prozentuale Änderung der Stärke des magnetischen Hauptfelds von 1980 bis 2015, Stand 2015.

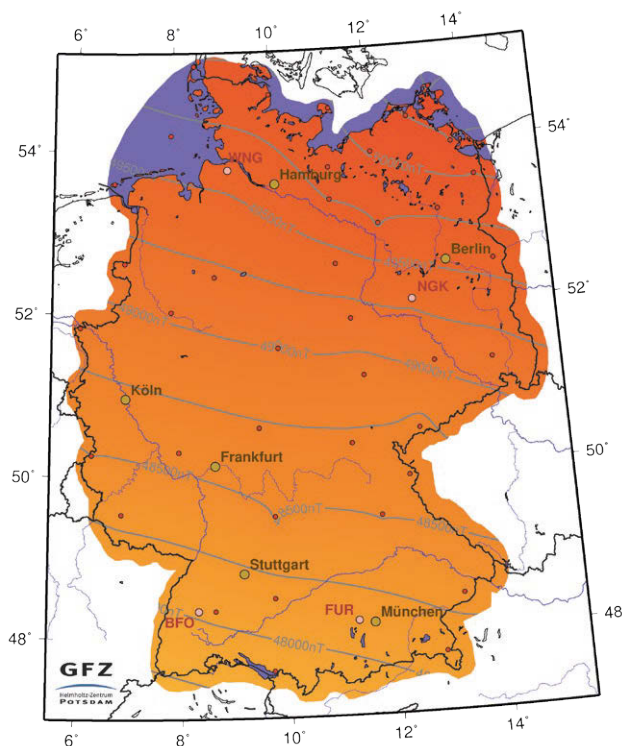


Abb. 13: Magnetisches Hauptfeld in Deutschland, Stand 2012.

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

Das Erdmagnetfeld hat in der Entwicklungsgeschichte der Organismen seine Spuren hinterlassen. So nutzen es einige Tiere wie zum Beispiel Tauben, Zugvögel, Meeresschildkröten, Haie und wahrscheinlich auch Wale zur Orientierung. Diesen Sachverhalt nennt man Magnetotaxis.

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 anzu- steuern, in denen es optimale Wachstumsbedingungen vorfindet [2]. Magnetosome 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 Magnetfeld. 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].

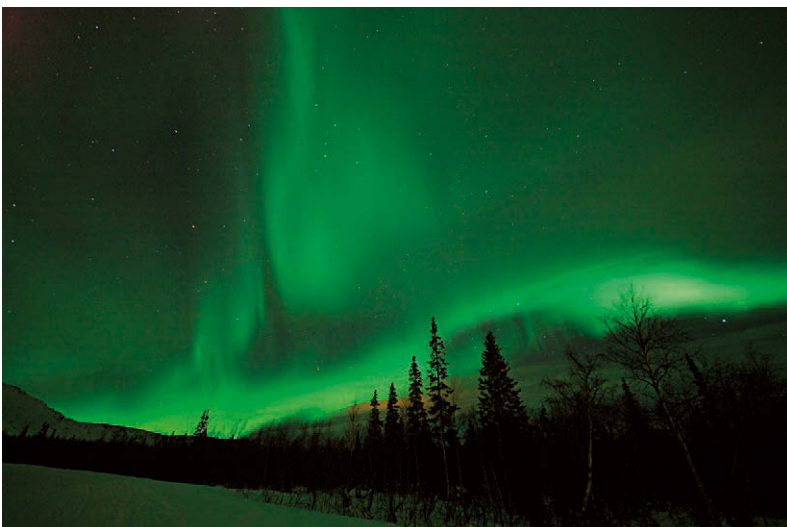
2.3 WEITERE NATÜRLICHE FELDER

Jede Stunde entladen sich 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.

Abb. 14: Polarlicht.



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 würde bei mittlerem Abstand zwischen Erde und Sonne und 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. Auf hohen Bergen, wo in 3-4 km Höhe die Atmosphäre viel dünner ist, werden im Sommer bis zu 1.000 W/m² erreicht. Hingegen sind es im Winter beim Sonnenhöchststand von 18° nur etwa 250 W/m².

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.

Tab. 1: 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	130-270V/m
Gewitter	bis 20.000V/m
Spitzen bei der Blitzauslösung	200.000V/m
Statisches Erdmagnetfeld	25-70 µT
im Mittel in Bayern und Baden-Württemberg	48 µT
Blitznähe	1.000 µT



Abb. 15: Blitze verursachen starke elektromagnetische Impulse und Magnetfelder.

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 ÖFFENTLICHE STROM- VERSORGUNG

Auch wenn es wie eine Einheit wirkt – das Stromnetz besteht aus vielen Teilnetzen, die seit der Liberalisierung des Strommarktes von unterschiedlichen Firmen betrieben werden. Die Stromleitungen zur Versorgung der Endkunden befinden sich meist in der Hand lokaler Energieunternehmen. Die überregionalen Übertragungsnetze hingegen werden in Deutschland von vier Anbietern unterhalten (siehe Abb. 16). Sie sind zu einem Verbundnetz zusammengeschlossen und in das europäische Verbundnetz eingebunden, das dem Stromaustausch zwischen den einzelnen Staaten dient.

Nach dem Beschluss der Bundesregierung zum Ausstieg aus der Kernenergie wurde die Notwendigkeit des Ausbaus der Stromnetze, insbesondere der Übertragungsnetze offensichtlich. Schwankende Energiequellen wie Wind oder Sonne stellen gänzlich andere Anforderungen an die Stromnetze als bisher. Große Windparks im Norden und Osten Deutschlands sowie offshore vor der Nord- und Ostseeküste erzeugen Energiemengen, die dort nicht verbraucht werden können. Umgekehrt existieren im Süden der Republik Verbrauchsschwerpunkte durch die dortigen Industrien, deren Bedarf durch die in Baden-Württemberg und Bayern bestehenden regenerativen Energieanlagen nicht gedeckt werden kann. Mehrere Neubauprojekte widmen sich deshalb dem Energietransport zwischen Nord- und Süddeutschland.

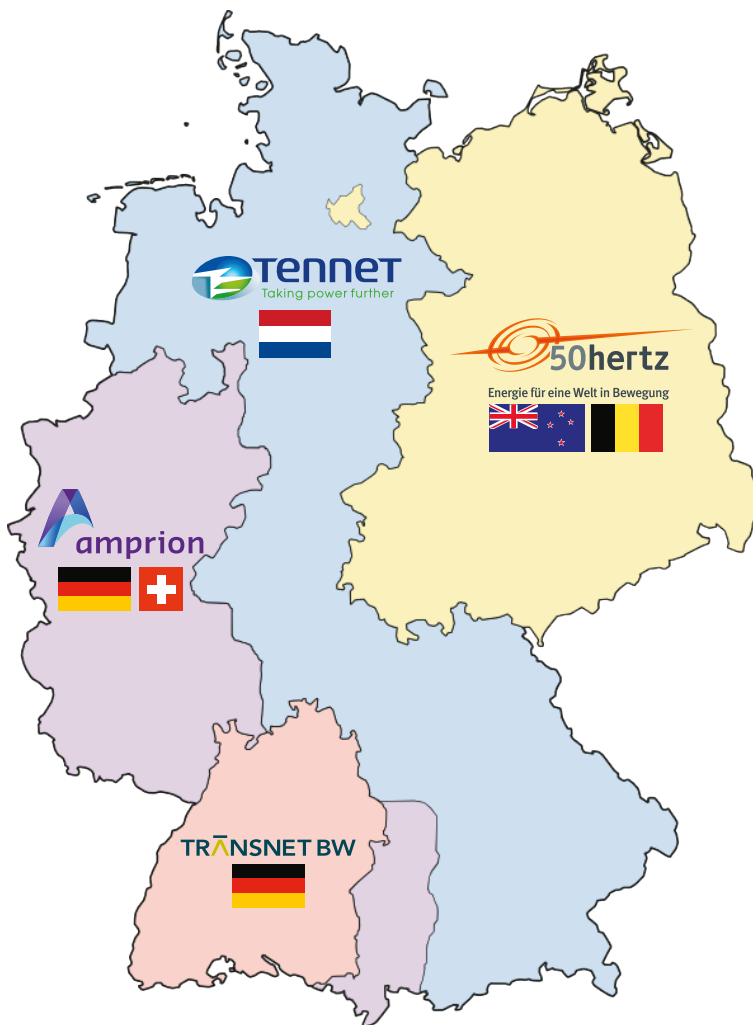


Abb. 16: Zuständigkeitsgebiete der Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland. Maßgeblich ist der Endpunkt einer Übertragungsleitung.

Stromnetze können oberirdisch als Freileitung oder unterirdisch als Erdkabel ausgeführt werden. Stand der Technik ist die Ausführung als Freileitung. Eine Erdverkabelung ist mit Nachteilen und erheblichen Mehrkosten verbunden: Auf Grund der erforderlichen Erdarbeiten ist sie je nach Bodenbeschaffenheit oder vorhandenen Hindernissen vier- bis zehnmal teurer als eine Freileitung. Im Fehlerfall ist die Zugänglichkeit der Kabel deutlich erschwert; landwirtschaftlich ist die Trassenfläche nur bedingt nutzbar. Übertragungsverluste verursachen zudem einen deutlichen Wärmeeintrag in den Erdboden, dessen Auswirkungen auf Natur und Landwirtschaft langfristig noch nicht absehbar sind.

Technisch lassen sich Stromnetze in Gleichstromnetze (HVDC: High Voltage Direct Current; HGÜ: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) und Wechselstromnetze (HVAC: High Voltage Alternating Current) unterteilen. Bislang waren in Deutschland Wechselstromnetze vorherrschend. Diese bieten den Vorteil, weite Verzweigungen realisieren zu können. Dem gegenüber sind Gleichstromstrecken stets Verbindungen von Punkt zu Punkt. Sie weisen meist keine Abzweige auf, sondern verbinden nur einen Einspeise- mit einem Ausspeisepunkt. Dort sorgen sogenannte Konverter für die Umwandlung zwischen Wechsel- und Gleichstrom und umgekehrt. HGÜ zeichnet sich durch besonders niedrige Energieverluste aus. Diese Technik ist deshalb prädestiniert, um große Energiemengen über weite Entfernungen zu übertragen. Weltweit wird sie bereits bei einer Vielzahl von Projekten eingesetzt. Auch die Anbindung von Offshore-Windparks mittels Seekabel erfolgt fast immer mit HGÜ-Technik. Seit 2016 besteht darüber hinaus im Rahmen des Bundesbedarfsplangesetzes die gesetz-

liche Verpflichtung, bestimmte HGÜ-Vorhaben mittels Erdkabeln zu realisieren.

Die Bundesnetzagentur veröffentlicht regelmäßig Übersichten zum aktuellen Planungsstand und konkreten Vorhaben unter www.netzausbau.de. Weiterführende Informationen finden sich auch beim Bundesamt für Strahlenschutz unter www.bfs.de/DE/themen/emf/netzausbau/netzausbau_node.html

3.1.1 NETZEBENEN

Die öffentliche Stromversorgung erfolgt in Deutschland mit Wechselstrom von 50 Hz auf vier Ebenen (siehe Abb. 17):

- Höchstspannungsnetz zur zielgerichteten Übertragung großer Energiemengen über weite Entfernungen,
- Hochspannungsnetze zur groben Verteilung der Energie,
- Mittelspannungsnetze als regionale Verteilebene,
- Niederspannungsnetze für den Anschluss der Haushalte auf Ortsebene.

Übertragungsnetze werden meist mit Höchstspannungen (380 kV oder 220 kV) betrieben. 220 kV-Neubauten kommen nicht mehr vor, da der bau- und genehmigungstechnische Aufwand gleich ist wie bei 380 kV-Vorhaben, letztere aber deutlich leistungsfähiger sind. Von zunehmender Bedeutung ist die Technik der Gleichstromübertragung (HGÜ) mit Spannungsebenen zwischen 500 kV und 800 kV. Die Hochspannungsnetze (60 kV bis 110 kV) übertragen den Strom von Höchstspannungs-Umspannwerken zu den Verbrauchsschwerpunkten. Großindustrielle Betriebe, z.B. die Stahlindustrie als Abnehmer oder mittelgroße Kraftwerke als Einspeiser, sind hieran direkt angeschlossen. Die Bahn bezieht den Strom für ihr Schienennetz (Abschnitt 3.2) ebenfalls aus

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

dieser Spannungsebene. Umspannwerke sorgen für die weitere Verteilung Richtung Mittelspannungsebene. Mittelspannungsnetze (1 kV bis 50 kV) übernehmen die Verteilung zu den Transformatorstationen in Städten und Gemeinden und den gewerblichen Großabnehmern. Niederspannungsnetze (unter 1 kV) binden die Haushalte und Büros an. Hierzu werden im kommunalen Bereich überwiegend Erdkabel verwendet. Mit einer Gesamtlänge von

mehr als 1 Mio. Kilometer bilden diese den mit Abstand größten Teil der bundesdeutschen Stromnetze. Niederspannungsnetze befinden sich meist in der Hand regionaler und kommunaler Netzbetreiber, beispielsweise den örtlichen Stadtwerken. Um Leitungsverluste auszugleichen, liegen die Betriebsspannungen in der Praxis rund 10 Prozent über den jeweiligen Nennspannungen.

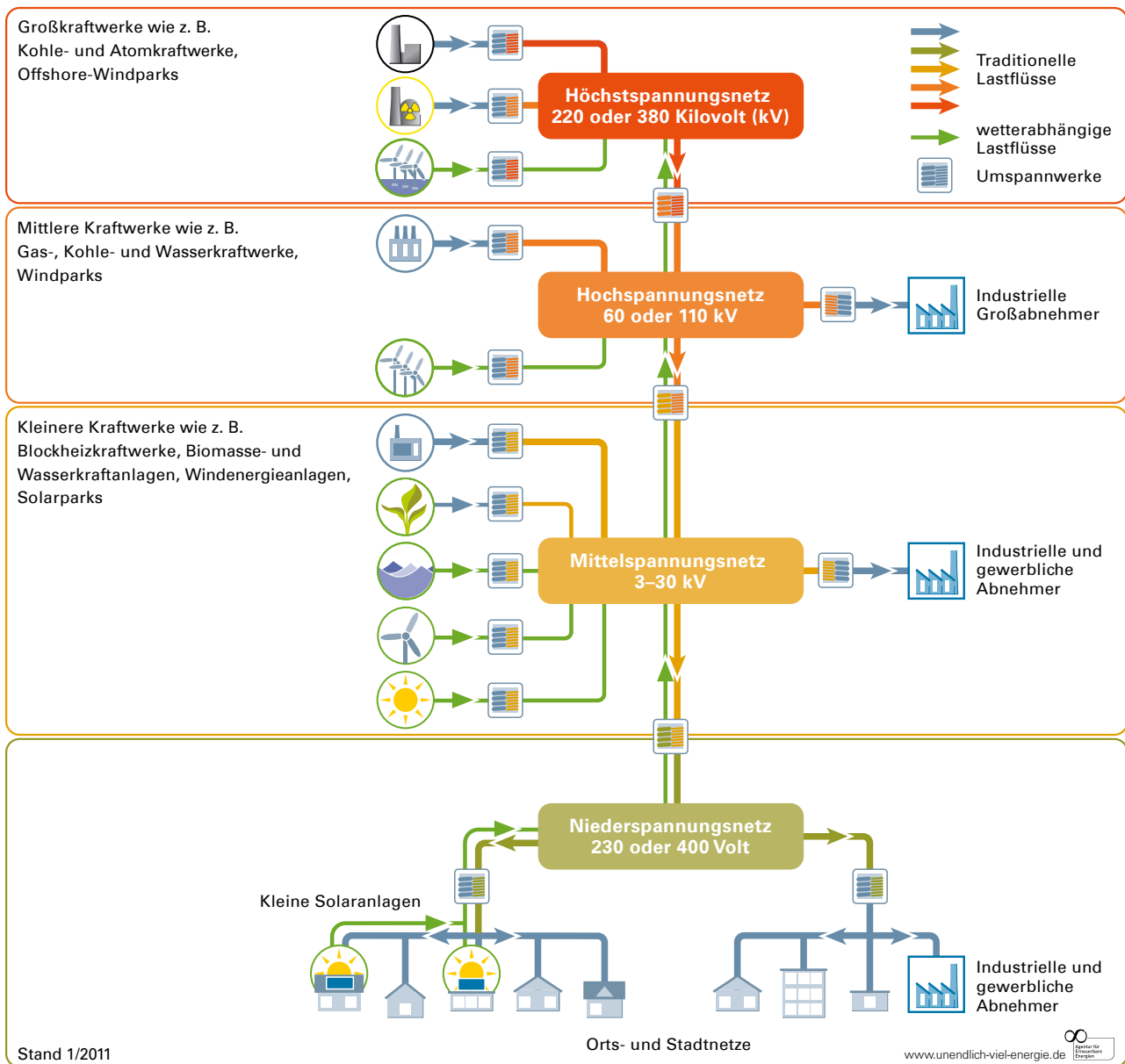


Abb. 17: So funktioniert unsere Stromversorgung: Das Stromnetz in Deutschland ist traditionell als Einbahnstraße konzipiert. Das Höchstspannungs- oder Übertragungsnetz transportiert den Strom aus Großkraftwerken über große Entfernungen zu den Verbrauchsschwerpunkten. Die Hochspannungsnetze verteilen den Strom in einer größeren Region auf die Mittelspannungsnetze. Von dort fließt er in die lokalen Niederspannungsnetze, an die kleine Stromverbraucher angeschlossen sind. Durch den Ausbau von Wind- und Solarenergie kehren sich die Lastflüsse zeitweise um: Dann fließt Strom von den unteren in die oberen Spannungsebenen.

3.1.2 TECHNIK UND FELDER

Das öffentliche Stromnetz in Deutschland wird mit Drehstrom der Frequenz 50 Hz betrieben, den Generatoren in Kraftwerken erzeugen. Ein Drehstromnetz besteht aus drei separaten Phasen, in denen der Stromtransport erfolgt. Dem gegenüber produzieren Photovoltaikanlagen Gleichstrom, der erst in nachgeschalteten Wechselrichtern zu Wechselstrom konvertiert wird.

Wichtigste Größe für die Bemessung von Stromnetzen ist die Menge an elektrischer Energie, die in einer bestimmten Zeit erzeugt, übertragen und verbraucht wird. Sie wird als elektrische Leistung bezeichnet und in Watt (W) angegeben. Dieselbe Menge elektrischer Energie kann entweder mit hoher Spannung und geringer Stromstärke oder mit niedriger Spannung und hoher Stromstärke übertragen werden, denn die elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Für die Praxis ist dies von großer Bedeutung: 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 in den Kraftwerken vor der Einspeisung des Stroms in das Übertragungsnetz auf eine wesentliche höhere Spannungsebene transformiert.

Stärke und Verteilung der elektrischen und magnetischen Felder im Umfeld von Stromleitungen hängen von vielen Faktoren ab,

etwa der Spannung, der Stromstärke, der Mastform sowie der Anzahl und Anordnung der Leiterseile. Auch der Durchhang der Seile bzw. die Verlegetiefe von Erdkabeln ist von Bedeutung. Die Spannung prägt die elektrische Feldstärke, die Stromstärke die magnetische Feldstärke. Die geometrischen Verhältnisse beeinflussen beide Felder zugleich.

Sowohl bei Freileitungen als auch bei Erdkabeln hat die Anordnung der Leiter Einfluss auf Stärke und Verlauf der Felder. Bei Freileitungen ist sie durch die Mastform festgelegt (siehe Abb. 19). So ist etwa eine Leiteranordnung wie beim Einebenenmast für die Feldverteilung am Boden ungünstiger als eine vertikale Anordnung wie beim Tonnenmast.

Auch der Abstand der Leiter voneinander ist von Bedeutung. Geringe Abstände bewirken eine Kompensation der Felder. Erdkabel können kompakter verlegt werden als Freileitungen, weil sie ortsfest sind und nicht schwingen können wie eine Freileitung. Deshalb ist die Kompensationswirkung bei ihnen auch besser als bei einer Freileitung. Den Abständen zwischen den Leitern sind allerdings durch die Betriebssicherheit Grenzen gesetzt. Bei Freileitungen dürfen sich bei starkem Wind die schwingenden Leiterseile nicht berühren; bei Erdkabeln behindern eng beisammen liegende Kabel die Wärmeabfuhr und damit die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.



Abb. 18: Verlegung von 380 kV-Erdkabel auf einer Baustelle. Das Kabel wiegt ca. 40 kg pro Meter. Wegen der begrenzten Traglast der Lieferfahrzeuge sind die am Stück installierbaren Kabellängen auf ca. 500 bis 1.000 m begrenzt.

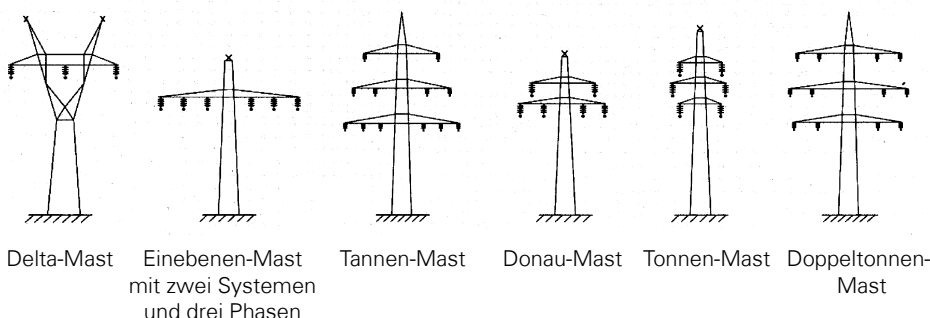


Abb. 19: Beispiele für Mastformen von Freileitungen.

Bei Freileitungen bestimmt der Bodenabstand der Leiterseile, bei Erdkabeln die Verlegetiefe maßgeblich die am Erdboden auftretenden Feldstärken. Mit zunehmender Entfernung von den Leitern fallen die Felder stark ab. Bei Freileitungen ändert sich Durchhang mit der temperaturabhängigen Ausdehnung der Leiterseile. Je mehr Strom fließt, umso wärmer und länger werden die Leiterseile. Hohe Lufttemperaturen verstärken diesen Effekt. Im Winter kann Eisbelag den Durchhang vergrößern.

Nicht immer kann die Leiteranordnung so gestaltet werden, dass sich die niedrigsten möglichen Immissionen ergeben. Es sind noch weitere Aspekte zu berücksichtigen, etwa die Betriebssicherheit. So dürfen sich bei Freileitungen die schwingenden Leiterseile verschiedener Phasen nicht berühren. Bei Erdkabeln würden zu eng beisammen liegende Leiter die Wärmeabfuhr und damit die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems mindern.

An realen Stromtrassen ändern sich die Felder ständig, denn Stromstärke, Stromrichtung und Seildurchhang sind variabel. Messungen können daher nur die momentane Situation erfassen. Die Ermittlung der Maximalwerte bei höchster betrieblicher Auslastung erfolgt mit Hilfe von Feldberechnungsprogrammen. Diese werden auch zur Optimierung von Leiteranordnungen eingesetzt.

Die Abb. 20 bis Abb. 23 zeigen beispielhaft, welche elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten in der Umgebung von Stromleitungen auftreten. Aus der Abb. 24 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 wenigen 100 V/m zu beobachten.

Die Abb. 20 bis Abb. 23 zeigen die Verteilung der magnetischen Flussdichte für Gleich- und Wechselstromsysteme sowie Freileitung und Erdverkabelung im Vergleich. Die Magnetfelder nehmen mit zunehmendem Abstand von den Leitern sehr rasch ab. Die höchsten Flussdichten treten in Bodennähe unterhalb bzw. oberhalb der Leiter auf.

In der Abb. 25 ist dargestellt, wie die Magnetfelder für die vier Varianten in 1 m Höhe quer zur Trasse verlaufen. Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Charakteristika von Freileitung und Erdkabel. Bedingt durch die kompaktere Anordnung der Erdkabel ergibt sich eine wesentlich raschere Abnahme der Felder als bei der gleich leistungsfähigen Freileitung. Dafür treten am Boden über den Kabeln erheblich höhere Flussdichten auf, was sich aus dem geringeren Abstand zwischen Leiter und Immissionsort ergibt. Je nach Verlegetiefe, Anordnung der Kabel und Stromstärke kann es hier Grenzwertüberschreitungen geben.

Elektrische Felder treten kaum durch Hindernisse wie Baumaterialien oder Bewuchs hindurch. Daher sind diese Felder bei Erdkabeln nicht relevant. Bei Freileitungen sind sie beim Aufenthalt im Freien von Bedeutung; die Außenwände eines Hauses sorgen für nahezu vollständige Abschirmung des Inneren.

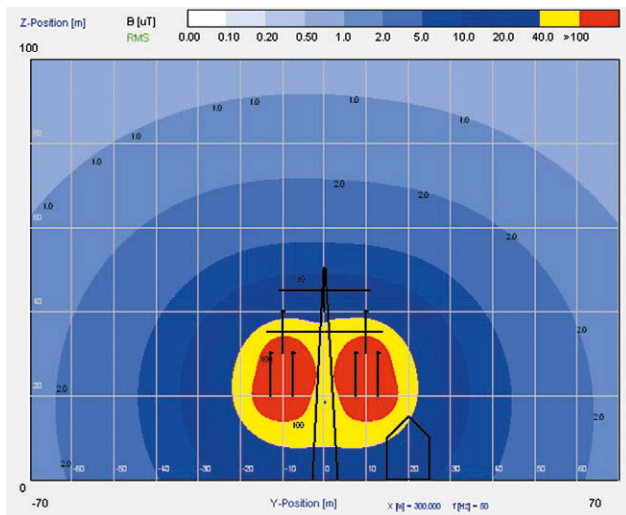


Abb. 20: Verteilung der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 380 kV-Freileitung mit zwei Stromkreisen bei einem Stromfluss von jeweils 3.200 A. Der Abstand der unteren Leiterseile zum Boden beträgt in der Spannfeldmitte 20 m. Rot: Hier ist der Grenzwert der 26. BImSchV überschritten. Gelb: Hier kann es unter Einbeziehung von Oberwellenanteilen zu Grenzwertüberschreitungen kommen.

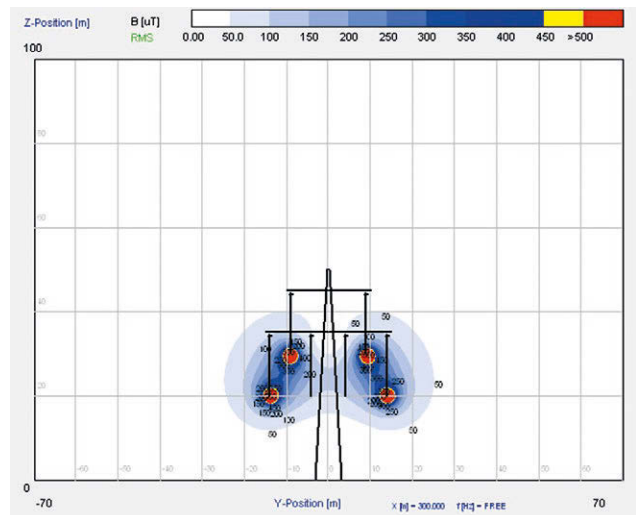


Abb. 21: Verteilung der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 500 kV HGÜ-Freileitung mit zwei Stromkreisen bei einem Stromfluss von jeweils 3.800 A. Der Abstand der unteren Leiterseile zum Boden beträgt in der Spannfeldmitte 20 m. Die Farbskala ist an den Grenzwert für magnetische Gleichfelder angepasst. Im roten Bereich ist der Grenzwert der 26. BImSchV überschritten.

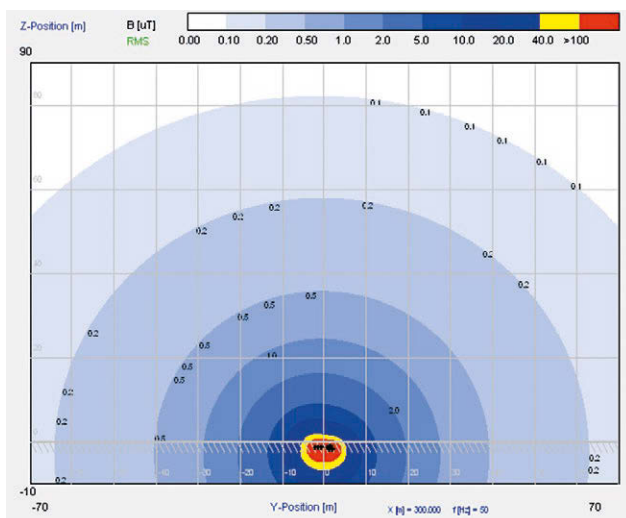


Abb. 22: Verteilung der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 380 kV-Erdverkabelung mit zwei Stromkreisen bei einem Stromfluss von jeweils 3.200 A. Die drei Phasen des linken Stromkreises wurden flach nebeneinander vergraben, die des rechten Systems in aufwändiger Dreiecksverlegung. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Kabeln beträgt jeweils 0,70 m, die Verlegetiefe 1,50 m, bezogen auf den Schwerpunkt des Stromkreises. Rot: Hier ist der Grenzwert der 26. BImSchV überschritten. Gelb: Hier kann es unter Einbeziehung von Oberwellenanteilen zu Grenzwertüberschreitungen kommen.

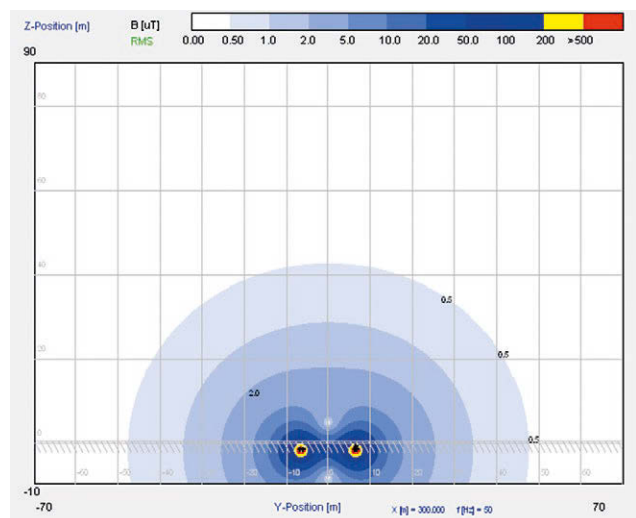


Abb. 23: Verteilung der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 500 kV HGÜ-Erdverkabelung mit zwei Stromkreisen bei einem Stromfluss von jeweils 3.800 A. Das linke System ist bipolar und besteht aus Plus- und Minuspol, das rechte enthält in Dreiecksanordnung zusätzlich darüber einen metallischen Rückleiter. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Kabeln beträgt jeweils 0,70 m, die Verlegetiefe 1,50 m, bezogen auf den Schwerpunkt des Stromkreises. Im roten Bereich ist der Grenzwert der 26. BImSchV überschritten.

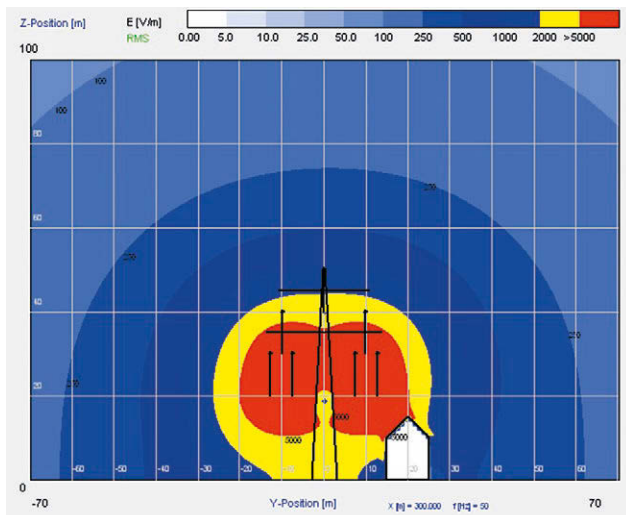


Abb. 24: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer 380 kV-Freileitung mit zwei Stromkreisen bei einer Betriebsspannung von 420 kV. Im roten Bereich ist der Grenzwert der 26. BImSchV überschritten.

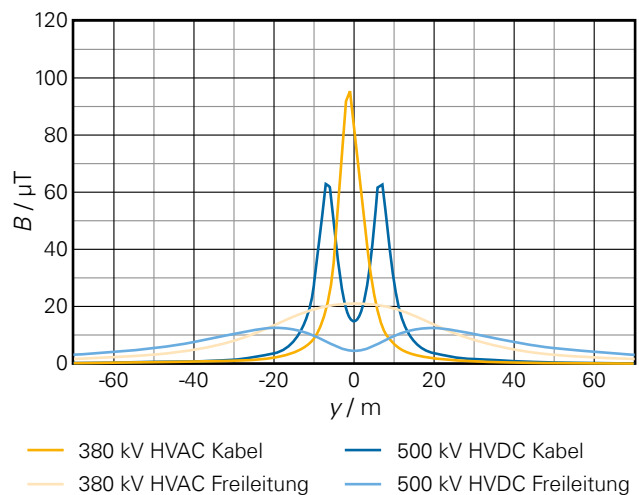


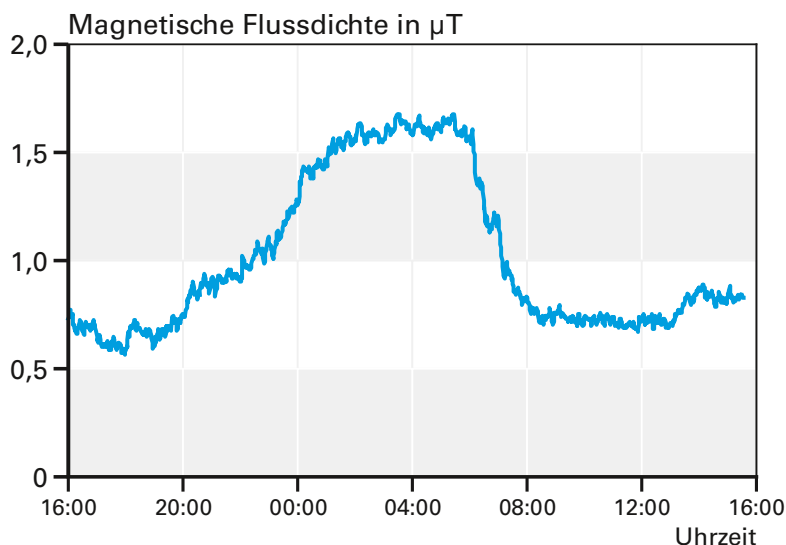
Abb. 25: Vergleich der magnetischen Flussdichten der vier Leitungsvarianten in einer Höhe von 1 m über dem Boden (Trassenquerschnitt).

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

Im Gegensatz dazu durchdringen Magnetfelder die meisten Materialien ohne nennenswerte Abschirmung. Eine günstige Anordnung der Leiterseile und eine Phasenoptimierung können zur Feldminimierung beitragen. Dabei nutzt man den Umstand, dass der Strom in den Leitern zeitlich versetzt fließt (Dreiphasen-Wechselstrom). Durch den Mix von Energien aus konventionellen und schwankenden regenerativen Quellen kommt es allerdings

ständig zu Änderungen des Lastflusses bis hin zur Umkehrung der Lastflussrichtung. Da sich eine Phasenoptimierung immer auf eine bestimmte Stromkonstellation bezieht, können bei anderen Konstellationen auch höhere Felder auftreten als ohne Phasenoptimierung.

Abb. 26: Zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte an einer 380 kV-Freileitung in 50 m Abstand und 3 m Höhe.



Im Verlauf eines Tages ändert sich die magnetische Flussdichte einer Freileitung mit dem Strombedarf. Zu Spitzenverbrauchszeiten kann die Flussdichte dreimal höher sein als in Zeiten geringen Strombedarfs. Die Abb. 26 zeigt beispielhaft die gemessene Flussdichte einer 380 kV-Freileitung (Mastform Donau) über einen Zeitraum von 24 Stunden. Der Messort befand sich 50 m neben der Freileitung in der Mitte zwischen zwei Masten, also am Ort des größten Seildurchhangs. Die Messhöhe betrug 3 m. Die hohen Werte nachts sind auf großräumige Stromverteilungen durch die Energieversorger zurückzuführen.

Auch in Netzstationen, deren Transformatoren die Mittel- mit der Niederspannungsebene verbinden, entstehen elektrische und magnetische Felder. Im Inneren der Netzstation ist die Feldstärke hoch. Durch die Einhausung wird das elektrische Feld nach außen fast vollständig abgeschirmt und ist selbst im Nahbereich der Station vernachlässigbar klein. Nennenswerte Magnetfelder treten außen nur in unmittelbarer Nähe der Niederspannungsableitung auf.



Abb. 27: Gasisolierte Rohrleitung: Querschnitt durch ein GIL-Rohr der zweiten Generation. Der Strom führende Leiter befindet sich in der Mitte, außen das Mantelrohr mit einem Stützpaaar.

3.1.3 SONDERSYSTEME

Für spezielle Anwendungen gibt es innovative Stromübertragungssysteme, die besonders platzsparend oder energieeffizient sind. Wegen des technischen und finanziellen Aufwands kommen sie jedoch derzeit nicht flächendeckend zum Einsatz.

Gasisolierte Rohrleiter (GIL) können elektrische Energie auf kleinstem Raum mit hohen Spannungen und hohen Strömen übertragen. Sie bestehen aus zwei konzentrisch angeordneten Aluminiumrohren (siehe Abb. 27). Am Innenleiter liegt Hochspannung an, das Mantelrohr ist geerdet. Stützisolatoren fixieren in regelmäßigen Abständen den Innenleiter im äußeren Rohr. Zur Vermeidung elektrischer Überschlüge ist das gesamte System mit einem Isoliergas gefüllt. GIL sind sowohl für Tunnelverlegung als auch für direkte Erdverlegung geeignet. Ein großer Vorteil ist die Brandsicherheit, daher ist das System für Innenrauminstallationen oder Schaltanlagen prädestiniert. Die Installationskosten sind sehr hoch, so dass GIL-Projekte im Freien sich bislang auf Strecken von einigen hundert Metern beschränken. Die größte Installation in Europa befindet sich am Flughafen Frankfurt. Sie ersetzt dort einen ca. 900 m langen Abschnitt einer 380 kV-Freileitung, um Platz für eine dritte Landebahn zu schaffen.

Supraleiter sind Materialien, die elektrischen Strom verlustfrei transportieren können, weil sie ihm keinen elektrischen Widerstand entgegensetzen. Die technische Nutzung ist eingeschränkt: Supraleitende Metalle erreichen erst bei Temperaturen von unter 40 Kelvin bzw. -233 °C ihre besondere Eigenschaft. Hierzu bedarf es einer aufwändigen Kühlung mit flüssigem Helium. Bei Materialien wie keramischen Hochtemperatur-Supraleitern genügt die Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei 77 Kelvin bzw. -196 °C . Nachteilig ist ihre Sprödigkeit, was die Verarbeitung erschwert. Inzwischen gelingt die Verarbeitung der Keramik, indem man sie in Röhren aus Silber füllt und zu flexiblen Bändern auswalzt. Ein derartiges Kabel verbindet seit dem Jahr 2014 zwei Umspannanlagen im Essener Stadtzentrum (Abb. 28). Es ist einen Kilometer lang und ersetzt eine 110 kV-Leitung, wird aber nur mit 10 kV-Dreiphasenwechselstrom bei 2.310 A Dauerstrom betrieben. Alle drei Phasen des Wechselstroms verlaufen in einem einzigen Kabel von ähnlicher Dicke wie ein herkömmliches Kupferkabel. Derzeit ist es das längste supraleitende Kabel der Welt und gilt als Vorbild für die Weiterentwicklung der urbanen Stromnetze. Weil Supraleiter wesentlich höhere Ströme verkraften, kann innerstädtisch auf den

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

Einsatz der Hochspannungsebene verzichtet und das Netz durchgehend auf Mittelspannung ausgelegt werden. Die Mehrkosten werden kompensiert, weil weniger Umspannstationen erforderlich sind und eine kompaktere Verlegung möglich wird.

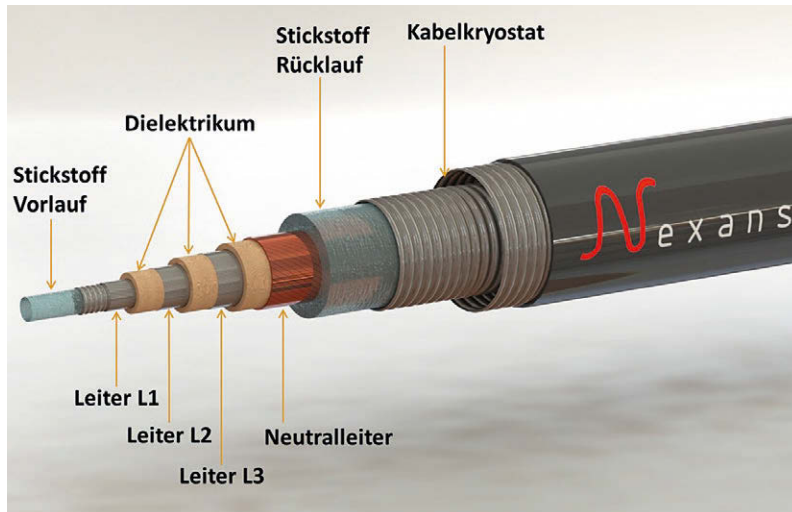


Abb. 28: Supraleitendes Kabel für das Projekt AmpaCity in Essen. Das mehrschichtig aufgebaute Kabel besteht im Kern und in der äußeren Schicht aus Röhren für den Vor- und Rücklauf des flüssigen Stickstoffs. Dieser sorgt für die Kühlung der dazwischen in drei konzentrischen Röhren angeordneten Supraleiter.

strom auf 15 kV heruntertransformiert. Vom Unterwerk gelangt der Strom in die Oberleitungsanlagen und über den Stromabnehmer zum Zug. Als Rückleitung dienen unter anderem die Schienen (siehe Abb. 30). Das elektrifizierte Streckennetz umfasst knapp 20.000 km (DB Energie GmbH, Stand 2015).

Je nach Leistungsbedarf und abhängig von der Streckenführung kann die Belegung der Fahrleitungsmaste auch komplexer sein (Abb. 29). Im Netz der DB ist die dauerhafte Stromentnahme eines Zuges auf 560 A limitiert. Auf modernen Schnellfahrstrecken werden jedoch für die ICE 3 in Doppeltraktion bei der Anfahrt deutlich höhere Ströme von bis zu 1.450 A benötigt. Es bedarf deshalb zusätzlicher Maßnahmen. Auf zweigleisigen Strecken werden die Oberleitungen quer geschaltet, sodass sich die Strombelastung bei Anfahrt eines Zugs gleichmäßig auf zwei Speiseabschnitte aufteilt. Für noch höhere Ströme werden zusätzlich Verstärkungsleitungen benötigt, die an der Strecke parallel mitgeführt werden. Zusätzliche Speiseleitungen werden bei Bedarf zur Versorgung abzweigender Streckenabschnitte mitgeführt.

Die Schienen sind geerdet, so dass dort keine gefährliche Spannung anliegen kann. Ein Teil des Rückstroms fließt nicht über die Bahnschienen, sondern das Erdreich oder dort verlegte Metallrohre ab. Durch Anbringung eines Rückleiterseils mit Erdpotenzial entlang der Masten wird ein Teil des durch die Erde abfließenden Stroms ausgekoppelt und stattdessen durch das Rückleiterseil geführt. Diese Maßnahme ist z. B. bei felsigem Untergrund erforderlich, um die Potenzialdifferenz zwischen Fahrschienen und Erdreich zu mindern. Die Abb. 30 zeigt den

3.2 BAHNSTROM

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

Das Stromsystem der DB ist vom Kraftwerk über das Hochspannungs-Verteilnetz bis zu den Umspannstationen exklusiv für diese Frequenz konzipiert. Das bahneigene 110 kV-Hochspannungsnetz ist rund 7.900 km lang (DB Energie GmbH, Stand 2015) und verbindet Kraftwerke mit Unterwerken. In diesen wird der 110 kV-Bahn-

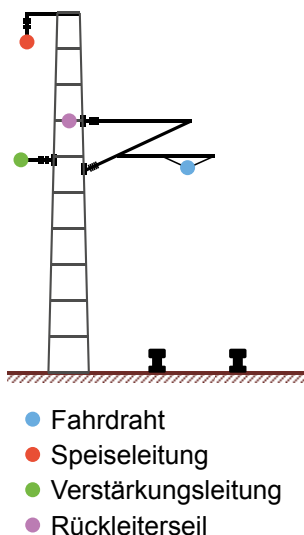


Abb. 29: Mögliche Konfiguration auf einem Fahrleitungsmast der DB.

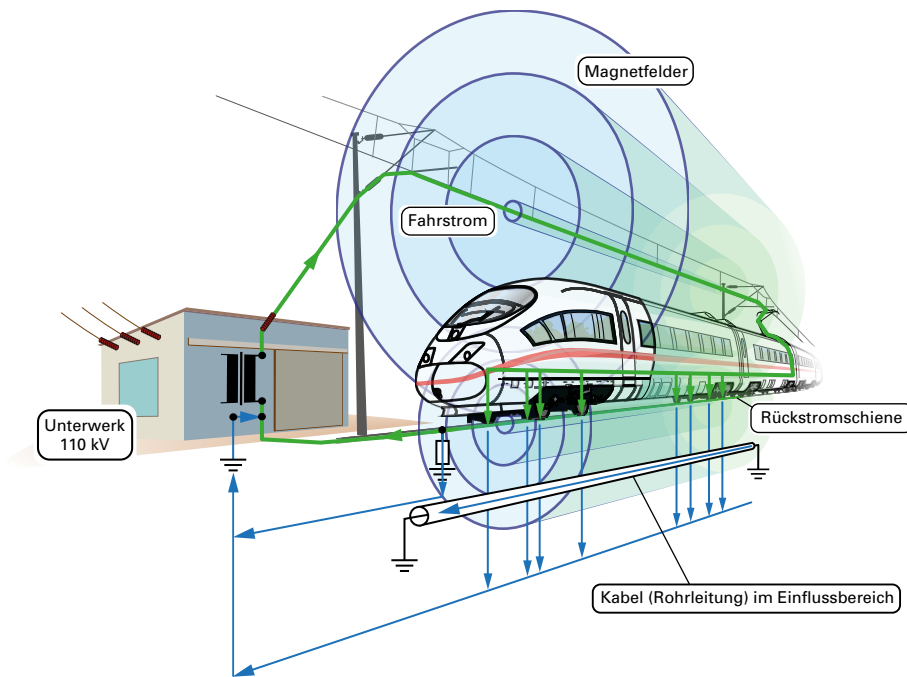


Abb. 30: Stromkreise des Bahnstroms. Schematisch dargestellt ist die räumliche Verteilung des Magnetfelds rings um den Fahrdrabt und die Schiene. In nahe gelegenen Kabeln oder Rohren können Ströme induziert werden. Sichere Erdung verhindert unerwünschte Effekte.

15 kV-Stromkreis des Bahnstroms und veranschaulicht Lage und Form der entstehenden Magnetfelder.

Der Fahrdrabt und weitere mitgeführte Leitungen erzeugen auch ein elektrisches Wechselfeld. Die Abb. 31 und Abb. 32 zeigen beispielhaft gemessene Feldstärken im Bahnhofsbereich zwischen zwei Gleisen und an einem Bahnübergang [5]. Die Metallhülle des Zuges schirmt die Fahrgäste vom elektrischen Feld der Oberleitung weitgehend ab.

Die Stärke der Magnetfelder von Bahnstromanlagen unterliegt erheblichen tageszeitlichen Schwankungen. Wenn in einem Versorgungsabschnitt kein Zug fährt, fließt auch kein Strom und es gibt kein magnetisches Feld. Je mehr Züge auf einem Streckenabschnitt gleichzeitig fahren, umso größer sind Stromfluss und Stärke des Magnetfeldes. Bei Beschleunigungsvorgängen wird besonders viel Strom benötigt. Nachts, wenn der Personenverkehr abnimmt, gehen auch die Magnetfelder zurück.

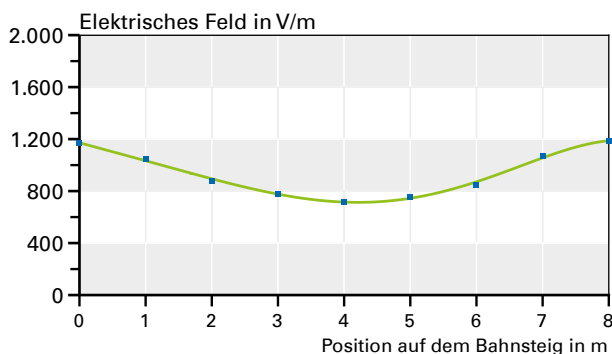


Abb. 31: Verlauf der elektrischen Feldstärke in 1 m Höhe zwischen zwei Gleisen an einem 8 m breiten Bahnsteig. Man erkennt, dass das Feld zu den Gleisen bzw. Oberleitungen hin stärker wird und in der Bahnsteigmitte am schwächsten ist.

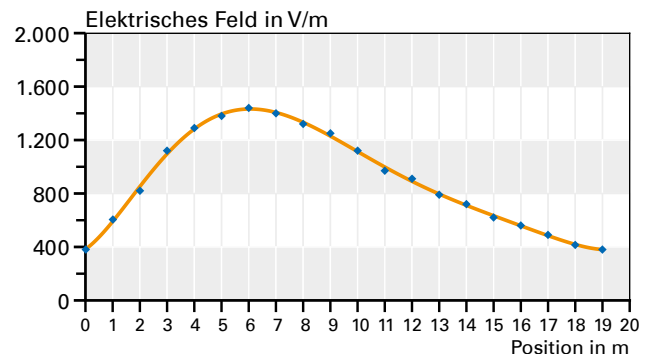


Abb. 32: Verlauf der elektrischen Feldstärke an einem Bahnübergang, quer zur Bahnstrecke. Die Fahrstromleitungen liegen bei etwa 4 m und 7 m.

Die magnetischen Felder des Hin- und Rückleiters an einer Bahnstrecke kompensieren sich nur wenig, da ihr Abstand anders als bei Freileitungen relativ groß ist. Dadurch nimmt die magnetische Flussdichte mit dem Abstand langsamer ab. Vagabundierende Ströme, die über das Erdreich abfließen, vermindern zusätzlich die Kompensation des magnetischen Feldes.

Messungen können nur momentane Magnetfelder erfassen, da sich der Stromfluss in Bahnstromanlagen ständig ändert. Zur Ermittlung der maximalen magnetischen Flussdichten werden Feldberechnungsprogramme eingesetzt. Damit lassen sich auch Optimierungen vornehmen. Messungen und Berechnungen ergaben, dass in unmittelbarer Nähe einer Bahntrasse kurzzeitig Maximalwerte von $100\ \mu\text{T}$ auftreten können. Mittelwerte über 24-Stunden liegen zwischen 1 und $10\ \mu\text{T}$ [6]. In Bayern wurden personenbezogene Messungen bei 190 Menschen vorgenommen, die direkt an Bahntrassen wohnen. Der Mittelwert dieser Messungen lag bei $0,16\ \mu\text{T}$ (Median $0,10\ \mu\text{T}$) [7]. Der Verlauf der magnetischen Flussdichte quer zu einer zweigleisigen Bahntrasse ist in der Abb. 33 dargestellt. Der Maximalwert der magnetischen Flussdichte liegt über den Schienen. Zur Seite hin nimmt das Feld stark ab.

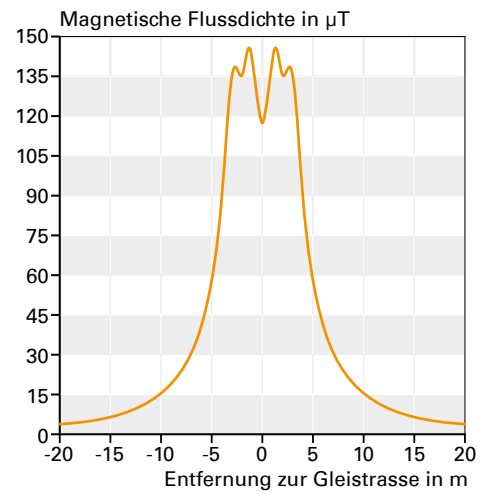
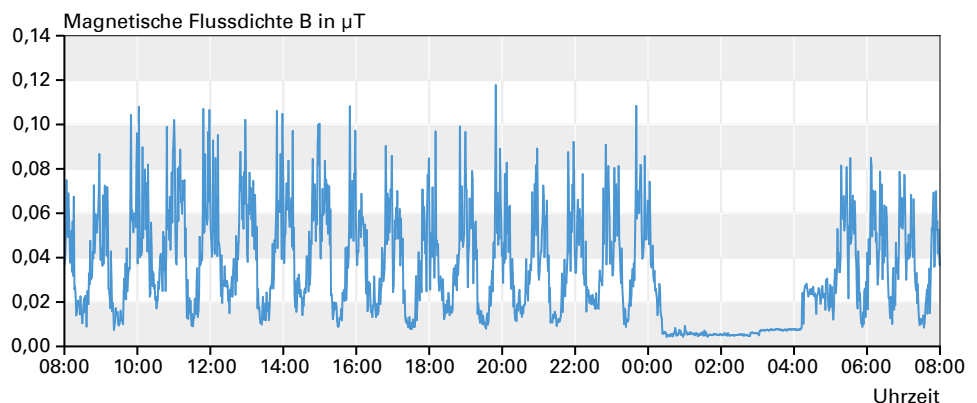


Abb. 33: Verlauf der magnetischen Flussdichte quer zur Trasse einer zweigleisigen Fernbahnstrecke in 1 m Höhe über den Schienen. Die Position Null markiert die Mitte zwischen den beiden Gleisen.

Zur Ermittlung des tageszeitlichen Verlaufs hat das Bayerische LfU Magnetfeldmessungen an der Ammergaubahn durchgeführt (Abb. 34). Der Messpunkt war rund 80 m vom Gleis entfernt. Messungen der LUBW in rund 30 m Abstand von der stark befahrenen Rheintalbahn ergaben Minuten-Mittelwerte der magnetischen Flussdichte um $0,2\ \mu\text{T}$. Kurzzeitige Spitzen können das Zehnfache dieser Werte betragen.

Abb. 34: Tagesgang der magnetischen Flussdichte an der Ammergaubahn in Murnau am Staffelsee in ca. 80 m Entfernung von der Bahnstrecke. Gut zu erkennen sind der Stundentakt und die nächtliche Pause des Bahnverkehrs auf dieser eingleisigen Strecke.



3.3 STATISCHE FELDER

Elektrische Gleichfelder treten bei vielen Elektrogeräten und Maschinen auf, meist sind sie sehr schwach. Im öffentlichen Nahverkehr werden Straßenbahnen, U-Bahnen und Stadtbahnen meist mit 750 V Gleichspannung betrieben. Zwischen Oberleitung und 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 die Fernbahnen mit dem 16,7 Hz-Wechselstrom der DB. Aufgrund der niedrigen elektrischen Spannung des Fahrdrachts 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 Gefährdung geht von elektrischen Gleichfeldern in der Regel nicht aus. Starke elektrische Gleichfelder setzen jedoch eine hohe Potentialdifferenz (Hochspannung) voraus.

Magnetische Gleichfelder werden in vielen technischen Anwendungen genutzt. Erzeugt werden sie mit **Dauermagneten** oder Elektromagneten. Dauermagnete werden aus unterschiedlichsten Stoffen gefertigt. Industriell bedeutend sind die vier Materialgruppen Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo), Hartferrite (Eisenoxid mit Zusätzen), Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und Samarium-Kobalt (SmCo). Sie werden u. a. in Elektromotoren, Generatoren, Lautsprechern oder Kopfhörern eingesetzt. Die höchsten magnetischen Flussdichten mit bis zu 1,6 T lassen sich mit NdFeB erreichen. Ein würfelförmiger Magnet mit 5 cm Seitenlänge hält das Gewicht eines Menschen. Selbst kleine Bauformen erreichen z. B. als Kühlschrankmagnet Haltekraften von ca. 100 N (entspricht 10 kg).

Bei **Elektromagneten** kann das Magnetfeld im Gegensatz zu Dauermagneten ein- und ausgeschaltet werden. Sie bestehen meist aus einem Eisenkern, um den eine elektrische Spule gewickelt ist. Das magnetische Feld der Spule hängt von ihrer Bauform, dem Spulenstrom und der Wicklungszahl ab. Anwendung finden Elektromagnete u. a. in Türverriegelungssystemen, Hubmagneten oder bei der Abfalltrennung. 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 des Elektromagneten. Sie müssen mit flüssigem Helium auf beinahe den absoluten Nullpunkt gekühlt werden. Dann lassen sich extrem starke magnetische Gleichfelder mit über 20 T im Dauerbetrieb erzeugen. Solche Felder sind für wissenschaftliche oder medizinische Untersuchungen wie z. B. im Kernspintomographen notwendig. Hier wird ausgenutzt, dass sich Atomkerne aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften 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 ist das Hunderttausendfache des Erdmagnetfeldes. Patienten werden nur sehr langsam in den Magneten gefahren, weil die im Gehirn entstehenden Wirbelströme ansonsten Schwindel und Übelkeit hervorrufen könnten.

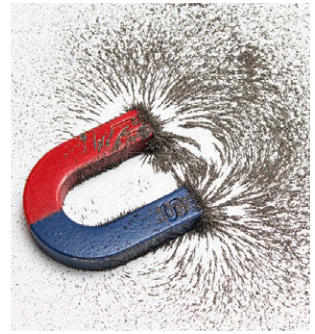


Abb. 35: Dauermagnet.

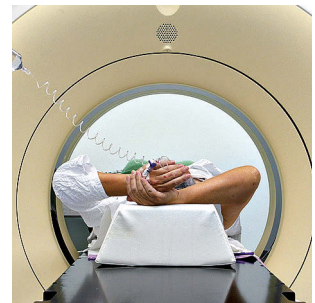


Abb. 36: Kernspintomographie.



Abb. 37: Lautsprecher.

Tab. 2: Typische Werte der magnetischen Flussdichte in mT von magnetischen Gleichfeldern.
Quelle: BfS [8]

Quellen	Magnetische Flussdichte in mT
Erdmagnetfeld in Deutschland	ca. 0,05
HVDC-Stromtrasse (ca. 20 m Abstand zum ruhenden äußeren Leiter)	< 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

Eine Gefährdung geht von magnetischen Gleichfeldern in der Regel nicht aus. Träger von metallischen Implantaten wie Herzschrittmachern, Insulinpumpen oder Innenohr-Implantaten sollten jedoch starke magnetische Gleichfelder meiden. Metallische Fremdkörper wie z. B. Eisensplitter im Auge oder Gehirn können im starken Magnetfeld eines Kernspintomographen sogar lebensgefährlich sein.

3.4 FELDER IM HAUSHALT

Die in Wohnungen auftretenden Felder gehen zum größten Teil auf Elektrogeräte und elektrische Hausinstallationen zurück. Es handelt sich dabei um elektrische und magnetische 50 Hz-Wechselfelder.

Der dreiphasige Wechselstrom (Drehstrom) aus dem Niederspannungsnetz endet normalerweise beim Hausanschluss. Innerhalb des Hauses wird für die Versorgung von Kleinverbrauchern wie Lampen oder Hausgeräten nur eine der drei Phasen an die Steckdosen geführt. Größere Verbraucher wie Kochherde oder elektrische Heizungen werden dagegen mit allen drei Phasen des Drehstroms versorgt.

Die elektrischen Hausinstallationen bestehen aus Kabeln oder Drähten in Rohrinstallationen, bei denen die Hin- und Rückleiter dicht nebeneinander geführt werden. Die entgegengesetzt gerichteten Felder der beiden Leiter überlagern sich und kompensieren sich weitgehend. Die elektrische und magnetische Feldstärke in der Umgebung solcher Stromleitungen nimmt daher mit der Entfernung viel stärker ab als bei Einzelleitern.

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, Föhn).

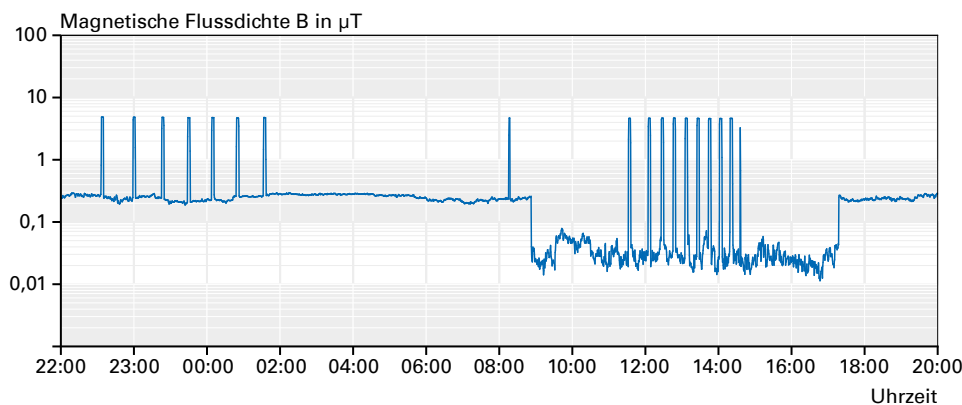


Abb. 38: Zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte in μT an einem 5 kW-Nachtspeicherofen in 50 cm Entfernung.

Die Felder nehmen 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. Die Emissionen der Geräte können je nach Hersteller erheblich schwanken. Die Abb. 38 zeigt die magnetische Flussdichte an einem Nachtspeicherofen im Zeitverlauf von 24 Stunden. Angaben zu Mikrowellengeräten finden sich im Abschnitt 4.9.2.

Bei einer Untersuchung von fast 2.000 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 [7]. Dabei wurde ein 24 Stunden-Mittelwert für alle un-

tersuchten Personen von $0,10 \mu\text{T}$ (Median $0,05 \mu\text{T}$) festgestellt. Die Messungen wurden mit körpergetragenen Personendosimetern durchgeführt (Tab. 3).

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 etwa $0,15 \mu\text{T}$ 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 – ihre mittlere Exposition lag bei $0,11 \mu\text{T}$.

Tab. 3: Magnetfeldexposition in Bayern (24 Stunden-Mittelwerte)

Situation	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

Tab. 4: 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
Haarföhn	80
Staubsauger	50
Toaster	80
Glühbirne	< 80
Steckdose	< 1
Netzkabel der Hausinstallation	< 0,1

In der Tab. 4 sind typische Werte für elektrische Feldstärken von Haushaltsgeräten und Hausinstallationen aufgeführt. Die Messergebnisse hängen stark von den örtlichen Verhältnissen und vom jeweiligen Gerätetyp ab. Gerade bei einem kontinuierlichen Betrieb sollte auf genügenden Abstand zu Daueraufenthaltsorten geachtet werden.

Energiesparlampen und LED-Leuchtmittel sind die Nachfolger herkömmlicher Glühlampen. Sie zeichnen sich durch geringere Energieaufnahme und längere Le-

bensdauer aus. LED-Lampen mit einem Lichtstrom von 1.200 Lumen entsprechen einer Glühlampe von 80-100 W, verbrauchen aber nur etwa 20 W. Ältere Energiesparlampen, die sog. Kompaktleuchtstofflampen, benötigen je nach Qualität und Technik manchmal eine Aufwärmphase von einigen Minuten, ehe sie volle Leuchtkraft erreichen. LED-Lampen verhalten sich dagegen wie Glühlampen und erstrahlen mit dem Einschalten in voller Helligkeit. Beide Techniken gibt es in verschiedenen Farbtemperaturen von kaltweiß (5.300 K und darüber) bis warmweiß (3.300 K und darunter).

Abb. 39: LED-Leuchtmittel sind stromsparende Alternativen für den Haushalt.



Von Lampen gehen Felder mit 50 Hz-Netzfrequenz aus. Bei LED und Kompaktleuchtstofflampen treten zusätzlich Immis-sionen bei bis zu einigen 10 kHz auf, die sich durch Oberwellenanteile bis in den Hochfrequenzbereich erstrecken können. Bei üblichen Abständen zur Lampe werden die ICNIRP-Referenzwerte problemlos eingehalten. Zu LED-Lampen wurden bislang erst wenige Messungen veröffentlicht. Danach sind die von ihnen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder sehr gering [9].

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. Die zum Kochen benötigte Wärmeenergie wird bei ihnen durch Magnetfelder zwischen 20 und 100 kHz erzeugt. Diese Magnetfelder dringen in den Metallboden von Töpfen und Pfannen ein und verursachen dort elektrische Wirbelströme, die den Behälter und seinen Inhalt erwärmen. Ein Teil der Magnetfelder dringt nach außen. In direkter Umgebung des Induktionskochherdes sind die Felder recht hoch.

Untersuchungen des schweizerischen Bundesamtes für Gesundheit (BAG) [10] zeigen zwar, dass der deutsche Grenzwert von $27 \mu\text{T}$ beim Betrieb einer Kochzone mit genügend großer und zentriert platzierter Pfanne in 30 cm Abstand von allen untersuchten Geräten eingehalten wird. An der Herdkante können aber auch Felder bis zu $56 \mu\text{T}$ vorkommen. Aus Vorsorgegründen sollte daher der Aufenthalt von Schwangeren und Kindern sowie von Personen mit Piercings im Körperrumpf 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 elektronischer Implantate sollten Induktionskochherden nicht zu nahe kommen. Es gibt Hinweise, dass ihre magnetischen Streufelder auf kurze Distanz solche Implantate beeinflussen können. Im Fall unipolarer Herzschrittmacher liegen konkrete Hinweise auf Gefährdung vor. Dabei sind auch die Ableitströme zu berücksichtigen. Personen mit unipolaren Herzschrittmachern wird geraten, Pfannen nicht längere Zeit zu berühren und keine metallischen Kochlöffel zu verwenden. Träger elektronischer Implantate sollten die Sicherheitshinweise der Hersteller beachten und mit dem behandelnden Arzt oder der Ärztin die Nutzung besprechen. Bei korrektem Verhalten ist die Wahrscheinlichkeit einer Störung des Implantats sehr klein [10].

Magnetfelder können durch sachgemäße Verwendung des Induktionskochherds verringert werden. Sicherheitshinweise beachten!



Abb. 40: Induktionsherd.

Tipps!

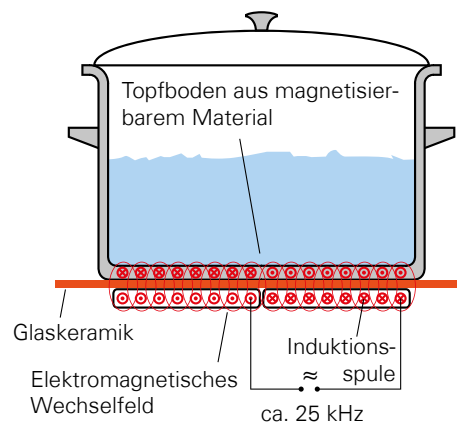


Abb. 41: Funktionsweise eines Induktionsherdes (schematisch).

Tipps!

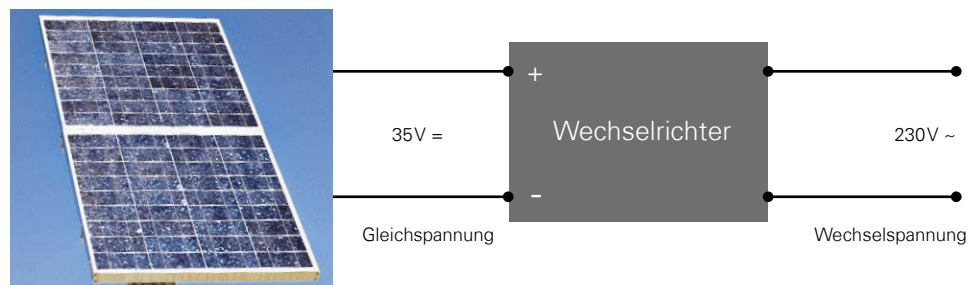
Photovoltaikanlagen nutzen die Lichtenergie der Sonne zur Stromproduktion. Für das Entstehen elektrischer und magnetischer Felder sind drei Komponenten verantwortlich:

- Die Solarmodule selbst produzieren Gleichstrom. Die dabei auftretenden Gleichfelder sind unproblematisch. Das elektrische Feld ist in wenigen Zentimetern kaum noch nachweisbar, das magnetische Feld entspricht im Abstand von 30 bis 50 cm dem des Erdmagnetfeldes.
- Wechselrichter wandeln die erzeugte Gleichspannung in 50 Hz-Wechselspannung um (Abb. 42). Dabei entstehen 50 Hz-Wechselfelder, aber auch elektromagnetisch bedingte höherfrequente Anteile im kHz-Bereich. Art und Intensität dieser Felder hängen stark von den verwendeten Bauteilen und der Anlagenkonstruktion ab.

- Die Installationen zwischen Wechselrichter und Verknüpfungspunkt zur öffentlichen Energieversorgung arbeiten mit 50 Hz-Wechselstrom. Von ihnen gehen wie von jeder anderen Elektroinstallation elektrische und magnetische 50 Hz-Wechselfelder samt Oberwellenanteilen aus.

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 auf Möglichkeiten zur Feldminimierung anzusprechen.

Abb. 42: Prinzip einer Photovoltaikanlage.



4 Hochfrequente Felder

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

4.1 GRUNDLAGEN UND MESSGRÖSSEN

Während niederfrequente Wechselfelder meist als unerwünschte Nebeneffekte bei der Übertragung und Nutzung elektrischer Energie auftreten, 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 miteinander gekoppelt. Man spricht dann von elektromagnetischen Wellen. Diese breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, das sind in der Luft rund 300.000 km/s. Wenn der Abstand von der Quelle groß im Vergleich zur Wellenlänge ist, spricht man vom Fernfeld. Beim Mobilfunk herrschen bereits in 1 m Abstand von der Sendeantenne Fernfeldbedingungen.

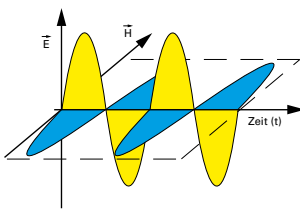


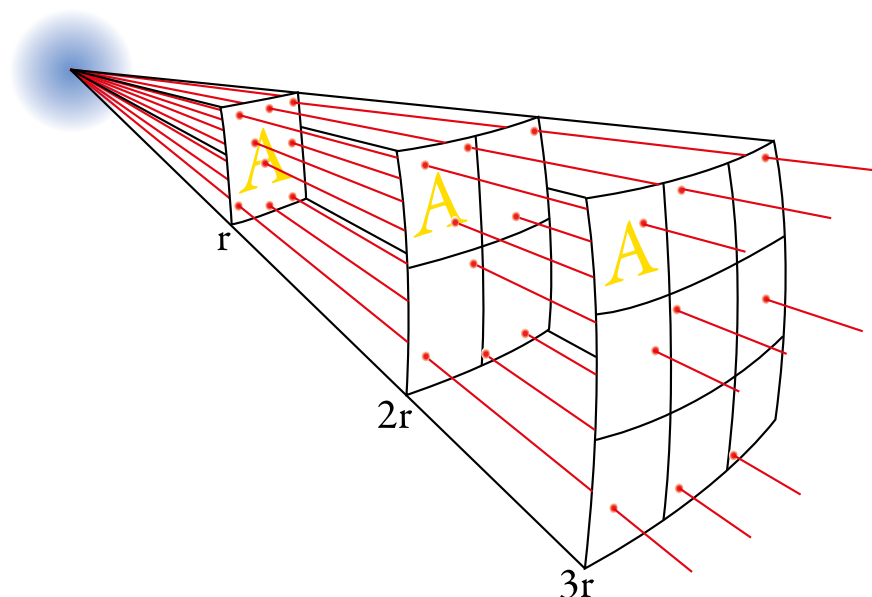
Abb. 43: Elektromagnetische Wellen im Fernfeld.

Elektromagnetische Wellen transportieren Energie. Das Maß für die Stärke einer elektromagnetischen Welle ist die Leistungsdichte S . Sie gibt die durch eine Fläche A fließende Leistung an, die ein elektromagnetisches Wellenfeld transportiert (siehe Abb. 44). Die Leistungsdichte wird in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) angegeben und ist das Produkt aus der elektrischen Feldstärke E und der magnetischen Feldstärke H .

Im Fernfeld einer Quelle, etwa einer Antenne, stehen die Leistungsdichte und die beiden Feldstärken in einem festen Verhältnis zueinander. Dort reicht es aus, eine der drei Größen E , H und S zu kennen; die beiden anderen können daraus abgeleitet werden.

Die Leistungsdichte nimmt quadratisch mit der Entfernung ab. Dies wird in der Abb. 44 veranschaulicht. Gezeigt ist, wie sich die Strahlung der Quelle räumlich ausbreitet. Die Mobilfunkantenne kann man sich wie

Abb. 44: Die Leistungsdichte nimmt mit dem Abstand quadratisch ab (schematische Darstellung).



eine Lampe vorstellen. Jeder rote Strahl symbolisiert eine bestimmte Leistung, z. B. 1 W. Die Anzahl der durch eine Fläche A hindurchtretenden Strahlen ist ein Maß für die Leistungsdichte. Im Abstand r ist sie neunmal so hoch wie im dreifachen Abstand (9 Strahlen statt 1 Strahl). Die Gesamtzahl aller Strahlen stellt die Gesamtleistung der Quelle dar. Die Abb. 46 zeigt den Zusammenhang zwischen Abstand und Feldstärke auch quantitativ. Unter realen Ausbreitungsverhältnissen spielen zusätzlich Topographie, Bewuchs, Bebauung und Witterungsbedingungen eine Rolle. Dadurch ergibt sich meist eine zusätzliche Dämpfung.

Die Leistung einer Sendeantenne wird nicht gleichmäßig in alle Richtungen (isotrop) abgegeben, sondern gebündelt abgestrahlt. Das funktioniert wie bei einem Scheinwerfer, der das Licht in eine Hauptstrahlrichtung konzentriert. (Abb. 45). Ein isotroper Mobilfunksender würde die Hälfte der Sendeleistung in den Himmel abstrahlen und den größten Teil der anderen Hälfte auf den Boden in unmittelbarer Umgebung des Senders. Um die Sendeleistung effizient zu nutzen, werden Sende-

antennen so gebaut, dass sie die Wellen 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 m bis 250 m Entfernung vom Sender den Boden trifft. In Hauptstrahlrichtung emittiert eine Mobilfunkantenne etwa 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 Leistungsdichte zu erreichen wie mit einer bündelnden Antenne (Richtantenne) in Hauptstrahlrichtung. Durch die Verwendung von Richtantennen lässt sich der Energieverbrauch deutlich senken.



Abb. 45: Abblendlicht beim Auto.

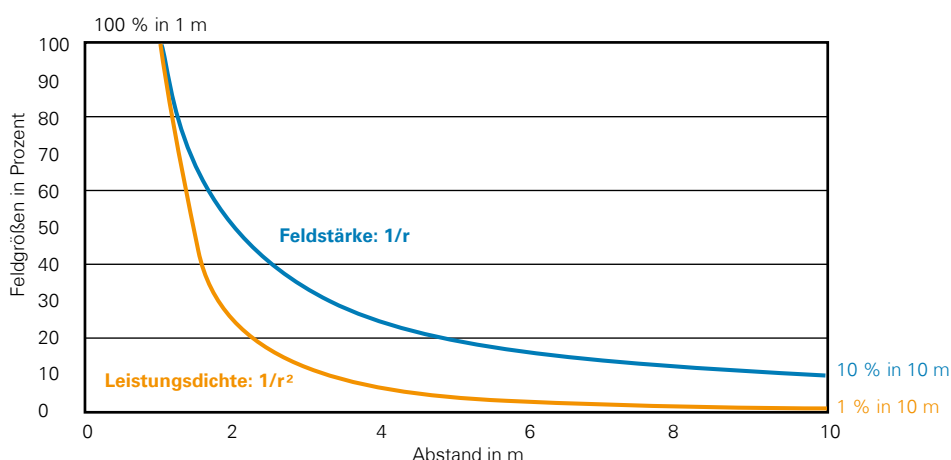
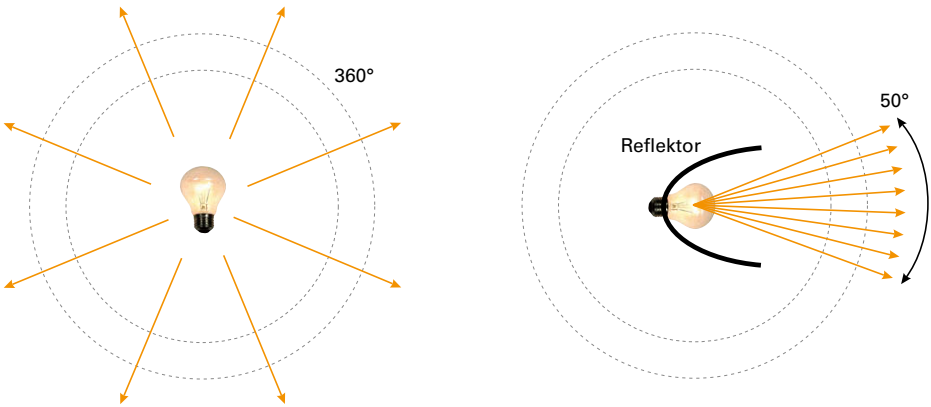


Abb. 46: Abnahme der Feldstärke und Leistungsdichte mit der Entfernung von der Quelle. Die Leistungsdichte nimmt bei zunehmendem Abstand von der Quelle umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ab ($1/r^2$ -Gesetz), die elektrische und die magnetische Feldstärke hingegen nur mit dem Abstand ($1/r$ -Gesetz). Das bedeutet: Bei Verzehnfachung des Abstandes reduziert sich die Leistungsdichte auf ein Hundertstel des Ausgangswertes, die Feldstärke lediglich auf ein Zehntel.

Abb. 47: Dargestellt am Beispiel einer Glühbirne, links gleichmäßige (isotrope) Abstrahlung, rechts gebündelte Abstrahlung (Scheinwerfer).



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

Alternativ kann die Strahlungsleistung auf eine Dipol-Antenne bezogen werden. Man spricht dann vom ERP-Wert (Equivalent Radiated Power), der um den Faktor 1,64 kleiner ist als der EIRP-Wert.

4.2 ZULASSUNG UND ÜBERWACHUNG
VON FUNKSENDEANLAGEN

In Deutschland müssen die Betreiber ortsfester Funkseideanlagen mit einer Strahlungsleistung von 10 W (EIRP) oder mehr vor der Inbetriebnahme bei der Bundesnetzagentur (BNetzA) eine Standortbe-

scheinigung beantragen. Darin sind Leistungsbeschränkungen und Abstrahlwinkel mit den sich daraus ergebenden Sicherheitsabständen zu allgemein zugänglichen Bereichen verbindlich festgelegt. Dabei werden auch die am Standort bereits vorhandenen elektromagnetischen Felder von anderen Funkseideanlagen berücksichtigt. Außerhalb der Sicherheitsabstände sind die Grenzwerte der 26. BImSchV (siehe Kapitel 6) bei vollem Betrieb aller installierten Sendeantennen eingehalten.

Tab. 5: Funkseideanlagen mit Frequenzbereich und Strahlungsleistung. Die Tabelle gibt einen Überblick für ausgewählte Funkseideanlagen.

Anlage	Frequenz (MHz)	Sendeausgangsleistung (Watt)
Rundfunksender (Ultrakurzwellen)	87,5 bis 108	10.000
BOS-Digitalfunk (TETRA) (z. B. Polizei, Feuerwehr)	380 bis 400	20 (je Kanal)
Betriebsfunk	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 35 und 470	< 12
Digital Radio (DAB+)	174 bis 230	1.000
Digitales Fernsehen (DVB-T)	470 bis 700	10.000
Mobilfunk-Basisstation	700 bis 2.700	10 bis 50 (je Kanal)
Richtfunk	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 6.000 und 38.000	0,01 bis 1
Radar (Flugsicherung und Wetterbeobachtung)	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 1.000 und 25.000	bis 2.000.000 (Impulsleistung)
Fernsehsatellit	10.700 bis 12.750	150
Amateurfunkdienst	Alle Frequenzbereiche	1 bis 750

In Baden-Württemberg lagen für rund 11.000 Standorte ortsfester Funksendeanlagen Standortbescheinigungen vor, in Bayern waren es rund 14.000 Standorte (Stand: Anfang 2016). In Baden-Württemberg war an rund 8.900 und in Bayern an rund 11.800 Standorten mindestens eine Mobilfunksendeanlage installiert [11].



Abb. 48: A-Netz-Autotelefon der Firma TE-KA-DE aus dem Jahre 1961.

Die Einhaltung der Grenzwerte wird stichpunktartig durch die Bundesnetzagentur messtechnisch überprüft. Die Ergebnisse dieser fortlaufend durchgeführten Messungen sind im Internet einsehbar [11].

4.3 MOBILFUNK

4.3.1 ENTWICKLUNG DES MOBILFUNKS

Die Anfänge des analogen Mobilfunks in Deutschland mit dem A-Netz gehen auf das Jahr 1958 zurück. 1972 folgte das B-Netz und 1984 das C-Netz. Durch die Einführung des deutlich leistungsfähigeren digitalen Mobilfunks mit dem D-Netz im Jahr 1992 und dem E-Netz im Jahr 1994 wurde der Analogfunk nach und nach abgelöst und ist seit dem Jahr 2000 ganz eingestellt. Mittlerweile entspricht die Gesamtzahl bestehender Mobilfunkverträge in etwa der Weltbevölkerung.

Mit der Einführung der Standards UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) bzw. HSPA (High Speed Packet Access) in den Jahren 2001 bzw. 2006 begann der Siegeszug des mobilen Internets. Aufgrund des stetig steigenden individuellen Datenverkehrs und der verstärkten Nutzung des Mobilfunks für automatisierte Anwendungen (siehe Abb. 50) sind immer höhere Übertragungsraten notwendig. Die derzeit höchsten Übertragungsraten mit über 300 MBit/s (Stand Januar 2016) bieten die seit 2011 in Deutschland etablierten LTE-Netze (Long Term Evolution).

Moderne Smartphones unterstützen neben dem GSM-Standard auch den UMTS- und LTE Standard und wechseln je nach Verfügbarkeit automatisch zwischen den Netzen. Wegen der hohen Nachfrage nach mobilem Internet werden die LTE-Netze mit hohem Tempo weiter ausgebaut; die Bedeutung der GSM- und UMTS-Netze schwindet hingegen. Ein Netzbetreiber in der Schweiz hat die Abschaltung seines GSM-Netzes bereits für 2020 angekündigt, da nur noch 0,5 % des mobilen Datenverkehrs darüber laufen. In Deutschland dürfen die GSM-Frequenzen ab 01.01.2017 technologieneutral genutzt werden, also z. B. auch für LTE.



Abb. 49: Als das Handy noch „porty“ hieß. C-Netz-Telefon von Philips aus dem Jahre 1988.

Abb. 50: Datenvolumen im Mobilfunk. Aus dem Jahresberichte der Bundesnetzagentur [12].

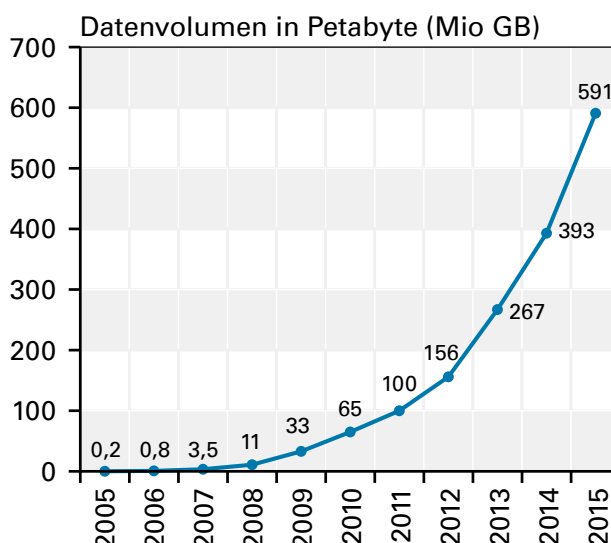




Abb. 51: GSM-Handy 7110 der Firma Nokia aus dem Jahr 2000.



Abb. 52: Smartphone.

4.3.2 MOBILFUNKNETZE IN DEUTSCHLAND

GSM wird hauptsächlich für Telefongespräche genutzt. GSM wird als Standard der zweiten Generation (2G) bezeichnet und ist weltweit verbreiteter Standard. Auch in Deutschland sind die GSM-Netze nahezu flächendeckend ausgebaut, deswegen unterstützen heute alle in Deutschland verfügbaren Handys sowohl GSM-900 als auch GSM-1800. Vorteile von GSM sind die große Zuverlässigkeit und internationale Verbreitung. Nachteilig ist die geringe Datenübertragungsgeschwindigkeit mit maximal 220 kBit/s.

UMTS ist ein Mobilfunkstandard der dritten Generation (3G), der sowohl für Telefonie als auch für Datenübertragung genutzt wird. Mit UMTS sind im Vergleich mit GSM bis zu 200-fach höhere Datenübertragungsraten möglich (bis zu 42 MBit/s mit HSPA+). UMTS-Netze sind in Deutschland heute in Städten fast flächendeckend verfügbar, auf dem Land nur eingeschränkt. Je nach Netzbetreiber betrug die Einwohnerabdeckung Anfang 2015 zwischen 76 % und 91 %, die geographische Netzabdeckung je nach Betreiber zwischen 39 % und 69 % (Angaben der Bundesnetzagentur).

LTE ist ein Standard der vierten Generation (4G), der in erster Linie für Datenübertragung genutzt wird und Übertragungsraten von mehr als 300 MBit/s ermöglicht. Der LTE Ausbau wurde 2011 begonnen und schreitet zügig voran. Nach Angaben der Bundesnetzagentur betrug die Zahl der LTE-Basisstationen Ende 2015 in Deutschland bereits 38.800 (2014: 28.700). Zum Vergleich: zu diesem Zeitpunkt gab es in Deutschland 61.600 UMTS- und

81.100 GSM-Basisstationen. LTE-Netze sind in Deutschland heute in Städten fast flächendeckend verfügbar, auf dem Land nur eingeschränkt. Je nach Netzbetreiber betrug die Einwohnerabdeckung Ende 2015 zwischen 75 % und 90 %. Alle deutschen Netzbetreiber streben an, bereits in wenigen Jahren mit ihrem LTE-Netz 90 % bis 95 % der Nutzer zu erreichen. Die Entwicklung geht rasant weiter: Die Verfügbarkeit von LTE-Geschwindigkeiten bis 750 MBit/s ist angekündigt; LTE-Advanced soll in Deutschland Geschwindigkeiten bis 1.200 MBit/s möglich machen.

4.3.3 MOBILFUNKTECHNOLOGIEN

Wie Mobilfunkbasisstationen können auch mobile Endgeräte (Smartphones oder Tablets) Informationen sowohl senden als auch empfangen. Die Senderichtung von der Basisstation zum Handy nennt man „Downlink“, die umgekehrte Richtung vom Handy zur Basisstation „Uplink“. Wenn beide Übertragungswege gleichzeitig nutzbar sind, wird dies als Gegen- oder Duplexbetrieb bezeichnet. Handy und Basisstation senden dazu gleichzeitig auf unterschiedlichen Frequenzen. Man nennt dieses Verfahren Frequenzduplex. Diese Technik wird von GSM, UMTS und LTE verwendet. Alternativ können Basisstation und Mobilteil auch im schnellen Wechsel auf derselben Frequenz senden, wie es z.B. bei schnurlosen DECT-Telefonen und WLAN üblich ist. Dieses Verfahren nennt man Zeitduplex.

Beim Rundfunk können alle Menschen an einem Ort dieselben Radio- oder Fernsehprogramme ohne Einschränkung nutzen. Beim Mobilfunk hingegen müssen die vorhandenen Funkkapazitäten möglichst effizient auf die einzelnen Nutzer aufge-

teilt werden. Für diesen sogenannten Vielfachzugriff (Multiple Access) gibt es verschiedene technische Lösungen.

Aufgrund der stark steigenden Nachfrage nach mobilem Internet werden die Mobilfunktechnologien auf immer höhere Übertragungsgeschwindigkeit getrimmt. Dies wird durch mehrere Maßnahmen realisiert. So ging mit jeder neuen Mobilfunkgeneration eine Verbreiterung des Funkkanals einher: Von 200 kHz bei GSM über 5 MHz bei UMTS bis hin zu 20 MHz bei LTE. UMTS und LTE können die Übertragungskapazität der Funkzelle dynamisch zuteilen. Da immer leistungsfähigere Signalprozessoren zur Verfügung stehen, lassen sich mit jeder neuen Mobilfunkgeneration effizientere Modulationsverfahren realisieren.

Für schnelle Datenübertragung können mehrere UMTS- oder LTE-Kanäle zusammengefasst werden; diese Kanäle können in völlig unterschiedlichen Frequenzbändern liegen. Bei der 2x2-Mehrantennentechnik (MIMO) wird der Datenstrom über zwei Antennen gesendet und über zwei Antennen empfangen. Dabei werden die beiden Sendeantennen der Basisstation und des Handys um 90° versetzt montiert. Auf diese Weise kann bei geeigneten Empfangsbedingungen das Frequenzspektrum doppelt genutzt werden.

Schnelle Datenübertragung funktioniert nur bei guten Empfangsbedingungen. Der Nutzer sollte daher nicht weiter als etwa 500 m von der Basisstation entfernt sein und sich die Funkzelle nicht mit zu vielen Nutzern gleichzeitig teilen müssen. Die Betreiber verdichten ihre Mobilfunknetze



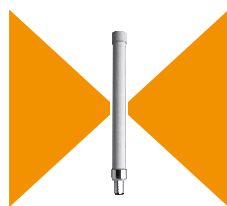
Abb. 53: Mobilfunkmast.

deshalb durch neue Senderstandorte und teilen das Senderumfeld mit Sektorantennen in mehrere Funkzellen auf.

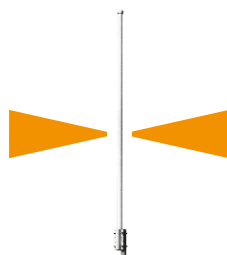
4.3.4 BAUFORMEN VON MOBILFUNK-ANTENNEN

Die Antennen der Mobilfunkbasisstationen sind an einem Antennenträger befestigt und über Kabel an die Sende- und Empfangselektronik angeschlossen. Sie werden auf Masten oder hohen Gebäuden installiert, damit sie möglichst abschattungsfrei Funkverbindungen zu den Handys herstellen können.

Bei den Sendeantennen kommen unterschiedliche Bauformen zur Anwendung. Meist handelt es sich um Sektorantennen (Panel-Antennen), die je nach gewünschter Reichweite schwach bis sehr stark bündeln und Antennengewinnfaktoren G zwischen 18 und ca. 130 aufweisen. In der Abb. 54 und Abb. 55 sind der vertikale Abstrahlwinkel in Grad, die Antennenhöhe in cm und der Antennengewinnfaktor G angegeben.



78°
21 cm
 $G = 1,6$



11°
30 cm
 $G = 10$

Abb. 54: Rundstrahlantennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung.

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 Abb. 56). Dadurch kann die Übertragungskapazität bei gleicher Sendeleistung verdreifacht werden. Sektorantennen lassen sich gezielt in bestimmte Richtungen ausrichten.

Die starke vertikale Bündelung hat zur Folge, dass das bodennahe Umfeld unterhalb der Antenne bzw. die Räume eines Gebäudes, auf dem die Antenne steht, deutlich weniger beaufschlagt sind, als man dies von der Entfernung her erwarten würde. Deutlich wird dies anhand der nachfolgend dargestellten Computersimulationen.

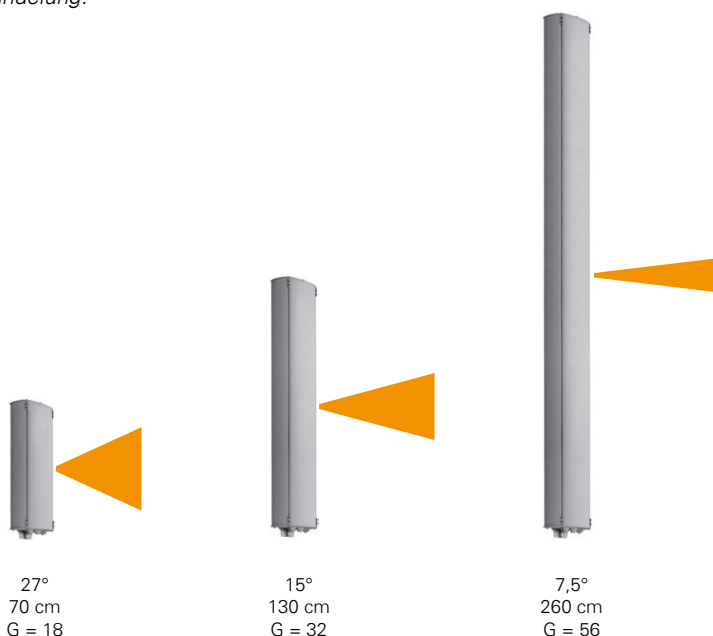


Abb. 55: Sektorantennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung.



Abb. 56: Mobilfunkmast mit Antennen verschiedener Betreiber. Im Bild unten rechts: eine Richtantenne zur Anbindung an die übergeordnete Netzeinheit.

4.3.5 ABSTRAHLUNG EINER MOBILFUNKANTENNE

Mit Computerprogrammen kann das Abstrahlverhalten einer Mobilfunkantenne simuliert werden. In der Abb. 57 ist das Abstrahlverhalten einer typischen Sektorantenne dargestellt, die mit 40 W gespeist wird und auf einem Haus in 30 m Höhe montiert ist. Die Antenne ist 1,30 m lang und hat einen vertikalen Öffnungswinkel von 14°. Sie strahlt mit $28 \times 40 \text{ W} = 1.120 \text{ W}$ (EIRP) in Hauptstrahlrichtung und ist dabei um 2° nach unten geneigt. Der Antennengewinnfaktor beträgt $G = 28$.

In der Abb. 57 ist deutlich der Hauptstrahl erkennbar, dessen Achse in etwa 500 m Entfernung den Boden trifft. Neben dem Hauptstrahl treten in bestimmten Winkeln Nebenstrahlen auf. Sie erreichen den Erdboden früher, sind jedoch deutlich schwächer als der Hauptstrahl. Die Leistungsdichte an einem Ort hängt also entscheidend von der Orientierung zur Antenne der Basisstation ab.

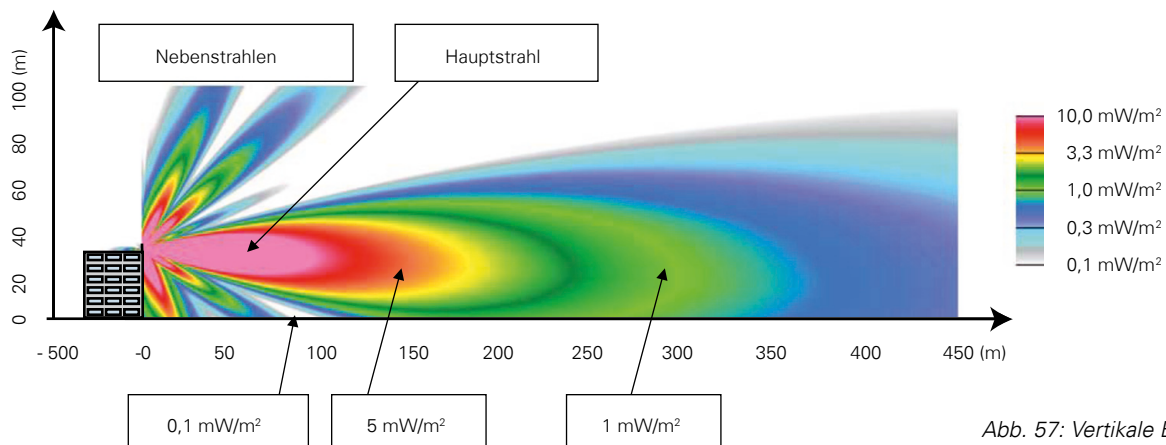


Abb. 57: Vertikale Bündelung einer Sektorantenne.

In der Abb. 58 ist die Simulation einer Mobilfunkantenne mit drei Sektorantennen dargestellt, die um jeweils 120° versetzt an einem Mast montiert sind. Bis auf die Antennenzahl und die Perspektive wurden dieselben Parameter und Farben verwendet wie in Abb. 57. In diesem Fall blickt man von oben auf die Antenne und ihre Umgebung; der Pfeil bezeichnet die Schnittebene der Abb. 57. Die Farben veranschaulichen die Leistungsdichte in 1 m

Höhe über dem Erdboden. An Punkten außerhalb des Hauptstrahls oder hinter einem Gebäude sind die Werte sehr viel niedriger. Dies gilt ebenso in Gebäuden und an Orten ohne direkten Sichtkontakt zu einem Mobilfunkmast; dort werden Leistungsdichten von 1 mW/m^2 selten erreicht. In Wohnungen liegen typische Werte zwischen $0,001 \text{ mW/m}^2$ ($1 \mu\text{W/m}^2$) und 1 mW/m^2 .

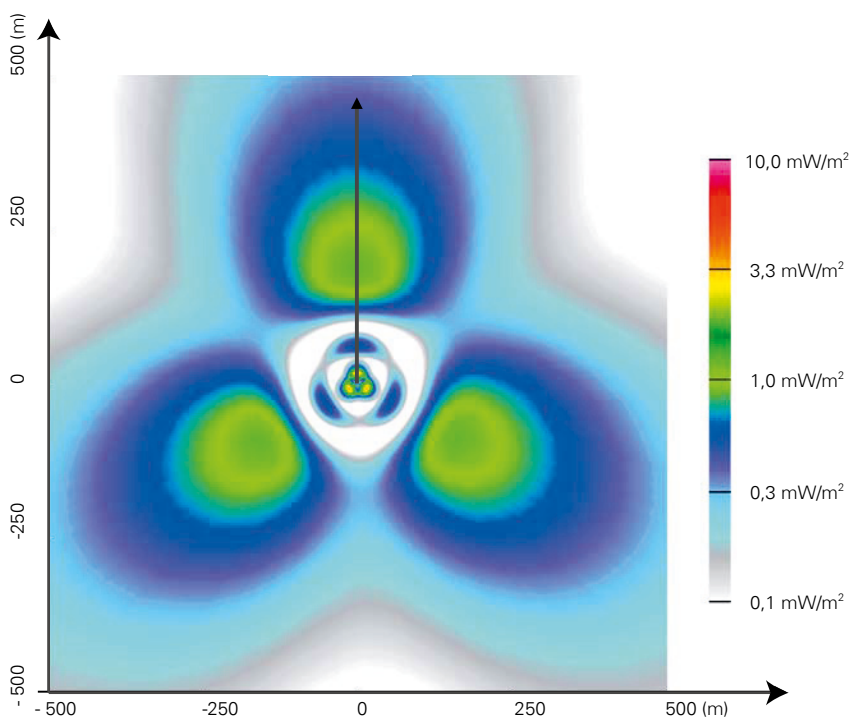


Abb. 58: Blick von oben auf eine Mobilfunkantenne und ihre Umgebung. Gut erkennbar ist die horizontale Bündelung der einzelnen Sektorantennen.

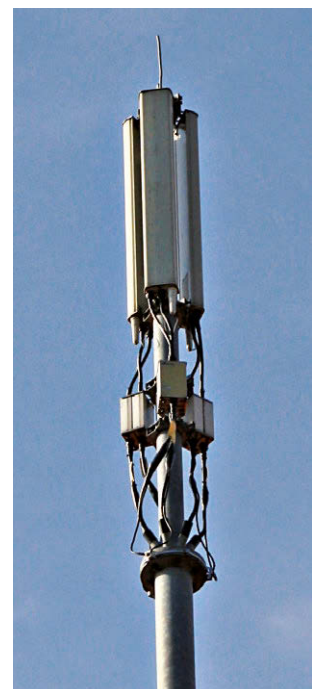


Abb. 59: Antennenkonstellation einer typischen Mobilfunkbasisstation mit drei Sektorantennen.

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

Ausgangsgröße für die in den Abb. 57 dargestellten Leistungsdichten ist die Leistung EIRP, also das Produkt aus Speiseleistung und Antennengewinnfaktor G. Für die beiden Grafiken wurde eine Sendeleistung von 1.120 W (EIRP) verwendet. Laut Tab. 6 wird für 1.000 W (EIRP) in 282 m Abstand eine Leistungsdichte von 1 mW/m² in Hauptstrahlrichtung erreicht. Für 1.120 W (EIRP) beträgt dieser Abstand ca. 300 m (siehe Abb. 57). Außerhalb der Hauptstrahlrichtung benötigt man das genaue Antennendiagramm der verwendeten Antenne, in dem die Antennengewinnfaktoren für die unterschiedlichen Raumwinkel verzeichnet sind.

Die in Hauptstrahlrichtung einer Antenne und ohne Dämpfung durch Gebäude maximal erreichbaren Leistungsdichten sind in der Tab. 6 dargestellt. Die acht Zeilen ste-

hen für beispielhafte Sendeleistungen zwischen 10 W und 30.000 W (EIRP), die fünf Spalten für Leistungsdichten zwischen 10 W/m² und 1 mW/m². Die Leistungsdichten 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).

Der Tab. 6 liegt das quadratische Abstandsgesetz

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

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

Tab. 6: Abstände von der Antenne in Hauptstrahlrichtung, in denen bestimmte Leistungsdichten erreicht werden, für Sendeleistungen zwischen 10 W und 30.000 W (EIRP). Die Spalten zwei bis vier gelten für die Grenzwerte der gängigen Mobilfunkdienste (Frequenzbänder 900 MHz, 1,8 GHz und 2 GHz).

Sendeleistung in Hauptstrahlrichtung in W (EIRP)	Leistungsdichte in W/m ² bzw. mW/m ² für den berechneten Abstand				
	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	1.545,1 m

4.3.6 NETZSTUKTUR

Bei Hörfunk und Fernsehen kann ein Sendeturm aufgrund der hohen Sendeleistung in der Regel ein Gebiet im Umkreis von 100 km versorgen. Aus Gründen der Übertragungskapazität und der begrenzten Sendeleistung von Handys benötigt Mobilfunk ein sogenanntes zelluläres Netz mit einer Vielzahl kleinräumiger, nahtlos aneinander grenzender Funkzellen.

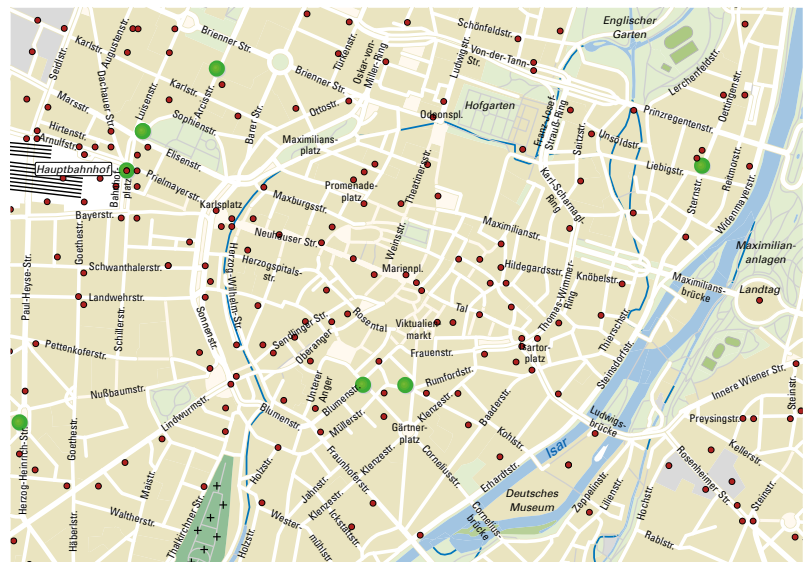
Verantwortlich für die Versorgung einer Funkzelle ist die Basisstation. Diese deckt einen Umkreis von einigen hundert Metern bis zu mehreren Kilometern ab. Bei GSM beträgt der maximal zulässige Funkzellenradius 35 km, an den Küsten bis zu 70 km. Meist ist nicht die Reichweite der begrenzende Faktor, sondern die Kapazität: Jede Basisstation kann nur eine bestimmte Menge an Gesprächen und Daten gleichzeitig übertragen. Die Größe einer Funkzelle ergibt sich somit aus der Teilnehmerdichte. Innerstädtisch sind die Sendemasten deshalb viel dichter aufgestellt als auf dem Land.

Eine neue Entwicklung sind Femtozellen. Das sind Basisstationen, die wie WLAN-Router einen Zellenradius 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 (EIRP) und weniger.

Auf der Internetseite der Bundesnetzagentur emf.bundesnetzagentur.de sind alle Mobilfunkstandorte in Deutschland verzeichnet. Im Juni 2016 gab es 74.000 Standorte. Ein Kartendienst ermöglicht es, die Sendeanlagen in der eigenen Umgebung anhand der orangefarbenen Dreiecke zu identifizieren. Grüne Punkte kennzeichnen Orte, an



Ausschnitt von Mindelheim circa 3,1 km x 2,2 km mit 9 Standorten



Ausschnitt von München circa 3,1 km x 2,2 km mit circa 209 Standorten

- An diesem Standort befindet sich ein genehmigungspflichtiger Sender.
- An diesem Standort fand in der Vergangenheit eine Messung der Bundesnetzagentur statt.

Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung
Datenquelle: Bundesnetzagentur, EMF-Datenbank [12]

Abb. 60: Standorte genehmigungspflichtiger Mobilfunkbasisstationen in München und Mindelheim.

denen eine Messung der Bundesnetzagentur stattgefunden hat. Die in der Abb. 60 dargestellten Beispiele aus München und Mindelheim machen deutlich, wie unterschiedlich die Senderdichte je nach der Nutzerdichte sein kann.

4.3.7 IMMISSIONEN EINES HANDYS

Die Sendeleistung des Handys – mit Einschränkungen auch die der Basisstation – ist von der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation abhängig. Bei schlechter Verbindungsqualität ist eine deutlich höhere Sendeleistung erforderlich als bei guter Versorgung. Die zeitlich gemittelte Sendeleistung von Mobilfunkendgeräten liegt abhängig von Frequenzband und verwendeter Technologie bei maximal 125 mW bis 250 mW. In aller Regel liegt sie deutlich darunter. Bei gutem Empfang wird die Sendeleistung von Mobilfunkendgeräten stark reduziert (siehe Abb. 61). UMTS und LTE können die Sendeleistung erheblich effizienter regulieren als GSM, sie sind daher aus Vorsorgegründen vorzuziehen.

Im Ruhezustand befinden sich Handys in einem reinen Empfangsmodus und senden fast nicht. Ein Handy, das in derselben Funkzelle bleibt, hat zur Anwesenheitskontrolle alle 1 bis 12 Stunden einen kurzen Funkkontakt mit der Basisstation, der etwa eine Sekunde lang dauert (periodic location update). Im Dauersendebetrieb befindet sich ein Handy nur bei Telefongesprächen und Datenverbindungen. Moderne Smartphones bauen deutlich häufiger Datenverbindungen zum Internet auf. Sie prüfen im Hintergrund die installierten Anwendungen auf Aktualität,

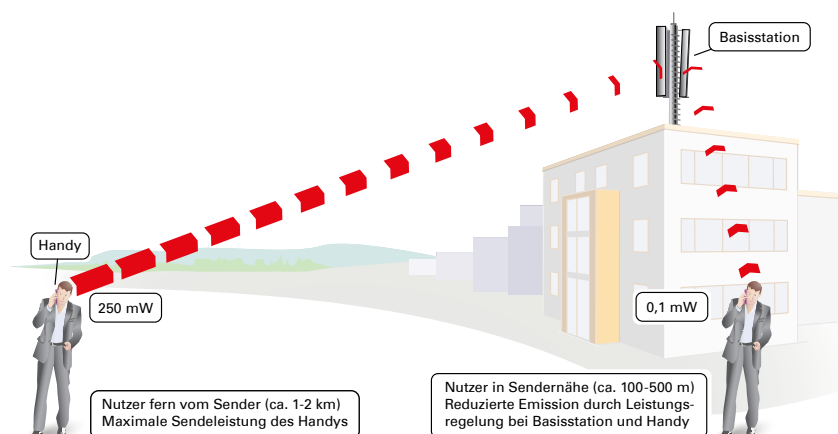
suchen in Kommunikationsdiensten nach neuen Nachrichten oder aktualisieren Kalender und Wetterprognosen, um nur einige Beispiele zu nennen. Durchschnittlich wird im Abstand von wenigen Minuten ein Funkkontakt zum Internet hergestellt. Dies Verhalten wirkt sich u. a. auf die Akkulaufzeit aus: Die Akkuladung einfacher Mobiltelefone kann zwei Wochen lang reichen, Smartphones müssen meist täglich an die Steckdose.

4.3.8 TIPPS ZUR VORSORGE

- Verwenden Sie eine Freisprecheinrichtung oder ein kabelgebundenes Headset; dadurch verringert sich die Leistungsdichte 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 % weniger).
- Verwenden Sie strahlungsarme Handys, wie sie z. B. auf der Internetseite des Bundesamts für Strahlenschutz BfS aufgeführt sind [13].
- Verwenden Sie Ihr Smartphone nicht im GSM-Modus.
- Stecken Sie UMTS-Datasticks nicht direkt in den Laptop, sondern verwenden Sie ein USB-Kabel und legen den Stick ans Fenster.

Tipps!

Abb. 61: Leistungsregelung bei Basisstation und Handy: Je besser die Funkverbindung zwischen Handy und Basisstation ist, desto mehr kann die Sendeleistung reduziert werden.



Werden diese Maßnahmen kombiniert, kann die Leistung am Ohr im Idealfall auf weniger als ein Zehntausendstel reduziert werden.

4.4 RUNDFUNK

Hochfrequente elektromagnetische Wellen werden seit Beginn des 20. Jahrhunderts zur Radioübertragung genutzt, später kam das Fernsehen dazu. Beides wird unter dem Begriff Rundfunk zusammengefasst. Anders als das zellulare Netz des Mobilfunks (siehe Abschnitt 4.3.7) arbeitet der Rundfunk mit leistungsstarken Grundnetzsendern, die bisweilen Gebiete mit einem Radius von mehr als 100 km versorgen.

In der Karte auf Seite 86 (Abb. 63) sind alle baden-württembergischen und bayrischen Standorte verzeichnet, an denen sich Rundfunksender mit einer installierten Gesamtsendeleistung von mindestens 25 kW (ERP) befinden. Insgesamt werden in Baden-Württemberg 5,4 MW (ERP) und in Bayern 10,6 MW (ERP) Sendeleistung für die Rundfunkausstrahlung eingesetzt (Stand Juli 2015).

Die Sender sind meist auf hohen Bergen, in Großstädten auch auf Fernsehtürmen installiert. Verschiedene Sektorantennen werden so angeordnet, dass die Abstrahlung rundum in alle Richtungen erfolgt. In manchen Fällen, etwa in Gebirgsnähe oder wenn eine Ausstrahlung ins Ausland unerwünscht ist,

wird die Sendercharakteristik angepasst. In vertikaler Richtung sind die Strahlen ähnlich wie beim Mobilfunk gebündelt.

Aufgrund der hohen Sendeleistungen sind Sicherheitsabstände bis zu mehreren hundert Metern erforderlich. Für den Sender Wendelstein (UKW, DVB-T) z. B. weist die Bundesnetzagentur einen Sicherheitsabstand von 320 m in Hauptstrahlrichtung aus. Durch die Wahl exponierter Standorte lassen sich die Sicherheitsabstände gut kontrollieren. Hohe Grenzwertausschöpfungen treten nur in Ausnahmefällen in Wohngebieten auf. In Städten liegt die Grenzwertausschöpfung beim Mobilfunk deutlich höher als beim Rundfunk [14].

Seit Ende 2008 ist das digitale terrestrische Fernsehen DVB-T deutschlandweit in Betrieb. Auf einem DVB-T Kanal werden meist vier Fernsehprogramme übertragen. In Baden-Württemberg und Bayern strahlen an den meisten Senderstandorten 12 öffentlich-rechtliche Fernsehprogramme auf drei DVB-T-Kanälen mit jeweils 50 kW (ERP) Leistung aus. In Bayern kommen auch Sender mit der doppelten Leistung zum Einsatz. Die Sender München, Wendelstein und Nürnberg bieten über die öffentlich-rechtlichen Programme hinaus bis zu 10 private Fernsehprogramme auf zwei bis drei DVB-T-Kanälen an. Zwischen 2016 und 2019 findet die Ablösung von DVB-T durch DVB-T2 statt, zeitlich gestaffelt nach Regionen. DVB-T2 kann



Abb. 62: Stuttgarter Fernsehturm.

Tab. 7: Anzahl und Leistung von Rundfunk-Sendeanlagen in Baden-Württemberg und Bayern, Quelle: Sendertabellen auf UKWTV.de (Stand Juli 2015)

Sendeanlage	Baden-Württemberg			Bayern		
	Installierte Leistung P(ERP) / kW	Sender	Standorte	Installierte Leistung P(ERP) / kW	Standorte	Sender
Digitalradio DAB	208	19	39	577	49	95
UKW-Radio	3.165	182	401	4.837	245	600
Fernsehen DVB-T	2.011	17	49	5.132	30	90
Summe	5.384	218	489	10.547	324	785

mehr Programme übertragen, und das sogar in HD-Qualität. Zusätzlich stehen verschlüsselte Programme zur Verfügung [15].

(100 kW bis 250 kW ERP pro Transponder) auf der Erde vernachlässigbar gering.

4.5 BOS-TETRA-DIGITALFUNK

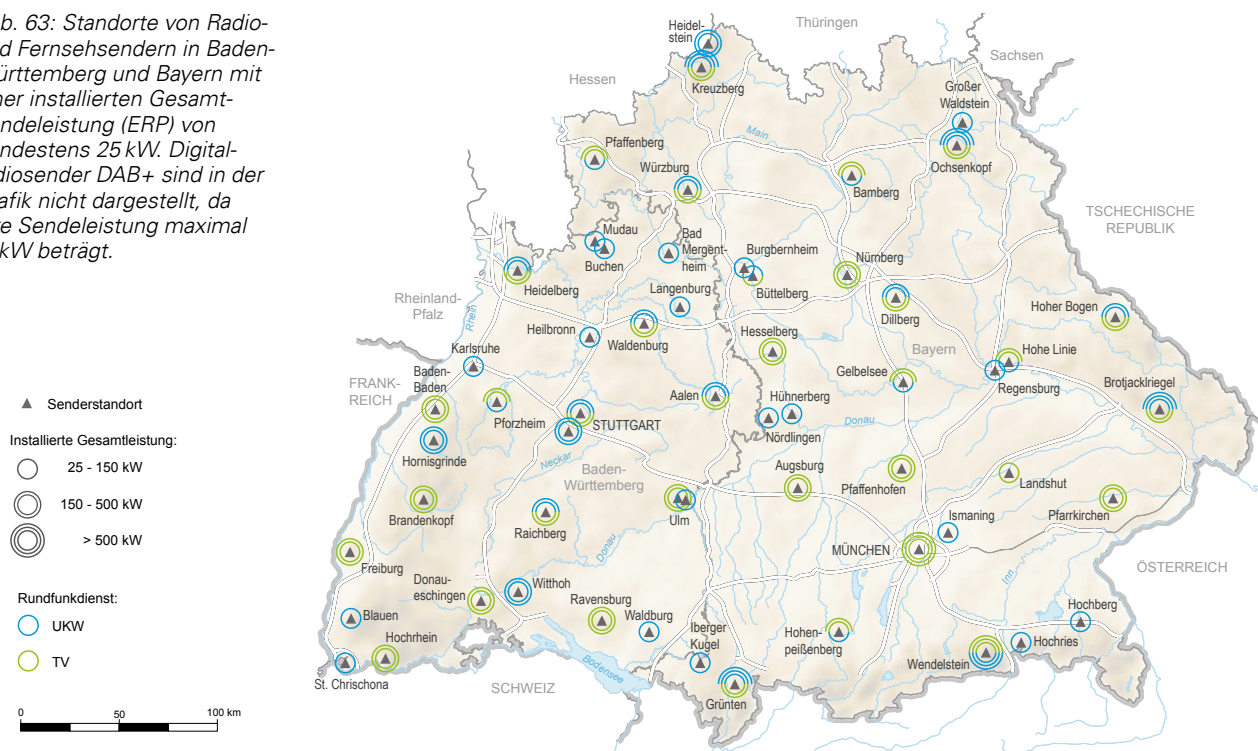
Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie Feuerwehren, Rettungsdienste, Technisches Hilfswerk, Bundes- und Landespolizei verfügen heute deutschlandweit über ein gemeinsames digitales Behördenfunknetz, das auf dem internationalen TETRA-Standard basiert. TETRA-Digitalfunk kommt derzeit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

Der Trend zur Digitalisierung schreitet auch beim Hörfunk voran. Die Immissionen durch Digitalradio DAB+ haben infolge des flächendeckenden Ausbaus in den letzten Jahren deutlich zugenommen; umgekehrt nehmen die Immissionen durch analoge Radiosender immer weiter ab. In Baden-Württemberg und Bayern sind inzwischen alle Sender für Kurz-, Mittel- und Langwelle stillgelegt. Einzig der analoge UKW-Rundfunk bleibt bis auf Weiteres erhalten; Pläne zu seiner Abschaltung wurden 2011 vom Bundestag verworfen.

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 Sendeleistung

Im Unterschied zu den Mobilfunksystemen ermöglicht TETRA eine GPS-unterstützte Einsatzsteuerung sowie Gruppenkommunikation. Weiterhin zeichnet sich das System durch schnellen Verbindungsaufbau (unter 0,5 s), Prioritätsrufen sowie Alarmierungsmöglichkeiten aus. Hinzu kommen Abhör-

Abb. 63: Standorte von Radio- und Fernsehsendern in Baden-Württemberg und Bayern mit einer installierten Gesamt-Sendeleistung (ERP) von mindestens 25 kW. Digitalradiosender DAB+ sind in der Grafik nicht dargestellt, da ihre Sendeleistung maximal 10 kW beträgt.



sicherheit durch Verschlüsselung, Telefon-Funktionen und ein Gerätemodus, der direkte Kommunikation zwischen mobilen Endgeräten zulässt (direct mode). Für kritische Einsatzsituationen gibt es eine Notruffunktion mit GPS-Ortung.

In Bayern und Baden-Württemberg wurden insgesamt ca. 1.600 TETRA-Basisstationen errichtet und im Gegenzug ca. 6.000 analoge BOS-Funkanlagen abgebaut. Das TETRA-Digitalfunknetz ist zellular 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 bei 4 km bis 5 km im städtischen Gebiet und 10 km bis 25 km im ländlichen Raum [16].

TETRA ist dem GSM-Standard ähnlich: Es unterteilt wie GSM jeden Funkkanal nach dem Zeitmultiplexverfahren in einzelne Zeitschlitze. Pro Kanal können 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 zwischen 380 MHz und 400 MHz zugewiesen. Für diesen Frequenzbereich beträgt der gesetzliche Grenzwert 27,5 V/m (elektrische Feldstärke) bzw. 2 W/m² (Leistungsdichte). Basisstationen von TETRA-Digitalfunknetzen müssen die gesetzlichen Grenzwerte der 26. BImSchV einhalten.

Die BOS-Funkrichtlinie [17] begrenzt die maximale Sendeleistung einer BOS-TETRA-Basisstation auf 519 W (EIRP). Daraus lässt sich ein maximaler Sicherheitsabstand in Hauptstrahlrichtung von 4,50 m errechnen. Der tatsächliche Sicherheitsabstand einer realen Anlage liegt bei 2 m bis 3 m. In der Regel senden Basisstationen mit einer Leistung von 20 W pro Kanal. Die Sendeleistung der Handfunkgeräte wird geregelt und beträgt 30 mW bis 1 W, je nach Empfangsqualität am Einsatzort.

Das TETRA-System erfüllt alle europäischen Anforderungen zum Gesundheitsschutz. Die Zulassung der Basisstationen wird durch eine Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur dokumentiert. Ergänzend zu den vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen führte das BfS in Zusammenarbeit mit den Nutzern des digitalen Behördenfunks mehrere Studien durch [18].

4.6 STATIONÄRE INTERNET-FUNK-LÖSUNGEN

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



Abb. 64: TETRA-Mobilfunkmast mit Rundstrahlantenne.



Abb. 65: TETRA-Funkgerät.



Abb. 66: Außenantenne am Fenster.



Abb. 67: Outdoor-DSLAM mit Richtfunktankbindung.

Funk-DSL ist wie Satelliteninternet eine Nischentechnologie zur Versorgung schlecht erschlossener Gebiete. Für Privatanutzer werden heute Systeme zwischen 2 Mbit/s und 20 Mbit/s inkl. VoIP-Telefonanschluss angeboten, was sich von normalem DSL kaum unterscheidet. Schon geringe Nutzerzahlen ermöglichen den kostendeckenden Betrieb. Bei Funk-DSL versorgt eine Basisstation mit einer Rundstrahlantenne oder mehreren Sektorantennen an einem erhöhten Standort etwa 20 bis 50 Endkunden. Diese sind durch eine kleine Außenantenne oder eine Zimmerantenne mit der Basisstation verbunden. Bei Sichtverbindung lassen sich mit Außenantennen Distanzen von mehreren Kilometern problemlos überbrücken. Beim Nutzer kommen entfernungsabhängig unterschiedliche Antennenformen zum Einsatz: Rundstrahlantennen, Sektorantennen oder kleine Flachantennen. Sie werden am Balkon, an der Hauswand (siehe Abb. 66) oder auf dem Dach befestigt.

Basisstationen für Funk-DSL verwenden lizenzfreie Frequenzbänder bei 2,4 GHz und 5,7 GHz mit Sendeleistungen bis zu 1 W (EIRP). Die Basisstationen sind untereinander durch Richtfunkstrecken verbunden (siehe Abschnitt 4.7). Die Immissionen der Richtfunkstrecken sind kaum nachweisbar, die der Basisstationen sind aufgrund der geringen Sendeleistungen etwa tausendfach geringer als beim Mobilfunk. Die Immissionen der Endgeräte liegen auf vergleichbarem Niveau [19].

Alternativ zur direkten Funkanbindung 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 Glasfaserkabels und kann günstiger anbieten.

4.7 RICHTFUNK

Die Richtfunktechnik dient der Bild-, Ton- und Datenübertragung auch über weite Strecken. Typische Distanzen liegen zwischen 1 km und 70 km. Es werden Trägerfrequenzen im Mikrowellenbereich zwischen 6 GHz und 40 GHz verwendet: 6 GHz bis 8 GHz für Funkstrecken über 20 km, 11 GHz bis 15 GHz für Entfernungen zwischen 10 km und 20 km sowie 18 GHz bis 38 GHz für Entfernungen zwischen 1 km und 10 km. Die Richtantennen besitzen hohe Antennengewinnfaktoren zwischen 1.000 und 10.000. Sie werden meist auf Funktürmen installiert (Abb. 68). Meistens werden Parabol- oder Flachantennen verwendet. Der Antennengewinn ist frequenzabhängig und steigt linear mit der Antennenfläche.



Abb. 68: Parabolantennen auf einem hohen Mast in Karlsruhe.

Die große Richtwirkung der Antennen erlaubt hohe Datenübertragungsraten trotz geringer Antenneneingangsleistungen zwischen 10 mW und 1 W. Bei guten Witterungsbedingungen wird die reale Sendeleistung auf wenige Prozent der Maximalleistung reduziert. Der Hauptstrahl ist vertikal und horizontal stark gebündelt mit Öffnungswinkeln zwischen 1° und 4° . Außerhalb des engen Hauptstrahls nimmt die Leistungsdichte rapide ab. In der Hauptstrahlrichtung nimmt die Leistungsdichte mit der Entfernung quadratisch ab (siehe Abb. 44). Wegen der hohen Frequenzen und geringen Sendeleistungen muss Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantenne bestehen. Erdkrümmung, Geländeform und Flächennutzung (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 Leistungsdichten liegen bei einem Milliardstel der gültigen Grenzwerte und darunter.

Ein Sonderfall des Richtfunks ist die Satellitenkommunikation. Für den Empfang von Satellitenfernsehen und -radio befinden sich auf deutschen Hausdächern viele Millionen Parabolantennen. Als reine Empfangsantennen verfügen sie über keinerlei Sendetechnik und verursachen daher auch keine Immissionen.

4.8 AMATEURFUNK

In Deutschland gab es Ende 2015 gut 67.000 Amateurfunk-Zulassungen [20]. Der Empfang des Amateurfunkdienstes ist in Deutschland jedermann gestattet. 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 deutlich höher sein als durch andere Funkdienste. 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 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.



Abb. 69: WLAN-Richtfunksystem mit Flachantenne (5,8 GHz).



Abb. 70: WLAN-Richtfunksystem mit Gitter-Parabolantenne (5,8 GHz).



Abb. 71: Amateurfunkantenne (X-Quad für 70-cm- und 2-m-Band), 1,7-GHz-Yagi und UKW-Antenne.

Amateurfunkstellen müssen bei der Bundesnetzagentur nur angezeigt werden und benötigen keine Standortbescheinigung. Eine ortsfeste Amateurfunkstelle kann in die Standortdatenbank der BNetzA aufgenommen werden, wenn der Betreiber der Amateurfunkstelle dieser Aufnahme zustimmt. Die maximal erlaubte Sendeleistung wird von Amateurfunkern im Normalfall nicht ausgeschöpft. Die meisten Anlagen haben Leistungen zwischen 5 W und 100 W. Zudem sind Amateurfunkanlagen meist nur einige hundert Stunden pro Jahr in Betrieb [21].

zeugt 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 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 Passanten im Regelfall allerdings nur kurzzeitig ausgesetzt sind.

4.9 WEITERE ANWENDUNGEN

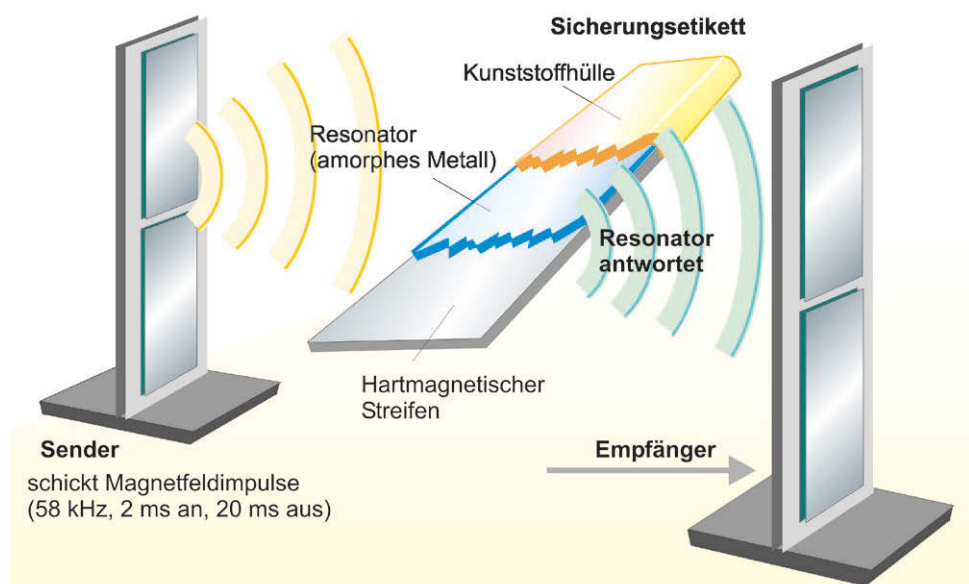
4.9.1 WARENSICHERUNGSSYSTEME

Elektromagnetische Felder finden in öffentlich zugänglichen Bereichen zunehmend Anwendung, z.B. der Artikelsicherung in Kaufhäusern. Standsäulen mit Magnetspulen im Kassenbereich und am Ausgang sollen einen Warendiebstahl verhindern. Wurden die an den Artikeln angebrachten Sicherungsetiketten nicht an der Kasse entfernt, lösen sie einen Alarm aus. Die in der Abb. 72 beispielhaft dargestellte Artikelsicherungsanlage besteht aus Sender und Empfänger. Die linke Spulenordnung er-

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 [22].

Siehe auch Kapitel 5

Abb. 72: Arbeitsweise einer Artikelsicherungsanlage.



4.9.2 ARTIKELERKENNUNG UND NAHFELDKOMMUNIKATION

Artikelerkennungsanlagen mit RFID (Radio frequency identification) können Artikel, Menschen oder Tiere kontaktlos mittels elektromagnetischer Felder 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 (Wegfahrsperre), Ohrmarken (Tierzucht), Implantaten und Plastikmünzen (Chipcoins) verwendet. Sie enthalten in der Regel eine Antenne sowie einen Mikrochip. Die Energieversorgung erfolgt entweder passiv durch Aufnahme der benötigten Energie aus dem Feld des Lesegeräts oder aktiv 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).

Die Nahfeldkommunikation (Near Field Communication, Abkürzung NFC) ist ein auf der RFID Technologie basierender internationaler Übertragungsstandard zum kontaktlosen Austausch von Daten per Funktechnik über kurze Strecken von wenigen Zentimetern und im Gegensatz zu RFID in beide Richtungen. Bisher kommt diese Technik vor allem bei bargeldlosen Zahlungen kleiner Beträge sowie für elektronische Tickets im ÖPNV, bei Sport- und Musikveranstaltungen zum Einsatz.

4.9.3 MIKROWELLENHERDE

Zur Erwärmung von Speisen im Mikrowellenherd werden elektromagnetische Wellen der Frequenz 2.455 MHz genutzt. Ähnliche Frequenzen werden auch im Mobilfunk (UMTS) und für WLAN verwendet, nur bei tausendfach geringeren Leistungen.

Mikrowellen werden von Speisen absorbiert und regen dort Moleküle zu Schwingungen an. Die Schwingungsenergie bewirkt eine Erwärmung des Garguts. Wassermoleküle können gut, Fettmoleküle weniger gut zu Schwingungen angeregt werden. Die Absorption der 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.



Abb. 73: Innenleben einer RFID-Card.



Abb. 74: Mikrowellenherd.



Abb. 75: DECT-Telefon mit ECO-Modus-Plus.

Tipps!

4.9.4 SCHNURLOSTELEFONE (DECT)

Schnurlostelefone basieren heute fast ausschließlich auf dem digitalen DECT-Standard und senden auf einer Frequenz um 1.900 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 etwa 2 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) [23].

ECO-DECT-Telefone können ihre Strahlungsleistung erheblich reduzieren. Basisstation und Endgerät müssen aber dazu aufeinander abgestimmt sein. Weitere Informationen zu schnurlosen Festnetztelefonen hat das BfS zusammengestellt [24].

4.9.5 DRAHTLOSE HEIMNETZWERKE (WLAN)

Ein WLAN (Wireless Local Area Network) ist ein drahtloses lokales Netzwerk mit einer Reichweite von 20 m 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-Systemen. WLAN-Router senden mindestens 10-mal pro Sekunde Signalisierungsinformationen (beacon). So ergibt sich 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.

WLAN-Systeme auf Basis der neuen IEEE-Standards 802.11n und 802.11ac versprechen deutlich höhere Übertragungsraten. 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.

Diese neuen WLAN-Standards nutzen zur Datenübertragung bessere Modulationsverfahren, breitere Kanäle und die Technik Multiple Input Multiple Output (MIMO), erkennbar an zwei bis vier Antennen pro Gerät. Dadurch werden Datenrate und Reichweiten erhöht. 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 verlängert und die Immissionen reduziert

Umfangreiche Informationen bietet das EMF-Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz [23].



Abb. 76: WLAN-Router.

4.9.6 BLUETOOTH

Bluetooth dient wie WLAN der Datenübertragung per Funk, meist zwischen Computer und drahtlosen Peripheriegeräten wie Maus, Tastatur, Drucker, Headset oder Handy im Entfernungsbereich von einigen Metern. Auch die Controller von Spielekonsolen nutzen Bluetooth zur Kommunikation. 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 die Leistungsklassen 1 mW, 2,5 mW und 100 mW. Aus Stromspargründen werden meist nur 1 mW und 2,5 mW verwendet. Der neue Bluetooth LE (low energy) Standard („Bluetooth Smart“) ist vergleichsweise langsam, aber dafür ausgelegt, mit einer einfachen Knopfzelle mitunter monatelang durchzuhalten. Damit eignet er sich ideal für „Wearable Devices“ wie Fitnessarmbänder oder Smartwatches [25]. Die Maximale Sendeleistung bei Bluetooth LE beträgt 10 mW im 2,4 GHz-Band.

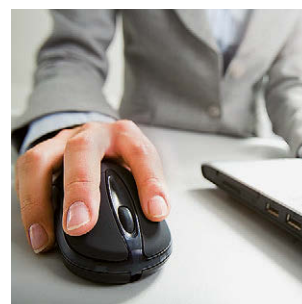


Abb. 77: Kabellose Computer-Maus.

4.9.7 BABYFONE

Babyfone dienen der akustischen Überwachung von Säuglingen und Kleinkindern. Sender und Empfänger werden entweder über ein eigenes Kabel, über das Hausstromnetz oder per 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 senden dauernd und erzeugen permanent Strahlung, andere aktivieren sich nur, wenn ein Geräusch auftritt. Mit geeigneter Gerätewahl können die Immissionen für das Kind niedrig gehalten werden.

Tipps!

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.

4.9.8 NEUE FUNKTECHNIK FÜR HAUS UND AUTO

Dank moderner Übertragungstechniken und hoher Datenraten kommen schon heute immer mehr funkgesteuerte Assistenzsysteme im Haushalt und in Fahrzeugen zum Einsatz. Sie dienen beispielsweise der Steuerung von Geräten, der elektronischen Erfassung und Übertragung von Messwerten oder der Sicherheit.

Im häuslichen Bereich läuft die Vernetzung von Haustechnik und Haushaltsgeräten sowie von Komponenten der Unterhaltungselektronik unter dem Schlagwort Smart Home. Via Internet werden die verschiedenen Komponenten angesprochen und z.B. über Smartphone-Apps gesteuert. Eine zentrale Steuereinheit kommuniziert kabelgebunden oder drahtlos mit den Sensoren und Aktoren im Haus.

Bei Smart Home gibt es eine große Anzahl von Standards zur Funkkommunikation. Tablets, Smartphones und Smart-TV kommunizieren über WLAN und Bluetooth bei 2,4 GHz (siehe weiter oben). Für Haushaltsgeräte, Klimageräte, Hauselektrik, Sicherheitstechnik, Rollläden und Kontakte an Türen und Fenstern existieren unterschiedliche Funkstandards: WLAN, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave, EnOcean, ULE, io-homecontrol, Home-Matic und Thread, nur um die wichtigsten zu nennen. Sie arbeiten auf den ISM-Frequenzen 868 MHz und 2,4 GHz oder im Bereich von DECT um 1,9 GHz. Die Sendeleistung liegt meist bei einigen Milliwatt. In geschlossenen Gebäuden ist dies ausreichend, da die Signalreichweite nur wenige Meter betragen muss.

Abb. 78: Smarthome Mobil-Steuerung.



Beim Smart Metering wird der Gas-, Wasser-, Strom- oder Fernwärmeverbrauch elektronisch erfasst und übertragen. Über eine Schnittstelle kann das Smart Meter auch mit der Smart-Home-Haussteuerung verbunden werden und so zu einer intelligenten Energieverbrauchsteuerung beitragen. Da hier größere Distanzen überbrückt werden, kommt die drahtgebundene Powerline-Technik oder die drahtlose Mobilfunktechnik (GSM-Modul) zum Einsatz. Die Funktechnik entspricht hierbei der eines Handys.

Smart Metering ist nur ein Beispiel für einen automatisierten Informationsaustausch zwischen Maschinen, Automaten oder Fahrzeugen, die untereinander oder mit einer zentralen Leitstelle mit Hilfe des Internets kommunizieren. Allgemein bezeichnet man dies als Machine-to-Machine-Technologie (M2M). Weitere Anwendungsgebiete für M2M sind etwa Verkehrssysteme, Gebäudetechnik, Verkaufsautomaten, Alarm- und Überwachungssysteme oder Telemedizin. Die Internetverbindung wird dabei häufig über Mobilfunk, WLAN oder Satelliten hergestellt.

In Fahrzeugen wird die Mobilfunktechnologie mittlerweile z.B. bei der Navigation, Ferndiagnose von Fehlfunktionen, Mauterfassung, Überwachung von Leasing- oder Versicherungsverträgen und bei Notrufsystemen genutzt. Aktuelle Verkehrsinformationen können als „Live-Service“ abgerufen werden; gleichzeitig senden Fahrzeuge ihre Standortinformationen automatisch an ein Rechenzentrum, welches daraus aktuelle Stauinformationen berechnet.

Ab April 2018 wird das europaweite Notrufsystems eCall in allen Neuwagen Pflicht. Mit eCall ausgestattete Fahrzeuge setzen unmittelbar nach dem Unfall selbsttätig einen Notruf an die nächstgelegene Notrufzentrale ab, die europaweit unter der einheitlichen Nummer 112 erreichbar ist. Auslöser für den Notruf sind Crash-Sensoren oder eine manuelle Tastenbetätigung. Die Notrufzentrale erhält automatisch eine genaue Standortmeldung des Fahrzeuges und hat die Möglichkeit, mit den Insassen zu sprechen, um weitere Informationen über den Unfall zu erhalten. Außerdem können Rettungsinformationen abgerufen und an die Retter übermittelt werden. Die Immissionen der Funkmodule sind, wenn sich die Antenne im Fahrzeug befindet, mit den Immissionen eines Handys vergleichbar. Beim Einsatz einer Außenantenne sind sie deutlich geringer.

Darüber hinaus werden heute in neuen Autos auch Radar-Sensoren verbaut, mit denen sich Position und Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge ermitteln lassen. Die Daten werden genutzt, um z.B. den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug automatisch zu regeln (Abstandsregel-Tempomat, ACC) oder eine Auffahrwarnung bzw. Notbremsung einzuleiten. Diese Radar-Sensoren arbeiten bei 24 GHz, 76 GHz oder 96 GHz mit einer geringen Sendeleistung von wenigen 10 mW.

4.10 EMF-MONITORING IN BAYERN UND BADEN-WÜRTTEMBERG

Da die Frage der Einwirkungen durch elektromagnetische Felder kontinuierlich von Interesse ist, haben sich Baden-Württemberg und Bayern vor einigen Jahren dazu entschlossen, das elektromagnetische Spektrum an vielen hundert Punkten zu messen. Mit den gewonnenen Messdaten war es erstmals möglich, statistische Aussagen über die Exposition der Gesamtbevölkerung zu treffen. In Bayern wurde das Monitoring bereits dreimal und in Baden-Württemberg zweimal durchgeführt. Dadurch sind auch Aussagen zur zeitlichen Veränderung möglich.

Bei allen Messkampagnen wurden die Immissionen anhand der Empfehlung des Europäischen Rates 1999/519/EG bewertet (siehe Kapitel 6). Die Messergebnisse wurden zu den dort aufgeführten Feldstärkewerten ins Verhältnis gesetzt (GW-E). Um

den Ausschöpfungsgrad des Grenzwertes für die Leistungsdichte GW-S zu erhalten, wurde der GW-E-Wert quadriert. Beispiel: Der Wert für GW-E liegt bei $0,02 = 2\%$. Demnach liegt der Wert für GW-S bei $(0,02)^2 = 0,0004 = 0,04\%$.

Die Ausschöpfungsgrade GW-S der einzelnen Frequenzen können – im Gegensatz zu den Werten für GW-E – einfach addiert werden. Da die thermischen Wirkungen, die man bei hochfrequenter Strahlung feststellt, linear von der Leistungsdichte abhängen, wurde in Bayern die GW-S-Darstellung gewählt. Ausgehend von der Messgröße sowie den gesetzlichen Grenzwerten entschied man sich in Baden-Württemberg für die GW-E-Darstellung.

Da an einzelnen Messorten die gemessenen Werte deutlich höher ausfielen als an den meisten anderen, sind die Mittelwerte nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Messorte. Die Mediandarstellung eignet sich in einem solchen Fall besser. Der Medianwert ist so definiert, dass die Hälfte der Messwerte darüber, die andere Hälfte darunter liegt. Einzelwerte fallen in dieser Darstellung nicht stark ins Gewicht. Medianwerte können im Gegensatz zu Mittelwerten aber nicht einfach zu einem Summenwert addiert werden.

4.10.1 BAYERN

Mit dem EMF-Monitoring verfolgt das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) seit 2002 das Ziel, die elektromagnetischen Felder regelmäßig repräsentativ zu erfassen. Die Auswahl der Messorte erfolgte bevölkerungsgewichtet verteilt über ganz Bayern. Bei den Wiederholungsmessungen 2006/2007 und 2011/2012 konnte an etwa



Abb. 79: Messung von Funkwellen: Mit Hilfe einer Rahmenantenne werden die Signale von Rundfunksendern (Langwelle, Mittelwelle, Kurzwelle) erfasst.

400 der 403 Messorte wieder an derselben Position gemessen werden. Die Messergebnisse wurden in den Kategorien Mobilfunk, Hörfunk, Fernsehfunk (TV), Sonstige und BOS zusammengefasst.

Die Abb. 80 und Abb. 81 zeigen größere Veränderungen vor allem beim Mobilfunk. Während der Grenzwert an der Hälfte der Messorte (Medianwert) nur zu wenig mehr als drei Millionstel ausgeschöpft wird, liegt der Ausschöpfungsgrad an einigen wenigen Orten bei bis zu 3 Promille. Dadurch ergibt sich ein Mittelwert von etwa 50 Millionstel.

Beide Darstellungen zeigen auch, dass sich in Bayern die Mobilfunkimmissionen – auf niedrigem Niveau – innerhalb von neun Jahren etwa verfünffacht haben. Sie stellen heute die wichtigste Quelle von Hochfrequenz-Immissionen dar. Angesichts des anhaltenden Wachstums bei der mobilen Datenübertragung dürfte dieser Trend anhalten. Ferner zeigen die Abb. 80 und Abb. 81, dass BOS und sonstige Immissionen keine Rolle spielen. Die drei ausführlichen Berichte mit weiteren Ergebnissen sind im Internet abrufbar [14]].

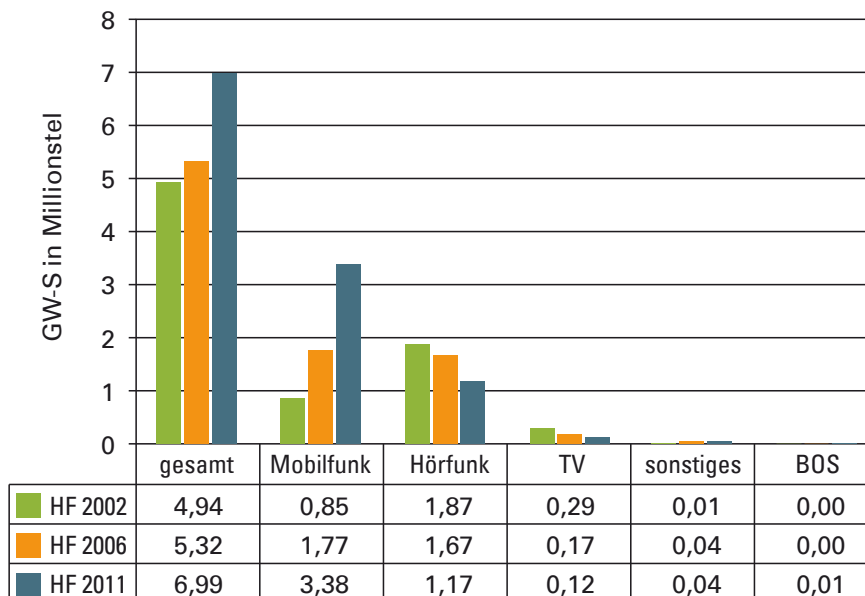


Abb. 80: Medianwerte der Hochfrequenz-Immissionen Monitoring Bayern (GW-S-Darstellung).

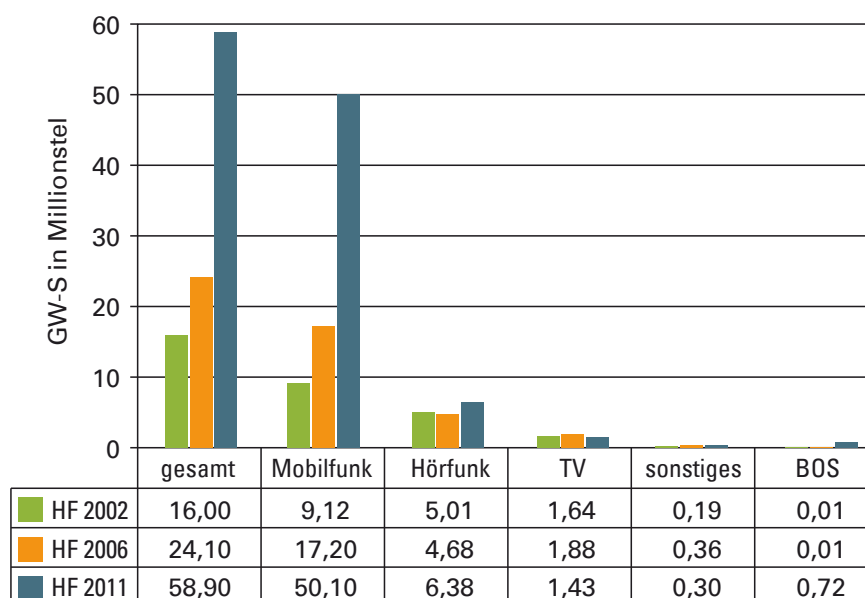


Abb. 81: Mittelwertwerte der Hochfrequenz-Immissionen Monitoring Bayern (GW-S-Darstellung).

4.10.2 BADEN-WÜRTTEMBERG

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

Die Erhebungen in vier repräsentativen Gebieten Baden-Württembergs mit insgesamt 143 Gemeinden berücksichtigten alle wesentlichen Funkanwendungen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz. Damit wurden die wichtigsten Funksendeanlagen wie Rundfunk, Fernsehen (analog und digital), Mobilfunk, Betriebsfunk, BOS-Funk, 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 der etwa ein Drittel der Bevölkerung lebt, abgedeckt werden. Im Unterschied zur bayerischen Auswertung sind die

Ergebnisse in Prozent vom Grenzwert der elektrischen Feldstärke GW-E angegeben.

In allen Untersuchungsgebieten schöpften 2009 die durchschnittlichen Einwirkungen die gesetzlichen Grenzwerte zu weniger als 1 % aus. An 8 von 900 Messpunkten war die Grenzwertausschöpfung größer als 5 %, im höchsten Fall lag der Wert bei 11 %.

In der Abb. 82 sind die festgestellten Veränderungen zwischen 2003 und 2009, differenziert nach Funkdiensten, als Mittelwert der Grenzwertausschöpfung dargestellt. Die Abnahme beim Rundfunk und Fernsehen ist in allen Gebieten deutlich zu erkennen. Dem gegenüber haben die Einwirkungen beim Mobilfunk zugenommen.

Eine ausführliche Projektbeschreibung mit weiteren Ergebnissen ist im Internet abrufbar [26]. Hier finden sich auch die detaillierten Messergebnisse für jeden einzelnen Messpunkt ausführlich dokumentiert und einsehbar.

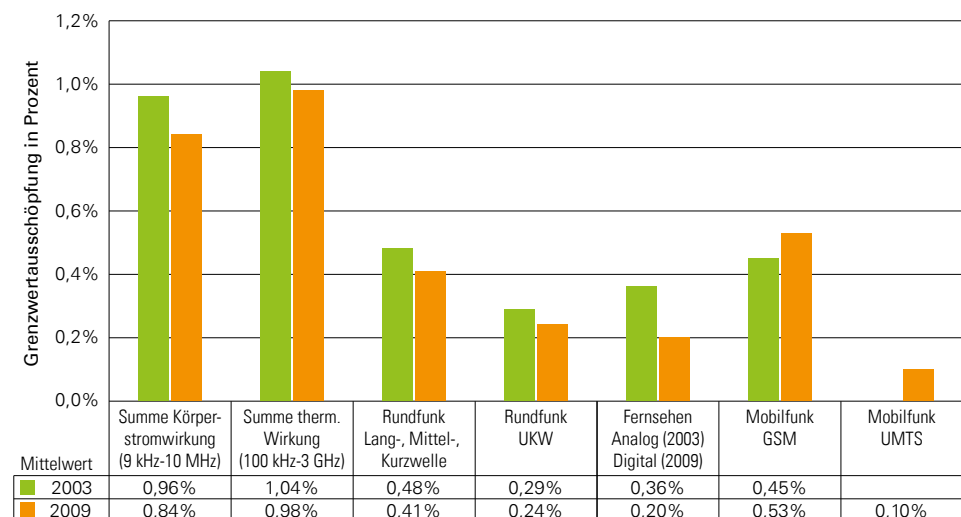


Abb. 82: Veränderungen zwischen 2003 und 2009: Vergleich der Mittelwerte der Grenzwertausschöpfung einzelner Funkdienste (GW-E-Darstellung). UMTS wurde 2003 nicht erfasst.

4.10.3 VERGLEICH DER UNTERSUCHUNGEN

Die Messprogramme in Bayern und Baden-Württemberg basieren auf unterschiedlichen statistischen Ansätzen und sind daher nicht direkt miteinander vergleichbar.

Das bayerische Monitoring 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 bzw. 600 Messpunkte gewählt. Dieser 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 bayerischen Messungen diesen Einfluss nicht so stark wider. Beim Mobilfunk liegen die Messwerte in vergleichbarer 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, z. B. Ultraviolett-, Röntgen-, oder Gammastrahlung
- Nichtionisierende Strahlung, z. B. Mikrowellen oder die niederfrequenten Magnetfelder der Stromversorgung

Ionisierende Strahlung kann Bindungen zwischen Atomen und Molekülen im Körper brechen, weil die Strahlungsenergie größer ist als die Bindungsenergie. Ionisierende Strahlung wird in dieser Broschüre nicht behandelt.

Bei nichtionisierender Strahlung ist die Strahlungsenergie immer kleiner als die Bindungsenergie. Bei Mikrowellen (Frequenzbereich um 2 GHz) ist sie z. B. um Größenordnungen niedriger als die Energie, die benötigt wird, um Wasserstoffbrückenbindungen oder Kohlenstoffbindungen zu lösen. Da jedoch im Stoffwechsel des menschlichen Körpers viele elektrische und elektrochemische Vorgänge ablaufen, etwa bei der Muskelaktivität oder Informationsübertragung zwischen Nervenzellen, können diese grundsätzlich von den eingekoppelten elektrischen Feldern moduliert werden. Für nachfolgende, direkte Reaktionen müssen jedoch Schwellenwerte überschritten werden (siehe Kap. 5.3.1 Reizwirkungen). Direkte Wirkungen können nur bei bestehender Exposition

akut auftreten; bei Abwesenheit der Felder sind sie nicht mehr vorhanden.

Nichtionisierende Strahlung kann neben den direkten auch indirekte Wirkungen auslösen. Darunter versteht man z. B. die Beeinflussung von elektronischen Implantaten wie Herzschrittmacher oder Insulinpumpen.

In der Diskussion stehen seit Jahren Auswirkungen, die durch niedrige Feldintensitäten unterhalb der Grenzwerte, aber über lange Zeiträume auf den Körper einwirken. Hier diskutiert man etwa über Krebs oder neurodegenerative Erkrankungen (siehe Kap. 5.5 Langzeitwirkungen).

Die deutschen Grenzwerte der 26. BImSchV und die Empfehlungen internationaler Organisationen stützen sich auf eine Vielzahl von Studien zu den unterschiedlichsten Fragestellungen. Dabei hat sich gezeigt, dass nur ein Teil der untersuchten Wirkungen überhaupt für den Gesundheitsschutz von Bedeutung ist, da in der Grundlagenforschung oft mit hohen Feldintensitäten mögliche Wirkmechanismen untersucht werden.

Wenn von Effekten oder Wirkungen die Rede ist, dann bedeutet dies nicht zwangsläufig eine gesundheitliche Beeinträchtigung oder gar Gefährdung. Vielmehr stellen etliche der nachfolgend beschriebenen Vorgänge natürliche Reaktionen biologischer Systeme auf bestimmte äußere Einflüsse dar. So reagiert der Körper beispiels-

weise bei erhöhter Wärmezufuhr so lange mit vermehrter Schweißabsonderung, bis sich im Körper wieder die Normaltemperatur eingestellt hat (körpereigene Thermoregulation).

Im Folgenden werden sowohl akute Wirkungen als auch Langzeitwirkungen nichtionisierender Strahlung betrachtet.

5.2 AKUTE WIRKUNGEN STATISCHER FELDER

Statische elektrische Felder können praktisch nicht in das Körperinnere vordringen und haben daher keine direkten Wirkungen auf den Menschen. Indirekte Wirkungen können jedoch an der Körperoberfläche auftreten. Bekannt ist zum einen die Kraftwirkung, die zum Aufrichten der Haare führen kann. Zum anderen können sogenannte Funkenentladungen auftreten. Dabei handelt es sich um Entladungsvorgänge ohne Berührung eines Gegenstandes. Dieses Phänomen kann bei ausreichender Stärke wahrnehmbar werden, Schmerzen verursachen oder im Extremfall weitere gesundheitliche Wirkungen nach sich ziehen. Belastbare Wirkschwellen sind nicht bekannt: Vorliegende Daten lassen keine Schlüsse zu, ab welcher Feldstärke Entladungsvorgänge im elektrischen Gleichfeld Wahrnehmungen oder Belästigungen auslösen.

Statische magnetische Felder können in den menschlichen Körper eindringen. Bei hohen Feldstärken üben diese Felder eine Kraftwirkung auf bewegte elektrische Ladungen aus. Ergebnisse biochemischer Modellsysteme weisen darauf hin, dass es bei sehr hohen Flussdichten zu einer Erhöhung der Konzentration von freien Radikalen kommt. Bisher ist jedoch nicht bekannt, ob dieser Wirkmechanismus starker magnetischer Gleichfelder im Menschen relevant werden kann.

Gesundheitliche Wirkungen von magnetischen Gleichfeldern beim Menschen wurden primär in medizinischem Bereich untersucht. Bei sehr hohen Feldstärken von über 2 T, wie sie in der Magnetresonanztomographie eingesetzt werden, ergab sich kein Hinweis auf gravierende Gesundheitseffekte. Allerdings traten bei Kopf- und Körperbewegung unangenehme sensorische Effekte wie Übelkeit und vorübergehende Leistungsminderung auf. Bei Feldstärken von bis zu 400 mT ergeben sich keine signifikanten Einflüsse magnetischer Gleichfelder auf das Herz-Kreislauf-System, auf die Hautdurchblutung, auf die akustischen und vestibulären Funktionen des Innenohrs, auf sensorische Effekte oder auf die kognitive Funktion. Internationale Grenzwertempfehlungen liegen bei 400 mT (ICNIRP 2009) bzw. 40 mT (EU Rat 1999).

Direkte gesundheitlich relevante Auswirkungen auf die Allgemeinbevölkerung durch die schwachen Magnetfelder der HGÜ sind daher nicht zu erwarten.

5.3 AKUTE WIRKUNGEN NIEDERFREQUENTER FELDER

Niederfrequente magnetische und elektrische Felder dringen mehr oder weniger tief in den Körper ein und wechselwirken dort mit dem Gewebe. Sie können auch direkt auf Sinnesrezeptoren einwirken, bei-

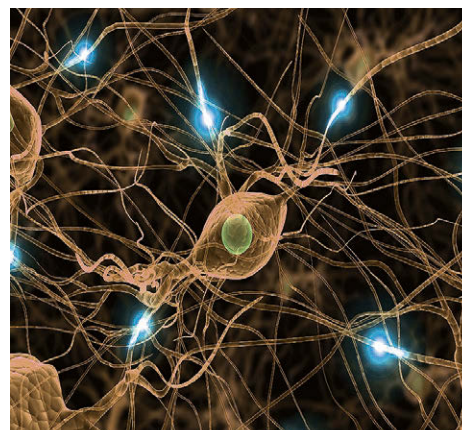


Abb. 83: Im Bereich niederfrequenter Felder dominieren Reizwirkungen auf Sinnes-, Nerven- und Muskelzellen.

spielsweise auf die der Augen oder der Haut. Die Erregung der Sinnesrezeptoren kann Reaktionen von einer harmlosen Wahrnehmung bis hin zur Schmerzempfindung hervorrufen.

Niederfrequente elektrische Felder dringen nur schlecht in den Körper ein. Die Feldstärke im Körper beträgt nur zirka ein Millionstel der Stärke des äußeren Feldes (vergleiche Tab. 8). Die Anwesenheit des Körpers bewirkt auch eine Feldverzerrung, wobei seine Ausrichtung und Erdung eine Rolle spielen. 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 fast 20-mal höher als im Brustbereich sein. Hingegen kommt es im Bereich der unteren Extremitäten zu einer Absenkung der äußeren Feldstärke.

Tab. 8: 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 bzw. Stromdichten hängt insbesondere ab von der

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

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/m²).

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 Abb. 84 stellt ein vereinfachtes Wirbelstrommodell für den Fall dar, dass ein magnetisches Wechselfeld senkrecht zur Körperachse eines Menschen steht. Im Körper wird durch die hervorgerufenen Körperströme ein schwaches, dem äußeren Feld entgegen gerichtetes Magnetfeld erzeugt (siehe Abb. 84, rote Feldlinien im Körper).

Tab. 9: 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 [mV/m]
Knochen	11,6
Haut	13,5
Lunge	8,22
Augenlinse	5,22

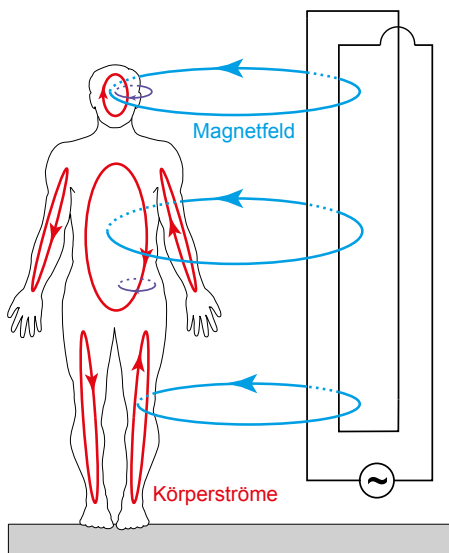


Abb. 84: Direkte Wirkung eines niederfrequenten magnetischen Wechselfeldes auf den menschlichen Körper.

5.3.1 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 Tab. 10 stellt die Wirkungen verschiedener Stromdichten am jeweiligen Wirkungsort des menschlichen Körpers für den Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 300 Hz im Überblick dar [27].

Unterhalb einer Stromdichte von 10 mA/m^2 sind nur sehr subtile Effekte bekannt. Erst oberhalb von 10 mA/m^2 nehmen die Sinnesrezeptoren der Haut oder des Sehorgans unterschiedliche Empfindungen wahr, die bei Wiederholung zu Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens führen können.

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

Die Körperstromdichte wird verwendet, um so genannte Basisgrenzwerte festzulegen (vergleiche Kapitel 6). 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 .

Tab. 10: 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

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

Die Schwellen belegter Wirkungen niederfrequenter Magnetfelder beim Menschen sind in der Abb. 85 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 Reizung der peripheren Nerven und Muskeln in den Extremitäten liegen noch mindestens um den Faktor 5 höher.

5.3.2 INDIREKTE WIRKUNGEN

In elektrisch leitfähigen Objekten wie Autos, Kränen oder Metallzäunen werden durch starke elektrische Wechselfelder Oberflächenladungen erzeugt. Diese sind umso größer, je stärker das elektrische Feld und je größer das gegenüber Erde isolierte Objekt, etwa ein 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 Abb. 86 rot eingezeichnet). Dieser Effekt, der auch durch statische Aufladung ohne Einwirkung eines elektrischen Feldes auftreten kann, ist aus dem Alltagsleben hinreichend bekannt. Ein weiteres Beispiel hierfür ist die Entladung an Türgriffen nach Begehen isolierter Bodenbeläge.

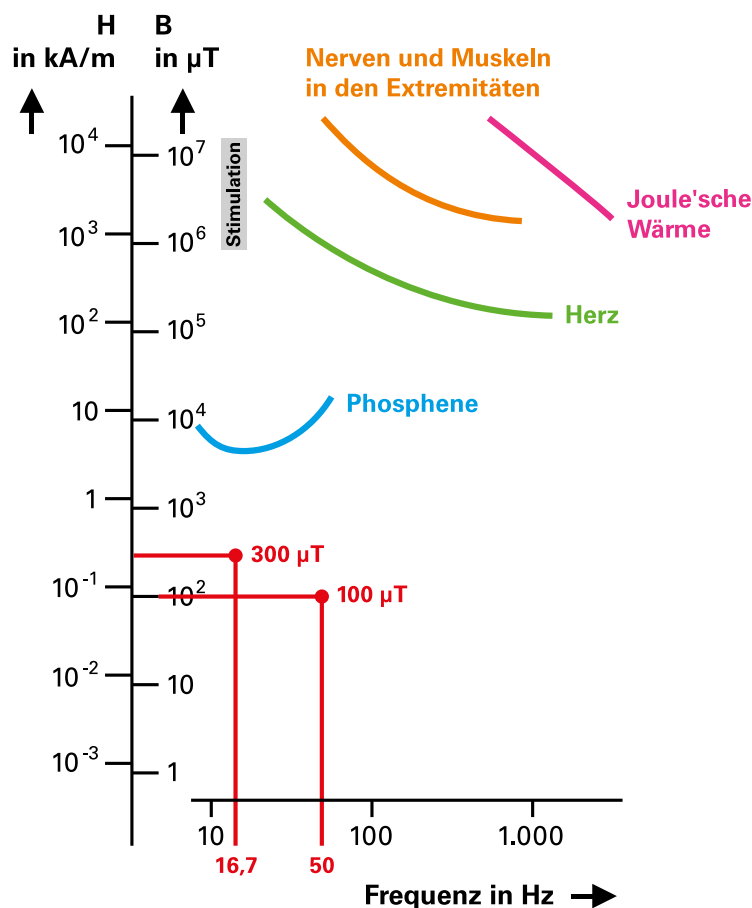


Abb. 85: Schwellen belegter Wirkungen niederfrequenter magnetischer Felder beim Menschen im Vergleich zu den Grenzwerten der 26. BImSchV (rote Punkte).

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.

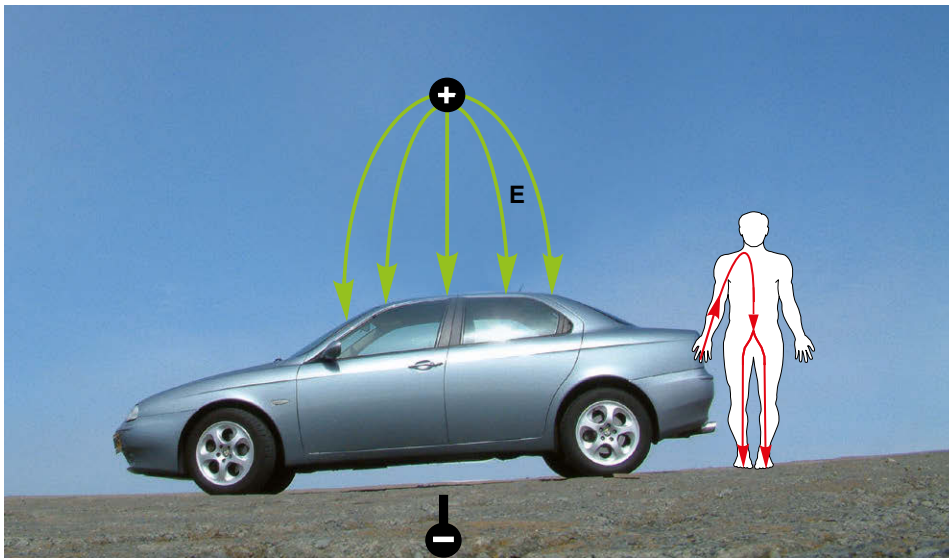


Abb. 86: Indirekte Wirkung eines elektrischen Feldes auf den Körper eines Menschen.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in der Tab. 11 zusammengefasst [28]. Bei den angegebenen Frequenzen kommt es ab den Schwellenwerten für einen Ableitstrom zu den beschriebenen Wirkungen. Daher werden diese Schwellenwerte 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 Einwirkung elektrischer oder magnetischer 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 5.7 noch gesondert eingegangen.

Tab. 11: Frequenzabhängige Schwellenwerte für die Wirkungen elektrischer Ströme in mA (Werte sind individuell verschieden, Kinder und Frauen besitzen niedrigere Wahrnehmungsschwellen)

Wirkungen	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

5.3.3 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 Mechanismen wurden unter anderem mögliche Auswirkungen auf das kardiovaskuläre System, das Immunsystem, das neuronale degenerative Geschehen und auf die Fortpflanzung und Entwicklung betrachtet.

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 [29].

5.4 AKUTE WIRKUNGEN HOCHFREQUENTER FELDER

5.4.1 WÄRMEWIRKUNG

Als Basisgröße zur 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) angegeben. 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,

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 beim 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 gesundheitlichen Beeinträchtigungen, etwa bei Fieber, vermindert sein. Ferner können Organe oder Gewebe mit geringer Wärmeleitfähigkeit und schlechter Durchblutung, zum Beispiel Auge oder Ohr, 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 $0,08 \text{ W/kg}$ 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 5.4.3 näher erläuterten 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 Exposition (Abb. 87). Sie kann um Zehnerpotenzen stärker sein als die eines Mobilfunkmastes.

Um eine übermäßige Erwärmung einzelner Körperteile zu vermeiden, insbesondere des Auges, 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 um den Faktor fünf 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 Abb. 88 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 Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM)-Phantoms, einer Kunststoffwanne mit Kopf, 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 (Abb. 89). Aus der höchsten gemessenen Feldstärke wird der SAR-Wert des Handys berechnet.

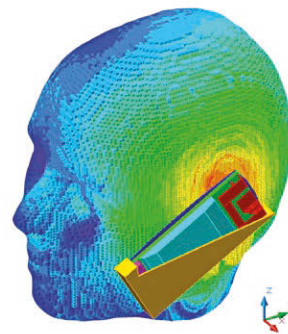
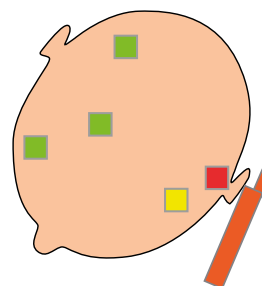


Abb. 87: Exposition des Menschen durch die hochfrequenten elektromagnetischen Felder eines Handys.



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

Abb. 88: Bestimmung des SAR-Wertes am Kopf.

Abb. 89: Messung des SAR-Werts eines Handys: Die Messsonde (schwarz) am Roboterarm (orange) ermittelt im flüssigkeitsgefüllten SAM-Phantom (weiß) den Ort der höchsten Feldstärke.



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

5.4.2 HOCHFREQUENZTHERAPIE

In der Medizin nutzt man die Hochfrequenztherapie, um durch lokale Temperaturerhöhungen 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 Frequenzen zwischen ca. 13 MHz und ca. 41 MHz. Die umgesetzte Leistung beträgt bis zu 400 W. Die periodischen Ladungs-

Abb. 90: Kurzwellentherapie (links): Hochfrequente Felder (27,12 MHz) erwärmen die behandelten Körperteile auch in der Tiefe.



Abb. 91: Mikrowellentherapie (rechts): Mikrowellen (2.450 MHz) verursachen eine oberflächennahe Erwärmung.



wechsel 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 elektromagnetischen 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.

5.4.3 ABSORPTION HOCHFREQUENTER STRAHLUNG

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,
- Leitfähigkeit des Gewebes und
- Größe der geladenen Moleküle

kann es zu Polarisierungseffekten, Orientierungsschwingungen permanenter Dipole (z. B. Wasser), Schwingungs- und Rotationsbewegungen innerhalb von Molekülen oder Verschiebung freier Ladungsträger kommen. 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. Grund ist, 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 größer als beispielsweise bei Muskelgewebe mit hohem Wassergehalt.

Die Abb. 92 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

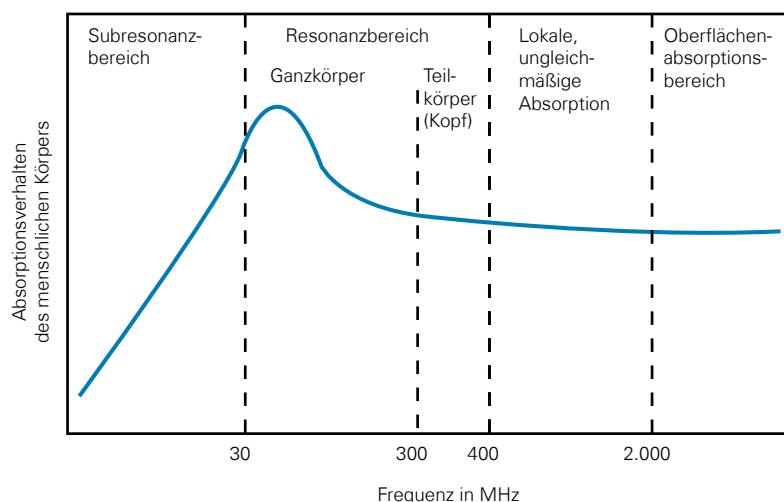


Abb. 92: Absorptionsverhalten des menschlichen Körpers (Erwachsener) in Abhängigkeit von der Frequenz.

es bei ungefähr 70 bis 100 MHz zur maximalen Absorption, da dann Körperabmessungen und Wellenlänge der Felder vergleichbar 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.

5.4.4 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 hochfrequenten Strahlung die Strahlungsenergie durch Wechselwirkungsprozesse umgewandelt, bis schließlich durch Reibungseffekte Wärme entsteht. Das bestehende Grenzwertkonzept berücksichtigt daher bereits thermische und athermische Wirkungen.

Im Deutschen Mobilfunk Forschungspro-

gramm (DMF) nahmen Untersuchungen zu den biologischen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder einen breiten Raum ein. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) schlussfolgert, dass die Ergebnisse des DMF sowie weiterer aktueller nationaler und internationaler Studien die Existenz möglicher Wirkungsmechanismen im „athermischen“ Bereich unterhalb der Grenzwerte nicht bestätigen können. Es schreibt, dass insgesamt die Ergebnisse keinen Anlass geben, die Schutzwirkung der bestehenden Grenzwerte in Zweifel zu ziehen.

Die noch verbliebenen offenen Fragen zu biologischen und gesundheitlichen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder werden weiter untersucht, ebenso mögliche Wirkungen in Frequenzbereichen, die bislang nicht für drahtlose digitale Kommunikationstechniken genutzt wurden. Detaillierte Informationen zum Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm und den einzelnen Forschungsprojekten, die im Rahmen des DMF durchgeführt wurden, finden sich in [30].

5.5 LANGZEITWIRKUNGEN

Unter Langzeitwirkungen versteht man die Spätfolgen einer lang andauernden Exposition.

Die meisten Studien zu Langzeitwirkungen nieder- und hochfrequenter Felder untersuchten einen möglichen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und Krebs. Dabei geht es entweder um seine Entstehung (Krebsinitiation) oder seine Förderung (Krebspromotion). Bis heute konnten in verschiedensten Forschungsprogrammen weltweit weder allgemein anerkannte Dosis-Wirkungs-Beziehungen noch die für eine mögliche Krebsentste-

hung 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.

5.5.1 NIEDERFREQUENTE FELDER UND KREBS

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

Für die Einstufung der verschiedensten Umweltagenzien und Chemikalien verwendet die IARC eine Skala mit fünf Stufen, die in der Tab. 12 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 Bewertung hat die WHO ein begleitendes „Fact Sheet“ mit dem Titel „Electro-

magnetic fields and public health – exposure to extremely low frequency fields“ auf ihrer Internetseite veröffentlicht, in dem u. a. auch Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise dargelegt werden [31].

Die wesentlichen Aussagen von WHO und BfS sind:

- Die neuen epidemiologischen Studien geben keinen Anlass, die Einschätzung zu ändern, dass Magnetfelder „möglicherweise kanzerogen“ sind. Allerdings ist die Aussagekraft der epidemiologischen Studien durch methodische Probleme (möglicher Selektionsbias, siehe „Fehlerquellen“ unter Abschnitt 5.8) geschwächt. 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 μT (nur etwa 1 % bis 4 % der Kinder sind über 0,3 μT expo-

Tab. 12: 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 magnetische Felder von Stromleitungen
Gruppe 3 – „nicht klassifizierbar“	ca. 500 Stoffe, z. B. Tee und Saccharine
Gruppe 4 – „für Menschen wahrscheinlich nicht krebserregend“	Caprolactam

niert). 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 erfolgt).
- Bei Langzeitwirkungen wird die Wahrscheinlichkeit eines Kausalzusammenhangs zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition als schwach angesehen. Laut 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 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 elek-

trischen 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, weiterhin Forschung zur Klärung der Datenlage durchzuführen 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.

5.5.2 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 auch 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 [32]:

■ 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.

Im Jahr 2011 hat die Internationale Krebsforschungsagentur (IARC) ihre Bewertung zu Studien veröffentlicht, in denen der Kopf Feldern beim Gebrauch von Mobil- oder Schnurlostelefonen ausgesetzt war. Sie kam dabei zur Einstufung Gruppe 2b „möglicherweise krebserregend“ der IARC-Skala (vergleiche Tab. 12).

Für den Menschen wurde ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Handyexposition und Gliomen (maligne Hirntumoren) sowie Akustikusneurinomen (Tumoren des Hörnervs) als möglich, die Evidenz für andere Tumorarten als unzureichend eingeschätzt. Im Gegensatz dazu wurden die vorliegenden epidemiologischen Studien zu beruflich exponierten Personen von der IARC-Arbeitsgruppe als methodisch eingeschränkt und ihre Ergebnisse als inkonsistent bewertet. Ein Zusammenhang zwischen umwelt-relevanter Exposition (zum Beispiel in der Umgebung von Basisstationen) und Krebs wurde als unzureichend eingestuft. Zu den zahlreichen nicht für die Klassifizierung he-

rangezogenen Studien zählen Untersuchungen zu anderen Hirntumoren, Leukämie, Lymphomen, Aderhauttumoren, Hoden-, Brust-, Lungen- und Hautkrebs.

In ergänzend betrachteten tierexperimentellen Studien wurde in einer von sieben Langzeitstudien eine erhöhte Anzahl an Tumoren festgestellt. Bei genetisch veränderten beziehungsweise krebsempfindlichen Tiermodellen zeigte sich eine erhöhte Inzidenz in zwei von 12 Studien und eine krebserregende Wirkung in einer von 18 Studien.

Das BfS führt auf Grund seiner Gesamtbewertung und unter Berücksichtigung der Ergebnisse des DMF aus, dass nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand die aktuellen Grenzwerte ausreichen (Stand September 2014). Da aber nach wie vor Unsicherheiten in der Risikobewertung bestehen, hält es einen vorbeugenden Gesundheitsschutz weiterhin für erforderlich. Für eine abschließende Bewertung möglichen Krebsgeschehens sieht es noch weiteren Forschungsbedarf.

5.5.3 WEITERE LANGZEITWIRKUNGEN HOCHFREQUENTER FELDER

Die Ergebnisse des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms unter Berücksichtigung des neuen internationalen Wissensstandes wurden 2011 von der Strahlenschutzkommission [33] bewertet:

■ Blut-Hirn-Schranke (BHS): Die Projekte im Rahmen des DMF haben auch mit neuen methodischen Ansätzen keine Effekte auf die BHS gefunden. Insgesamt gibt es keine ausreichende Evidenz für eine Beeinflussung der BHS durch Mobilfunkexpositionen im Bereich der Grenzwerte. Es ergibt sich daher zu dieser Frage kein weiterer Forschungsbedarf.

- **Neurophysiologische und kognitive Prozesse, Schlaf:** Mit Hilfe verschiedener methodischer Ansätze konnte eine Beeinflussung von Hör- oder Sehvermögen, insbesondere die Auslösung von Tinnitus, durch Mobilfunkfelder weitgehend ausgeschlossen werden. Epidemiologische und Feld-Studien zeigen übereinstimmend keine Beeinflussung des Schlafverhaltens. Untersuchungen an Probanden im Labor zur Beeinflussung der Gehirnaktivität zeigen inkonsistente Ergebnisse. Eine abschließende Wertung im Hinblick auf Effekte auf das Schlaf-EEG sowie das Ruhe-EEG im Wachzustand ist derzeit noch nicht möglich. Zur Abklärung besteht daher Bedarf an einer Multicenter-Studie, in der Arbeitsgruppen aus unterschiedlichen Laboren mit dem selbem experimentellen Ansatz einer Fragestellung nachgehen. Dabei sollten auch mehrere verschiedene Zielgruppen betrachtet werden. Hierbei könnten gleichzeitig auch die von der WHO priorisierten Untersuchungen zum möglichen Einfluss elektromagnetischer Felder auf pathologische Altersveränderungen des Gehirns (2010, Deventer et al. 2011) einbezogen werden.
- **Blut und Immunsystem:** Die Ergebnisse des DMF erlauben in Übereinstimmung mit den Arbeiten anderer Autoren den Schluss, dass Mobilfunkfelder keinen Einfluss auf das Immunsystem haben. Effekte von Mobilfunkfeldern auf verschiedene Blutparameter (z. B. Reticulozyten, „Geldrolleneffekt“), etwa vor und nach Errichtung einer Mobilfunk-Basisstation, sind spekulativ und basieren nicht auf einem validierten diagnostischen Ansatz.
- **Reproduktion und Entwicklung:** Die Untersuchungen im Rahmen des DMF lassen es als sehr unwahrscheinlich erscheinen, dass durch Mobilfunkexpositionen bis zu den Grenzwerten negative Auswirkungen auf Reproduktion und Entwicklung zu erwarten sind. Die SSK sieht in diesem Bereich keinen aktuellen Forschungsbedarf.
- **Mobilfunk und Kinder:** Als Ergebnis epidemiologischer Studien haben sich Hinweise auf einen Zusammenhang von Gesundheitseffekten bei Kindern und Jugendlichen und Mobilfunkexposition deutlich abgeschwächt. Die SSK weist allerdings darauf hin, dass bei dosimetrischen Untersuchungen bei Kindern der bisher zu Grunde gelegte Zusammenhang von Basisgrenzwerten und Referenzwerten bei Frequenzen um etwa 100 MHz und im Bereich 1 bis 4 GHz inkonsistent ist. Daraus folgt, dass nicht mehr generell angenommen werden kann, dass bei Einhaltung des Referenzwertes auch der Basisgrenzwert eingehalten wird. Berechnungen der Exposition von Kinderköpfen durch Mobiltelefone haben im Vergleich zu Erwachsenen quantitative Unterschiede in der SAR-Verteilung gezeigt. Eine Untersuchung der gesundheitlichen Relevanz dieser Ergebnisse steht noch aus. Über die Studien bezüglich Kindern und Jugendlichen hinaus, welche unter anderem auf Basis der WHO-Empfehlungen 2010 initiiert wurden, sieht die SSK aktuell keinen weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

5.6 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 Zuordnung von Symptomen zu bestimmten 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; die darin gemachten Aussagen sind auch im Lichte neuerer Studien immer noch gültig. Darin heißt es [34]:

- 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 Elektro-

sensibilität und es gibt auch keine wissenschaftliche Basis, um die Symptome mit der Einwirkung elektromagnetischer 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 doppelblinde Untersuchungen zu Befindlichkeitsbeeinträchtigungen durchgeführt. Im Abschlussbericht vom Mai 2008 zieht das BfS folgendes Fazit [32]:

- 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 Allgemeinbevölkerung 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.

Die Strahlenschutzkommission schreibt 2012 (Biologische Auswirkungen des Mobilfunks, Stellungnahme der SSK 38) [33]: „In der Zusammenschau mit der internationalen Literatur kann der Schluss gezogen werden, dass ‚Elektrosensibilität‘ im Sinne eines ursächlichen Zusammenhangs mit der Exposition durch EMF mit großer Wahrscheinlichkeit nicht existiert. Weitere Forschung sollte daher in einem Themenkreis außerhalb der EMF-Forschung erfolgen.“

5.7 BEEINTRÄCHTIGUNGEN BEI IMPLANTATEN UND KÖRPERHILFEN

Implantate und Körperhilfen werden teils aus Kunststoff (etwa künstliche Herzklappen), teils aus Metall oder Keramik (künstliche Gelenke) oder auch aus einer Kombination dieser Materialien 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 wäh-

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

Träger passiver 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 werden derzeit jedes Jahr ca. 100.000 Herzschrittmacher neu implantiert. Daher dient der Herzschrittmacher hier als Beispiel für mögliche Wechselwirkungen von elektromagnetischen Feldern mit aktiven Implantaten. Es ist auf andere aktive Implantate übertragbar.

Der eigentliche Schrittmacher wird entweder im Bereich des Schlüsselbeins oder der Leiste implantiert. Zum Herzen führt eine isolierte Zuleitung mit einer Elektrode (siehe Abb. 93).

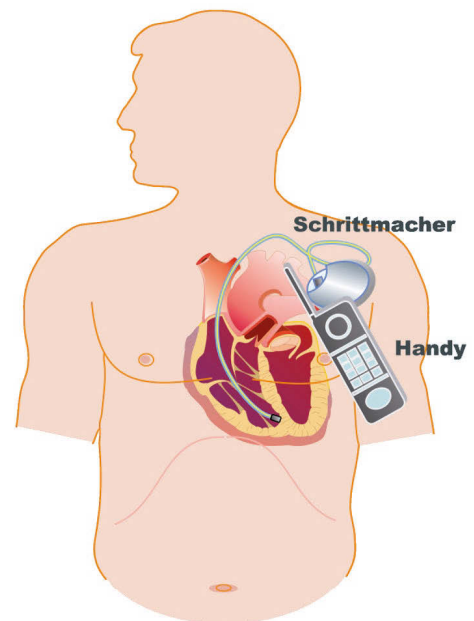


Abb. 93: Indirekte Wirkung eines elektrischen Feldes auf den Körper eines Menschen.

Die kritischste Einkopplung der elektromagnetischen Felder erfolgt in der Zuleitung. Beim Überschreiten einer frequenz-, modulations- und herzschríttmacherabhängigen Schwelle kommt es zur Beeinflussung der Funktion des Geräts. 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 Situationen 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-Höchstspannungsfreileitung,
- im Überwachungsbereich von Artikelsicherungsanlagen und Metalldetektoren,
- bei der körpernahen Verwendung von Geräten mit starken Motoren (z. B. Bohrmaschine) oder
- in statischen Magnetfeldern über 500 μ T.

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- 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.

Bei speziellen Fragen sollte der behandelnde Kardiologe um Rat gefragt werden.

In Krankenhäusern gab es in den letzten Jahren immer wieder Diskussionen darüber, inwieweit 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 [35]. 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.

Viele Kliniken 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.

5.8 GRUNDSÄTZLICHES ZUR BEWERTUNG WISSENSCHAFTLICHER STUDIEN

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.

Sowohl das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) als auch die LUBW haben in den Broschüren [36] und [37] Grundsätzliches zur Bewertung wissenschaftlicher Studien zusammengestellt. Die Ausführungen des LGL dazu werden im Folgenden nochmals wiedergegeben:

Für eine ausreichende Qualität sind Mindestanforderungen an Objektivität, Validität, Plausibilität, Reproduzierbarkeit und Statistik zu erfüllen. Eine genaue Dosimetrie

und Expositionsangaben für das untersuchte biologische Objekt (z. B. Zelle, Tier oder Mensch) sind für eine Bewertung absolut notwendig. In sehr vielen Experimenten und besonders bei bevölkerungsbezogenen Studien ist die unzureichende Dosimetrie der methodische Schwachpunkt.

Ein wichtiger Anhaltspunkt für die Güte eines Forschungsberichtes ist auch, ob die Arbeit in einer anerkannten Fachzeitschrift publiziert wurde, die einem Begutachtungsverfahren durch andere Wissenschaftler (peer-review) unterliegt.

Wenn ein Mensch elektromagnetischen Feldern ausgesetzt ist, unterscheidet man zwischen rein physikalischen Einwirkungen (z. B. Kräfte auf elektrische Ladungen), physiologischen Effekten (z. B. Temperaturerhöhung), aktiven biologischen Reaktionen (z. B. thermoregulatorische Vorgänge) und gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Eine gesundheitliche Beeinträchtigung setzt immer eine biologische Reaktion voraus, der ein Effekt infolge einer physikalischen Einwirkung vorausgeht. Andererseits müssen Effekte oder biologische Reaktionen nicht zwingend eine Gesundheitsbeeinträchtigung zur Folge haben.

Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) ist ein unabhängiges Expertengremium, das den Bundesumweltminister berät. Sie verwendet für die Einstufung von biologischen Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen mit abnehmender Evidenz die drei Kategorien „wissenschaftlicher Nachweis“, „Verdacht“ und „Hinweis“. In ihrer Empfehlung [38] hat die SSK diese Kriterien nochmals weiter entwickelt. Liegen beispielsweise positive Ergebnisse nur aus Einzelstudien vor, so werden diese in der Regel als Hinweise eingestuft. Einzeleffekte können nicht die Grundlage einer Grenz-

wertfindung bilden. In der Presse und Öffentlichkeit werden solche neuen Einzelbefunde oft unkritisch zitiert und als Beweis für einen Zusammenhang dargestellt. Als wissenschaftlich nachgewiesen gilt eine feldbedingte Reaktion aber erst, wenn voneinander unabhängige Forschergruppen das Ergebnis reproduzieren konnten und das wissenschaftliche Gesamtbild das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs stützt.

Zu diesem Gesamtbild gehören neben Laborexperimenten mit Zellen und Tieren auch epidemiologische Untersuchungen. Hierbei werden mit Hilfe statistischer Verfahren Zusammenhänge zwischen einer Exposition und einem Gesundheitseffekt hergestellt. Daraus wird dann ein Risiko abgeleitet. Ein statistisch berechnetes Risiko bedeutet jedoch nicht zwingend, dass der Zusammenhang auch kausal ist. Dazu müssen erst noch die möglichen methodischen Schwächen der epidemiologischen Studie abgeschätzt werden. Weiterhin muss eine biologische Plausibilität aus kontrollierten Laborversuchen vorliegen.

Fehlerquellen epidemiologischer Studien können sein: Systematische Fehler durch Störgrößen (sogenannte Confounder, die das Ergebnis der untersuchten Größe überdecken oder verstärken können), Selektionsbias (z. B. Fall- und Kontrollkollektiv sind für die Fragestellung zu unterschiedlich) und Informationsbias (Recallbias: z. B. Betroffene berichten retrospektiv anders über mögliche Einflussfaktoren als gesunde Kontrollpersonen). Ferner ist bei retrospektiven Expositionsabschätzungen eine fehlerhafte Klassifizierung nie auszuschließen.

Nicht zu vernachlässigen ist auch der so genannte Publikationsbias. Einzelstudien, die einen feldbedingten Effekt aufgezeigt haben, werden eher bei einem Fachjournal eingereicht als Studien mit einem Null-Effekt. Wenn das der Fall ist, spiegelt die veröffentlichte Datenbasis nicht das wissenschaftliche Gesamtbild wider.

Eine zusammenfassende Bewertung wissenschaftlicher Studien zu Mobilfunk und Gesundheit wird von Expertengremien regelmäßig durchgeführt, wobei auf eine interdisziplinäre Zusammensetzung geachtet wird. Auf nationaler Ebene tun dies z. B. die SSK, NRPB (National Radiation Protection Board; britische Strahlenschutzkommission; jetzt: Public Health England); das SSI (Statens Stralskyddsinstitut; schwedische Strahlenschutzbehörde) oder der NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements; US-amerikanischer Strahlenschutzrat).

Auf internationaler Ebene sind hier vor allem die ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; internationale, unabhängige Organisation), die WHO und IARC (International Agency for Research on Cancer; Krebsforschungsinstitut, Teil der WHO) zu nennen.

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. Als unabhängige wissenschaftliche Organisation erarbeitet ICNIRP fortlaufend Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern, die auf einer regelmäßigen Begutachtung aktueller wissenschaftlicher Literatur basieren.

Diese Vorschläge wurden nach und nach von Gesetzgebern auf internationaler und nationaler Ebene aufgegriffen und als Basis im eigenen Geltungsbereich eingeführt. In Deutschland wurde die Verordnung über elektromagnetische Felder zuletzt 2013 überarbeitet [39]. Im Bereich der Stimulationswirkungen (Frequenzbereich bis 10 MHz) erfolgte eine deutliche Erweiterung und Anpassung an die aktuellen ICNIRP-Empfehlungen aus dem Jahr 2010. Die Grenzwerte werden von der Strahlenschutzkommission (SSK) durch regelmäßi-

ge Neubewertung der Literatur überprüft. Ihre Schutzwirkung wurde durch das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm des Bundesamts für Strahlenschutz für den Bereich des Mobilfunks bestätigt [40].

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

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

Eine messtechnische Überprüfung der Basisgrenzwerte ist in der Regel nicht möglich, da Feldstärken oder Leistungsdichten nur außerhalb des Körpers gemessen werden können. Daher werden **abgeleitete Grenzwerte** (Referenzwerte) festgelegt, die einer Messung zugänglich sind. Messbare Größen sind zum Beispiel die elektrische Feldstärke in V/m , die magnetische Flussdichte in μT und die Leistungsdichte in mW/m^2 . Bei Einhaltung der Referenzwerte sind auch die Basisgrenzwerte eingehalten.

6.1 REGELUNGEN IN DEUTSCHLAND

Der Schutz der Allgemeinheit vor elektromagnetischen Feldern ist in Deutschland gesetzlich geregelt. Erstmals wurde 1996 auf der Grundlage von § 23 Abs. 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes die Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) erlassen. Die darin festgelegten Grenzwerte basieren auf den international anerkannten Empfehlungen der ICNIRP und der SSK. Im Jahre 2013 wurde die Verordnung novelliert. Sie definiert Grenzwerte nun für den gesamten Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz und enthält Vorgaben für die Errichtung und den Betrieb ortsfester Gleichstrom-, Niederfrequenz- und Hochfrequenzanlagen. Alle Grenzwerte sind bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung einzuhalten.

Unter Niederfrequenzanlagen versteht die Verordnung ortsfeste Anlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität mit einer Nennspannung von 1.000 V oder mehr. Auch Bahnstromfern- und Bahnstromoberleitungen und sonstige vergleichbare Anlagen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 9 kHz gehören dazu.

Im Niederfrequenzbereich waren bislang nur die Frequenzen 16,7 Hz und 50 Hz berücksichtigt, oberhalb existierten Grenzwerte erst im Hochfrequenzbereich ab

10 MHz. Diese Lücken wurden geschlossen. Für Niederfrequenzanlagen sind die Grenzwerte an allen Orten anzuwenden, die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind.

Wie bisher bestehen getrennte Grenzwerte für magnetische und elektrische Felder. Im Hinblick auf den Ausbau der Stromnetze wurde zusätzlich ein Grenzwert für magnetische Gleichfelder eingeführt. Bei Gleichstromanlagen gelten die Vorgaben der 26. BImSchV für alle ortsfesten Anlagen zur Fortleitung, Umspannung und Umrichtung von Gleichstrom mit einer Nennspannung von 2.000 Volt oder mehr.

Die 26. BImSchV gilt für alle ortsfesten Hochfrequenzanlagen, die im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz elektromagnetische Felder erzeugen. Die Grenzwerte für Hochfrequenzfelder gelten, wenn die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) einer einzelnen Anlage oder die Gesamtstrahlungsleistung durch alle Anlagen an einem Standort 10 Watt oder mehr erreicht. Hochfrequenzanlagen mit einer Strahlungsleistung kleiner oder gleich 100 mW (EIRP) bleiben bei der Ermittlung der Gesamtstrahlungsleistung unberücksichtigt. Ausgenommen sind militärische Anlagen zur Erzeugung breitbandiger elektromagnetischer Impulse.

Tab. 13: Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen gemäß 26. BImSchV

Frequenz in Hz	Elektrische Feldstärke in kV/m	Magnetische Flussdichte in μT
0	-	500
1 bis 8	5	$40.000/f^2$
8 bis 25	5	$5.000/f$
25 bis 50	5	200
50 bis 400	$250/f$	200
400 bis 3.000	$250/f$	$80.000/f$
3.000 bis 10.000.000	0,083	27

Tab. 14: Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen gemäß 26. BImSchV

Frequenz in MHz	Elektrische Feldstärke in V/m	Magnetische Feldstärke in A/m
0,1 bis 1*	87	0,73/f
1 bis 10	$87/\sqrt{f^{1/2}}$	0,73/f
10 bis 400	28	0,073
400 bis 2.000**	$1,375 \times \sqrt{f^{1/2}}$	$0,0037 \times \sqrt{f^{1/2}}$
2.000 bis 300.000**	61	0,16

* Anlagen, die im Frequenzbereich von 100 kHz – 10 MHz senden (Mittel und Kurzwelle), müssen sowohl die momentanen Effektivfeldstärken (Grenzwerte für die Reizwirkung) als auch die über 6 Minuten gemittelten Immissionen (thermische Wirkung) einhalten.

** Für gepulste Aussendungen (z. B. RADAR) gelten zusätzliche Bedingungen

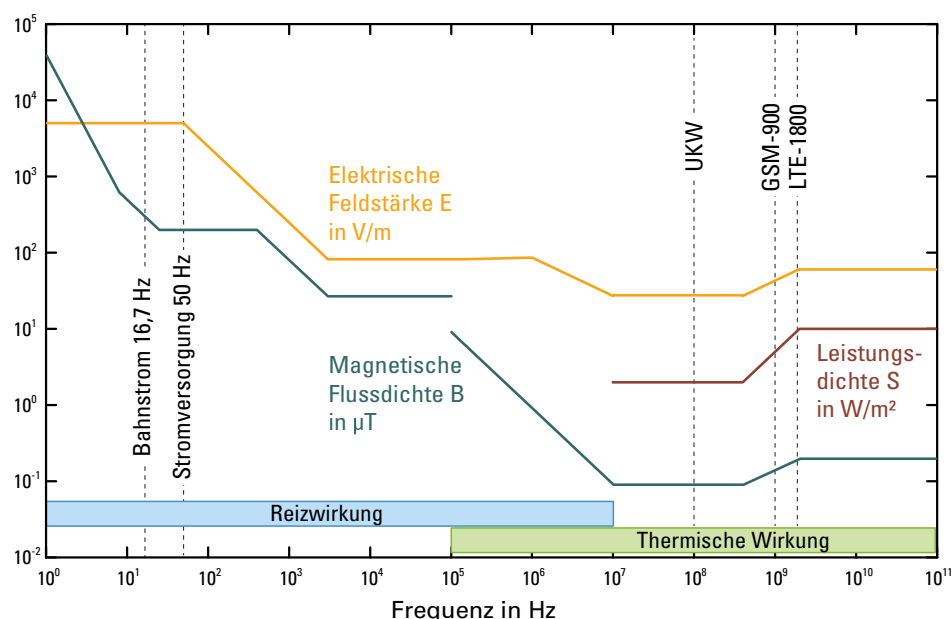
Dabei handelt es sich um Anlagen, die starke elektromagnetische Pulse erzeugen, mit denen die elektromagnetische Verträglichkeit militärischer Ausrüstung überprüft wird oder die zur Beeinflussung elektrischer Geräte dienen. Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) hat Bestimmungen der 26. BImSchV in Form von Durchführungshinweisen näher konkretisiert.

Zur Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV im Hochfrequenzbereich bestehen zusätzliche Regelungen für ortsfeste Funkanlagen in der „Verordnung über

das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder“ (BEMFV). Diese Rechtsvorschrift ist Grundlage für die Anlagengenehmigung nach Telekommunikationsrecht. Voraussetzung für die Genehmigung ist eine Standortbescheinigung. Die Zuständigkeit liegt bei der Bundesnetzagentur.

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

Abb. 94: Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 1 Hz bis 100 GHz für die Allgemeinbevölkerung in Deutschland (ungestörte Effektivwerte). Die Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen oberhalb 0,1 MHz sind hier als magnetische Flussdichte dargestellt.



Standortbescheinigung ausgewiesen. Beim Mobilfunk liegen typische Sicherheitsabstände im Bereich weniger Meter, beim Rundfunk bei bis zu einigen hundert Metern. Im Bereich außerhalb des Sicherheitsabstandes ist die Einhaltung der Grenzwerte sichergestellt.

Im Hochfrequenzbereich ist der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Leistungsdichte quadratisch. Zu den Grenzwerten der 26. BImSchV, die in Feldstärkeeinheiten angegeben sind, gibt es daher korrespondierende Grenzwerte für die Leistungsdichte. Man kann Messwerte auf die Grenzwerte der Feldstärke oder der Leistungsdichte beziehen. So bedeutet GW-E die Grenzwertausschöpfung für die elektrische Feldstärke. Analog spricht man von Grenzwertausschöpfung GW-S, wenn die Leistungsdichte verwendet wird.

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 [41]. Da beruflich exponierte Personen in der Regel unter kontrollierbaren Bedingungen und in einem begrenzten Zeitraum elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind, liegen hier die Grenzwerte höher (siehe auch Abschnitt 6.2).

6.2 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 [42].

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 wurden von der ICNIRP und der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) als Basisgrenzwerte für beruflich exponierte Personen $10 A/m^2$ und für die Allgemeinbevölkerung $2 A/m^2$ (siehe Tab. 15) 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 $0,4 W/kg$ und ein Teilkörper SAR-Wert von $10 W/kg$ (gemittelt über $10 g$ Gewebemasse) angegeben. Für die Allgemeinbevölkerung werden ein Ganz-

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

körper-SAR-Wert von 0,08 W/kg und ein Teilkörper-SAR-Wert von 2 W/kg für Kopf und Rumpf bzw. 4 W/kg bei Gliedmaßen empfohlen (siehe Tab. 15).

Die höheren Grenzwerte für die Exposition am Arbeitsplatz resultieren daraus, dass beruflich exponierte Personengruppen 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. Auf der Grundlage von Basiswerten wurden die Referenzwerte so festgelegt, dass selbst unter ungünstigsten Expositionsbedingungen die Schwellen biologischer Wirkungen nicht erreicht werden.

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 maximale Kopplung des Feldes im exponierten menschlichen Körper ermittelt. Die Abb. 94 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 .

Tab. 15: 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 Ganz- körper- SAR in W/kg	Lokale SAR (Kopf, Rumpf) in W/kg	Lokale SAR (Gliedmaßen) in W/kg	Leistungs- dichte 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

6.3 SITUATION IN EUROPA

In 25 Mitgliedstaaten der europäischen Union gibt es normative Regelungen zum Schutz der Allgemeinheit vor elektromagnetischen Feldern. 21 Mitgliedsstaaten haben gesetzliche Regelungen getroffen, die übrigen vier Staaten Verwaltungsvorschriften und technische Standards erlassen.

Im Niederfrequenzbereich beziehen sich 14 Mitgliedsstaaten auf die Grenzwertempfehlungen der EU Ratsempfehlung 1999/519/EG. In sechs Mitgliedsstaaten existieren Vorgaben nur für die Frequenz von 50 Hz bzw. für ein Frequenzband von 0 Hz bis 1 kHz (Polen). In Dänemark, Bulgarien, Irland und Spanien ist der Niederfrequenzbereich nicht oder nur teilweise durch normative Vorgaben geregelt [43]. In Deutschland orientieren sich die Grenzwerte der 26. BImSchV an den aktuellen ICNIRP Empfehlungen aus dem Jahr 2010, sie regeln den gesamten Frequenzbereich von 0 Hz bis 10 MHz lückenlos.

Beschränkt man sich bei einem Vergleich auf die technisch wichtigste Frequenz von 50 Hz, so liegen die Grenzwerte für die magnetische Flussdichte in 15 Mitgliedsstaaten, darunter in Deutschland, bei einem Grenzwert von $100 \mu\text{T}$. Zwei Mitgliedsstaaten haben einen höheren Grenzwert, zwei einen weniger strengen. Mehrstufige Vorgaben verwenden vier Staaten. Bei den elektrischen Feldstärken ist in 15 der 28 Mitgliedsstaaten die Grenzwertempfehlung von 5 kV/m der EU-Ratsempfehlung umgesetzt. In einem Mitgliedsstaat gelten strengere Vorgaben, in zwei weniger strenge (Niederlande und Lettland).

Fünf Länder besitzen abgestufte Vorgaben für bestimmte Orte wie Schulen oder Kindergärten, weitere zwei Mitgliedsstaaten treffen keine Regelungen.

Statische Magnetfelder sind in 15 der 28 Länder geregelt, wobei 13 Länder der EU Ratsempfehlung folgen und nur 2 Länder – Deutschland und Polen – eigene strenge Grenzwerte spezifiziert haben. Für statische elektrische Gleichfelder existieren nur in Lettland und Polen gesetzliche Grenzwerte.

Der Hochfrequenzbereich von 10 kHz bis 300 GHz wird von 25 der 28 Mitgliedsländer lückenlos geregelt. Den Vorgaben der EU-Ratsempfehlung folgen 10 Länder, unter anderem auch Deutschland. In 5 Ländern der EU kommen niedrigere Grenzwerte zum Tragen. 4 Länder – Italien und Kroatien – wenden ein abgestuftes Grenzwertsystem mit niedrigeren Grenzwerten für eine bestimmte Gebietsklassifizierung an [43].

Dieses Prinzip entspricht dem Grenzwertmodell unseres Nachbarlandes Schweiz. Dort 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 [44]. Es ist anzumerken, dass auch in Deutschland an den meisten Orten die Schweizer Anlagegrenzwerte eingehalten werden (vergleiche auch Kapitel 4).



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/DVB-T2	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 → 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 Studie	Studie, 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 herangezogen wird (z. B. Halbwellendipol).
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 1.800 MHz (GSM-1800), in den USA u. a. bei 1.900 MHz (GSM-1900).
GIL	Gasisolierter Leiter
H	→ 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 → 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 Wissenschaftlern 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 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)
Leistungsdichte	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
SAM	Specific Anthropomorphic Mannequin
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.

StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
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 Nahverkehrsbetrieben 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
1.000.000.000.000.000	10^{15}	Peta	P
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 > Zentrum > Departments > Department 2: Geophysik > Sektion 2.3 Erdmagnetfeld
- [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 > Suche: „Zugvögel können Magnetfeld der Erde sehen“ vom 21.09.2004
- [4] Freies Netzwerk Blitzortung
<http://de.blitzortung.org>
BLIDS – Der Blitz Informationsdienst von Siemens
www.blids.de > BLIDS > Blitze in Zahlen

II KAPITEL 3

NIEDERFREQUENTE UND STATISCHE FELDER

- [5] 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 (bis 2008) > Forschungsberichte > Forschungsberichte 1998 > Fb 800
- [6] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt: Magnetfelder von Fahrleitungen
www.bafu.admin.ch > Themen > Elektromog > Fachinformationen > Elektromog-Quellen > Eisenbahn
- [7] 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 und niederfrequente Felder > Anwendung/Vorkommen > Feldbelastung im Alltag
- [8] Bundesamt für Strahlenschutz: Andere Anwendungen elektromagnetischer Felder
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Statische und niederfrequente Felder > Anwendung / Vorkommen > Andere Anwendungen
- [9] Strahlenschutzkommission: Moderne Lichtquellen, BANz November 2011
www.ssk.de > Beratungsergebnisse > Optische Strahlung > suchen bei 2010

- [10] Schweizerisches Bundesamt für Gesundheit (BAG): Induktionskochherd
www.bag.admin.ch > Themen > Mensch & Gesundheit > Strahlung, Radioaktivität & Schall > Elektromagnetische Felder (EMF), UV, Laser und Licht > Elektromagnetische Felder > EMF Faktenblätter > Haushalt > Induktionskochherd

II KAPITEL 4

HOCHFREQUENTE FELDER

- [11] Bundesnetzagentur: Funkanlagenstandorte
www.bundesnetzagentur.de > Telekommunikation > Verbraucher > Elektromagnetische Felder
- [12] Bundesnetzagentur: Jahresberichte
www.bundesnetzagentur.de
- [13] Informationen zu SAR-Werten von Handys: Bundesamt für Strahlenschutz
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Strahlenschutz beim Mobilfunk > Schutz > Vorsorge
- [14] Bayerisches Landesamt für Umwelt: EMF-Monitoring
www.lfu.bayern.de/strahlung/emf_monitoring
- [15] DVB-T – Das Überallfernsehen
www.ueberallfernsehen.de
- [16] 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 > Veröffentlichungen > Publikationen > Suche nach Publikationen > im Suchfeld „TETRA“ eingeben
- [17] Bundesministerium des Innern: BOS-Funkrichtlinie „Bestimmungen für Frequenz-zuteilungen zur Nutzung für das Betreiben von Funkanlagen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) – BOS-Funkrichtlinie – “ (07.09.2009)
www.bdbos.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Gesetzestexte/BOS-Funkrichtlinie.html
- [18] Bundesamt für Strahlenschutz: Untersuchungen zu Fragen der gesundheitlichen Wirkungen von TETRA
www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/anwendung/bos/untersuchungen-tetra.html
- [19] 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.sisby.de > Standortinfos > Infrastruktur > Breitband > LTE > Studie Strahlenbelastung
- [20] Bundesnetzagentur: Amateurfunk
www.bundesnetzagentur.de > Telekommunikation > Unternehmen/Institutionen > Frequenzen > Spezielle Anwendungen > Amateurfunk, Statistiken zum Thema Amateurfunk
- [21] Bundesnetzagentur: Amateurfunk
http://emf3.bundesnetzagentur.de/tech_afu.html
- [22] Bundesamt für Strahlenschutz: Warensicherungsanlagen

- www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Statische und niederfrequente Felder > Anwendung/Vorkommen > Warensicherungsanlagen
- [23] Deutsches Mobilfunk-Forschungsprogramm (DMF): „Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro“ (07/2005)
www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/dosimetrie/dosimetrie_abges/dosi_030.html
- [24] Bundesamt für Strahlenschutz: Schnurlose Festnetztelefone
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > Hochfrequente Felder > Anwendungen hochfrequenter Felder > Schnurlose Festnetztelefone
- [25] Portal golem.de: „Classic, Smart und Smart Ready – Warum Bluetooth nicht gleich Bluetooth ist“ (1/2014)
www.golem.de/ticker > im Suchfeld eingeben: classic smart ready
- [26] 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

- [27] UNEP/WHO/IRPA, Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields, Geneva 1987
www.who.int/emf > Reseach > Health risk assessment > Seite 3
- [28] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74(4) 494-522, 1998.
www.icnirp.org > Publications > Filter bei Publications nach Guidelines > suche unten bei 1989
- [29] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Gesundheitliche Aspekte niederfrequenter Felder (2007) „Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria Monograph No. 238“,
www.who.int/emf > EMF publications & information resources > WHO Environmental Health Criteria monographs
- [30] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
 Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF)
www.emf-forschungsprogramm.de (Stand November 2008)
- [31] 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
- [32] 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.
www.emf-forschungsprogramm.de > Abschluss > Abschlussbericht

- [33] Strahlenschutzkommission: Biologische Auswirkungen des Mobilfunks, verabschiedet in der 250. Sitzung der SSK am 29./30. September 2011, Veröffentlicht im BANz AT 12.06.2012 B5;
www.ssk.de > Beratungsergebnisse > Elektromagnetische Felder > suchen bei 2011
- [34] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Elektrosensibilität
 „Electromagnetic hypersensitivity - Fact Sheet N°296“ (2005)
www.who.int/emf > EMF publications & information resources > Fact Sheets and archives
- [35] Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM):
 Mobilfunk in Krankenhäusern „Nutzung von Mobilfunktechnik in medizinischen Einrichtungen“ (06.05.2008)
www.bfarm.de > Medizinprodukte > Risikoerfassung und -bewertung > Empfehlungen des BfArM
- [36] Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL):
 „Mobilfunk – Ein Gesundheitsrisiko? Studien –kontrovers diskutiert“ (05/2005)
www.lgl.bayern.de > Publikationen > Gesundheit und Umwelt
- [37] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW): Mobilfunk und Gesundheit – Aktuelle Forschungsergebnisse im Überblick (Juni 2004)
www.lubw.de > Themen > Elektromagnetische Felder > Publikationen und Links
- [38] Strahlenschutzkommission: Vergleichende Bewertung der Evidenz von Krebsrisiken durch elektromagnetische Felder und Strahlungen, BANz, Februar 2012
www.ssk.de > Beratungsergebnisse > suchen bei 2011

II KAPITEL 6

GRENZWERTE

- [39] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1996, Teil I, Nr. 66, 20.12.1996, zuletzt geändert mit der Verordnung zur Änderung der Vorschriften über elektromagnetische Felder und das telekommunikationsrechtliche Nachweisverfahren, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2013, Teil I, Nr. 50, 21.08.2013;
www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26
- [40] siehe [33]
- [41] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder: Berufsgenossenschaftliche Vorschriften im Umgang mit elektromagnetischen Feldern „BGV B11 Elektromagnetische Felder“ (06/2001);
<http://publikationen.dguv.de> > Suche "DGUV Vorschrift 15"
- [42] 1999/519/EG, Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz); Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999;
<http://eur-lex.europa.eu/homepage.html> > Suche: Jahr "1999" Nummer "519"

- [43] Bundesamt für Strahlenschutz: Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nicht-ionisierenden Bereich - Vorhaben 3614S80010; internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nicht-ionisierenden Bereich - Band 1: Ländervergleich der Regelungen für elektrische, magnetische und elektro-magnetische Felder (0 Hz - 300 GHz);
<https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2016021914007>
- [44] Schweizerische Eidgenossenschaft Bundesamt für Umwelt BAFU: Die NISV-Verordnung (NISV) vom 23. Dezember 1999 (aktualisiert 1. Juli 2016); Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung;
www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19996141

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 BAFU
www.bafu.admin.ch > Elektromog. Unter „Publikationen“ ist die Broschüre „Elektromog in der Umwelt“ (2005) als Datei im pdf-Format herunterladbar.
- RWTH Aachen: EMF-Portal des Forschungszentrums für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit
www.emf-portal.de
Das Portal fasst wissenschaftliche Forschungsergebnisse zu den Wirkungen elektromagnetischer Felder systematisch zusammen und stellt sie in englischer und deutscher Sprache zur Verfügung.
- UKW/TV-Arbeitskreis e. V., 64347 Griesheim: Liste bekannter Rundfunksender
www.ukw.tv/cms/sender-tabelle

Bildnachweis

Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin: S. 58 u.; **AllgäuDSL:** S. 88 l.o.; **BMW Group:** S. 75 o.; **Bundesnetzagentur, LfU:** S. 23 u., 83; **DK3WN:** S. 89 u.; **FGEU mbH, Berlin:** S. 19 m., o.; **Francis McLloyd, CC BY-SA 3.0:** S. 56 u.; **GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum:** S. 9 o., u, 53 m., o., u.; **Gigaset Communications:** S. 92 o.; **Halfdan, CC BY-SA 3.0:** S. 15 z9, 51 z9; **IMST GmbH, Kamp-Lintfort:** S. 37 o., 107 o., 108 l.o., 108 r.o.; **LfU:** Titelseite, r., o., S. 15 z4l., 19 u., 25 u., 43 u., 51 z4l., 61 l.o., l.u., r.o., r.u., 62 l.o., r.o., 64 u., 66 u., 69 o., 76 o., 80 l.o., r.o., 81 l.u., o., r.u., 89 m., o., 97 o., u., 107 u., 122 u.; **LfU, LUBW:** S. 27 o., S. 86 u.; **LUBW:** Titelseite r.u., S. 8 l., r., 13 l.u., r.u., 15 z2, z3, z4r., z6l., 17 o., 19 (m.), (o.), 23 o., 25 o., 27 m.u., 31 o., 35 r., 44 , 46 l.o., 46 l.u., 46 r., 47 r.o., u., u.(m.), u.(o.), 48 u., 49 u., 51 z2, z3, z4r., z6l., 52 l.o., l.u., 59 u., 62 u., 65 l.u., o., r.u., 66 o., 71 u., 74 l., 75 u., 77 u., 78 o., 80 l.u., 84 u., 85 o., 88 r.u., 90 u., 96 u., 98 u., 103 o., 104 u., 105 o., 109 u., 116 u.; **Motorola:** S. 87 u.; **Nexans:** S. 64 o.; **p2 systems GmbH:** S. 88 l.u.; **Physiomed Elektromedizin AG:** S. 33 l., r.o., r.u., 108 l.u., r.u.o., r.u.u.; **Rüdiger Eggert, Dorsten:** S. 59 o.; **Sharp Electronics:** S. 91 u.; **Siemens AG, München:** S. 63 o.; **Stephan Hessberger / oebl.de:** S. 77 m., o.; **StMI, Projektgruppe DigiNet:** S. 87 o.; **Wikipedia (GNU):** S. 41 l., 74 r.

Bilddatenbanken:

123RF: fantasista © 123RF.com: S. 13 r.o., 15 z5l., 51 z5l.

Fotolia: © Ashwin / Fotolia: S. 70 u., © fotohansel / Fotolia: S. 41 r.u., © lagom / Fotolia: S. 79 o., © LIGHTFIELD STUDIOS / Fotolia: S. 126, © newb1 / Fotolia: S. 31 m.u., © Scanrail / Fotolia: S. 78 u., S. 93 l., © Stockwerk-Fotodesign / Fotolia: Titelseite r.m., S. 94 u., © WavebreakMediaMicro / Fotolia: Titelseite l., © wittayayut / Fotolia: S. 67 o.

Shutterstock: Albert Lozano / Shutterstock.com: S. 31 r.u., 91 o., Alex0001 / Shutterstock.com: S. 54 u., Alexander Lukin / Shutterstock.com: S. 17 r.u., Alistair Scott / Shutterstock.com: S. 17 l.u., Andrejs Pidjass / Shutterstock.com: S. 31 l.u., Andresr / Shutterstock.com: S. 15 z1, 51 z1, Andy Dean Photography / Shutterstock.com: S. 29 r.u., anne late / Shutterstock.com: S. 72 u., Anthony Berenyi / Shutterstock.com: S. 15 z6r., 29 r.m., 51 z6r., arek_malang / Shutterstock.com: S. 11 l.u., r.o., AVAVA / Shutterstock.com: S. 39 r., BESTWEB / Shutterstock.com: S. 27 r.u., Chas / Shutterstock.com: S. 11 m.u., 47 u.(u.), Denis and Yulia Pogostins / Shutterstock.com: S. 13 l.o., Dmitriy Shironosov / Shutterstock.com: S. 29 l.u., 93 r., hfng / Shutterstock.com: S. 13 r.m., KULISH VIKTORIA / Shutterstock.com: S. 29 m.u., Kuttly / Shutterstock.com: S. 13 m.o., Lev Olkha / Shutterstock.com: S. 27 l.u., Li Wa / Shutterstock.com: S. 17 m.u., 67 m., Monkey Business Images / Shutterstock.com: S. 21 r.o., Oleg Kozlov / Shutterstock.com: S. 11 l.o., Phil Date / Shutterstock.com: S. 29 l.o., Robert Pernel / Shutterstock.com: S. 11 r. u., Ronen / Shutterstock.com: S. 15 z5r., 29 r.o., 51 z5r., Sebastian Kaulitzki / Shutterstock.com: S. 35 l., m., 39 l., 101 u., SeDmi / Shutterstock.com: S. 11 r.m., Shane White / Shutterstock.com: S. 67 l.u., Shvaygert Ekaterina / Shutterstock.com: S. 15 z7, 51 z7, Stefan Simmerl / Shutterstock.com: S. 6, stocksnapp / Shutterstock.com: S. 71 o., Sven Hoppe / Shutterstock.com: S. 39 m., Vasca / Shutterstock.com: S. 67 r.u., Vlasov Pavel / Shutterstock.com: S. 21 r.u., Volodymyr Krasnyuk / Shutterstock.com: S. 55 u., WilleeCole / Shutterstock.com: S. 15 z8, 51 z8, Yobidaba / Shutterstock.com: S. 41 r.o., Yuri Arcurs / Shutterstock.com: S. 21 l.

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

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Postfach 10 01 63 · 76231 Karlsruhe · Internet: www.lubw.de

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