



Elektromagnetische Felder im Alltag

Aktuelle Informationen über Quellen, Einsatz und Wirkungen

IMPRESSUM

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de Bayerisches Landesamt für Umwelt 86177 Augsburg, www.lfu.bayern.de
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Ulrich Ratzel, Martin Hoffmann – Referat 33 Luftqualität, Lärmschutz Bayerisches Landesamt für Umwelt Clemens Mehnert, Dr. Thomas Kurz – Referat 29 Immissionsschutz Nordbayern Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit Dr. Evi Vogel – Referat 77 Lärm und Erschütterungen, nichtionisierende Strahlen
REDAKTION UND LAYOUT	ÖkoMedia Public Relations Kulturpark Berg, Teckstraße 56, 70190 Stuttgart, www.oekomedia-pr.de
BEZUG	Die Broschüre ist kostenlos wie folgt erhältlich: Verlagsauslieferung der LUBW, JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim, Telefax 0621 / 398-370 oder im Internet unter www.bestellen.bayern.de > Elektromog
DOWNLOAD	www.lubw.de > Publikationen > Titel eingeben www.elektromog.bayern.de
ISBN	978-3-88251-341-7
STAND	Juni 2009, 1. Auflage (12.000)
DRUCK	Pauli Offsetdruck e. K., Am Saaleschlößchen 6, 95145 Oberkatzau Gedruckt auf Recyclingpapier
BILDNACHWEIS	Seite 143

GEFÖRDERT DURCH



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Vorwort

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

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

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



Margareta Barth

Margareta Barth

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



Albert Göttle

Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle

Präsident des Bayerischen Landesamtes
für Umwelt

INHALTSVERZEICHNIS

I	AUF EINEN BLICK	6
	QUELLEN	8
	EINSATZ	14
	WIRKUNG	32
	GRENZWERTE	42
II	NÄHER BETRACHTET	44
1	PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	46
1.1	Elektrische und magnetische Felder	46
1.2	Schwingungen und Wellen	48
1.3	Elektromagnetisches Spektrum	50
2	NATÜRLICHE ELEKTROMAGNETISCHE FELDER	52
2.1	Elektrisches Feld in der Atmosphäre	52
2.2	Magnetfeld der Erde	52
2.3	Weitere natürliche Felder	54
2.4	Licht und Wärmestrahlung	55
3	NIEDERFREQUENTE UND STATISCHE FELDER	56
3.1	Elektrische und magnetische Gleichfelder	56
3.2	Niederfrequente Felder	58
3.2.1	Bahnstrom 16,7 Hz	58
3.2.2	Öffentliche Stromversorgung 50 Hz	61
3.2.3	Felder im Haushalt	66
4	HOCHFREQUENTE FELDER	72
4.1	Grundlagen und Messgrößen	72
4.2	Zulassung und Überwachung von Funksendeanlagen	75
4.3	Mobilfunk	76
4.3.1	Der Mobilfunk-Boom	76
4.3.2	Netzstruktur	77
4.3.3	Immissionen einer Mobilfunkanlage	78
4.3.4	Abstrahlung einer Antenne	80
4.3.5	Messungen an Mobilfunksendestationen	82
4.3.6	Immissionen eines Handys	84
4.3.7	Maßnahmen zur Minimierung der Strahlenbelastung	86
4.4	Rundfunk und Fernsehen	86
4.5	Amateurfunk	89
4.6	Drahtlose Stadt-Netzwerke (WiMAX)	89
4.7	Richtfunk und Satelliteninternet	90
4.8	Artikelsicherungs- und Artikelerkennungsanlagen	92

INHALTSVERZEICHNIS

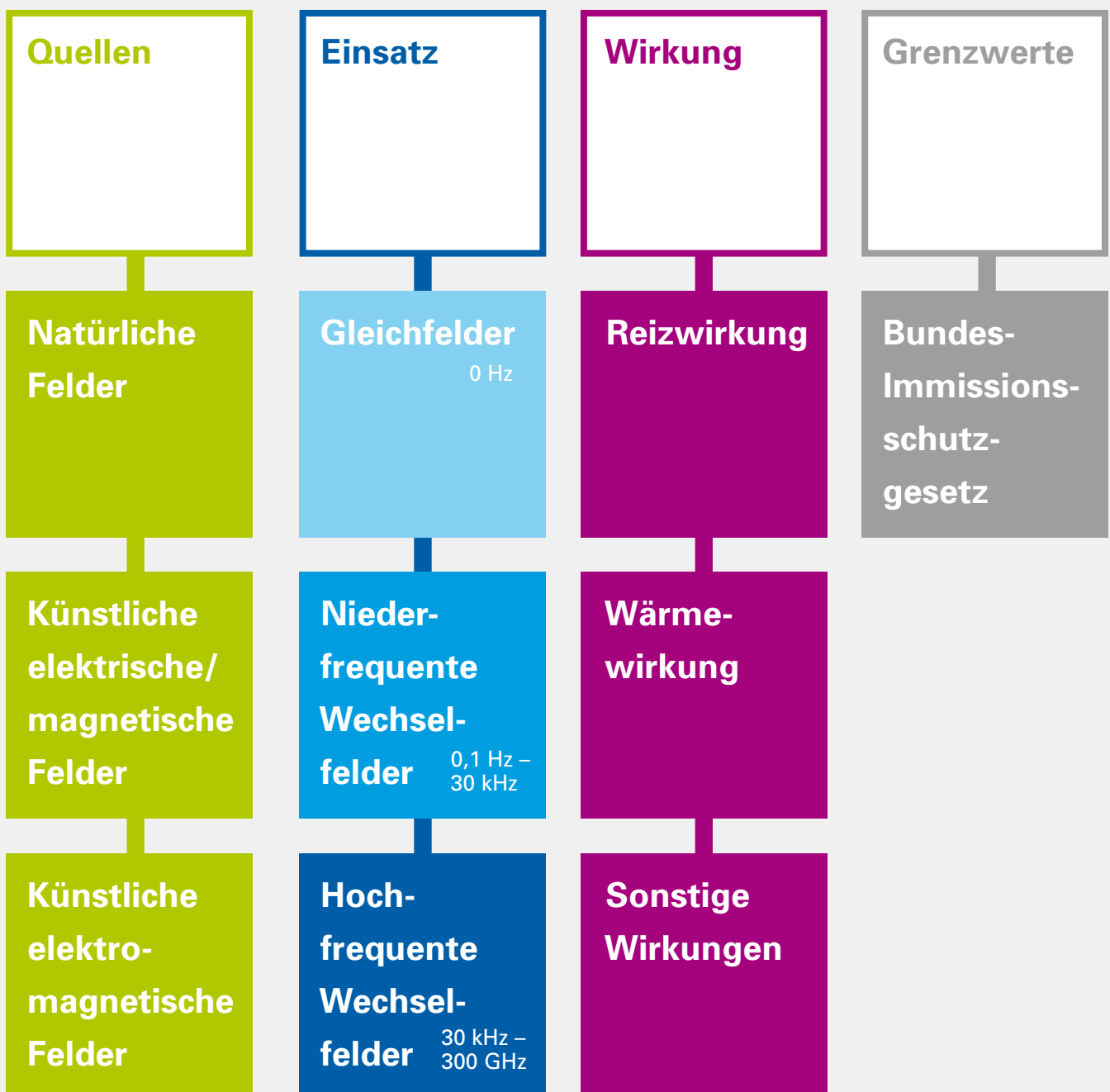
4.9	Quellen im Haushalt	93
4.9.1	Mikrowellenherde	93
4.9.2	Schnurlostelefone (DECT)	94
4.9.3	Drahtlose Heimnetzwerke (WLAN)	94
4.9.4	Bluetooth	95
4.9.5	Babyfone	95
4.10	EMF-Monitoring in Bayern und Baden-Württemberg	96
4.10.1	Programme Bayern	96
4.10.2	Programme Baden-Württemberg	98
4.10.3	Vergleich der Untersuchungen	100
5	BIOLOGISCHE WIRKUNGEN	102
5.1	Einführung	102
5.2	Akute Wirkungen niederfrequenter Felder	103
5.2.1	Reizwirkungen	104
5.2.2	Indirekte Wirkungen	106
5.2.3	Weitere Wirkungen	107
5.3	Akute Wirkungen hochfrequenter Felder	108
5.3.1	Wärmewirkung	109
5.3.2	Weitere Wirkungen	111
5.4	Langzeitwirkungen	112
5.4.1	Niederfrequente Felder und Krebs	112
5.4.2	Hochfrequente Felder und Krebs	114
5.4.3	Weitere Langzeitwirkungen hochfrequenter Felder	115
5.5	Befindlichkeitsstörungen	116
5.6	Beeinträchtigungen bei Implantaten und Körperhilfen	117
5.7	Ausgewählte Einzelstudien	119
6	GRENZWERTE	124
6.1	Empfehlungen der Europäischen Union	125
6.2	Regelungen in Deutschland	126
6.3	Situation im Ausland	128
III	ANHANG	130
	ABKÜRZUNGEN UND ERLÄUTERUNGEN	132
	LITERATUR UND INTERNETQUELLEN	137
	BILDNACHWEIS	143



I. Auf einen Blick

Elektromagnetische Felder im Alltag

Ob beim Handy oder bei der Mikrowelle – elektromagnetische Felder begleiten uns im Alltag, stehen aber auch immer wieder in der Diskussion. Auf den folgenden 36 Seiten erhalten Sie einen Überblick über die in diesem Heft behandelten Themen. Ab Seite 46 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

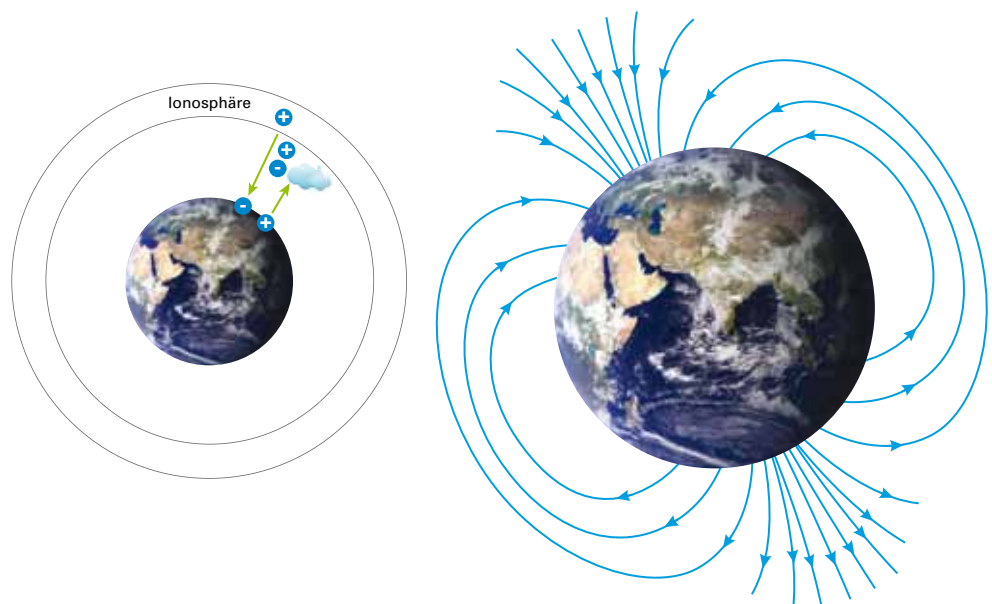
Elektromagnetische Felder sind seit jeher Bestandteil der natürlichen Umwelt des Menschen.

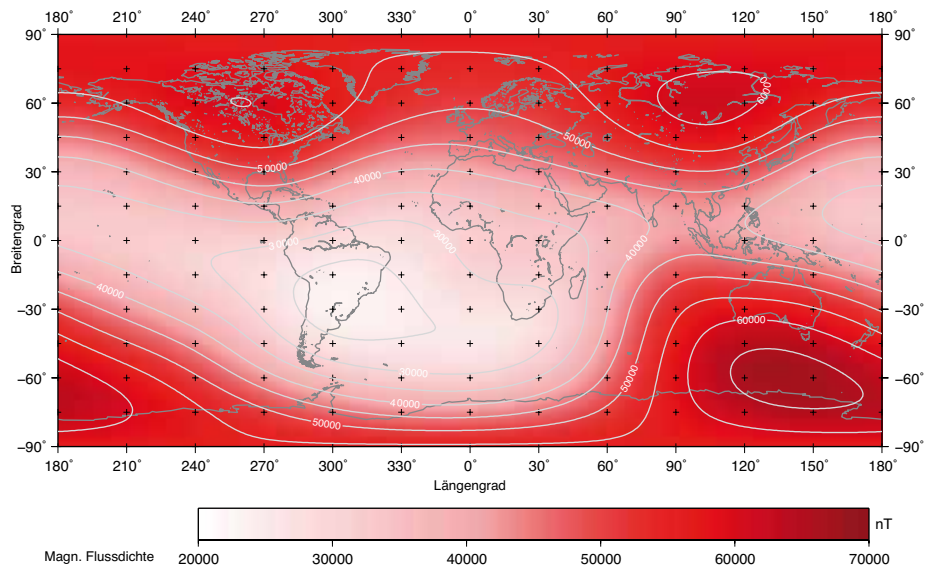
Das Erdmagnetfeld ist ein statisches Magnetfeld, das die ganze Erde vom Südpol bis zum Nordpol umgibt (Abbildung unten). An den Polen ist es etwa doppelt so stark ist wie am Äquator. Die Feldlinien verlaufen am Äquator parallel und an den Polen senkrecht zur Erdoberfläche. In Baden-Württemberg und Bayern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

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

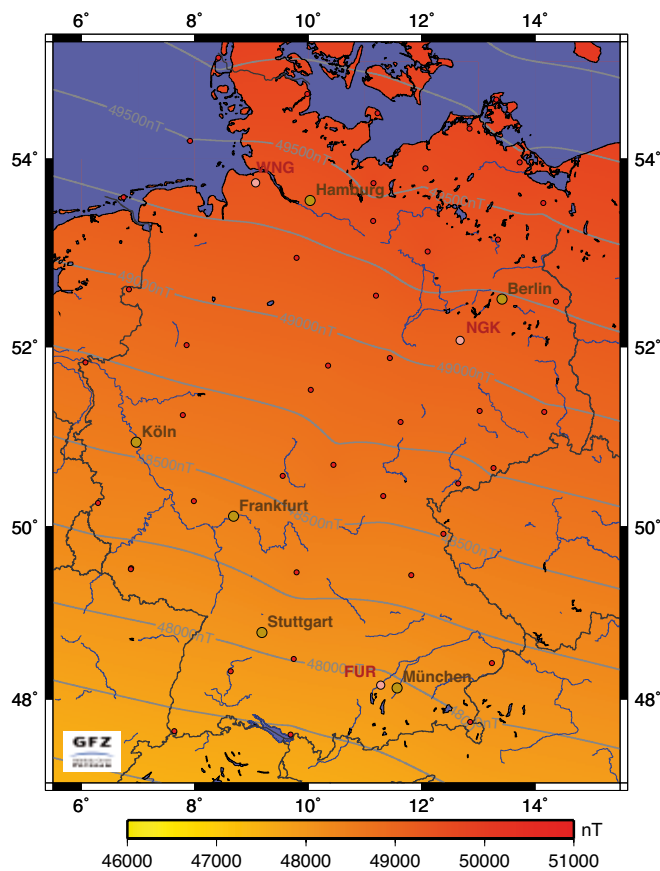
elektrisches Gleichfeld von 130 bis 270 V/m gemessen werden. Zudem erzeugen durch Sonnenstrahlung aufgewärmte feuchtwarme Luftmassen in Gewitterwolken sehr große elektrische Feldstärken. Bei der plötzlichen Entladung durch Blitze entstehen elektromagnetische Impulse (Sferics), die noch in weiter Entfernung 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 μT , an den Polen ist sie etwa doppelt so groß.
Quelle: GeoForschungs-Zentrum Potsdam, Stand 2006



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

Quellen

Künstliche elektrische / magnetische Felder

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

Zwischen elektrischen und magnetischen Feldern besteht ein enger Zusammenhang.

ELEKTROGERÄTE UND VERKABELUNG

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

- Maß für die Stärke eines elektrischen Feldes: **Elektrische Feldstärke**, gemessen in Volt pro Meter (V/m)
- Maß für die Stärke eines magnetischen Feldes in Materie: **Magnetische Flussdichte**, 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 der Hausverkabelung und bei Elektrogeräten auf.



Quellen

Künstliche elektro- magnetische Felder

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

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

RADIO, TV, MOBILFUNK, MIKROWELLE

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

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

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

zur Informationsübertragung bei Radio, Fernsehen und Mobilfunk genutzt.

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

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



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



Der Einsatz von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Alltag

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf Seite 50

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

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

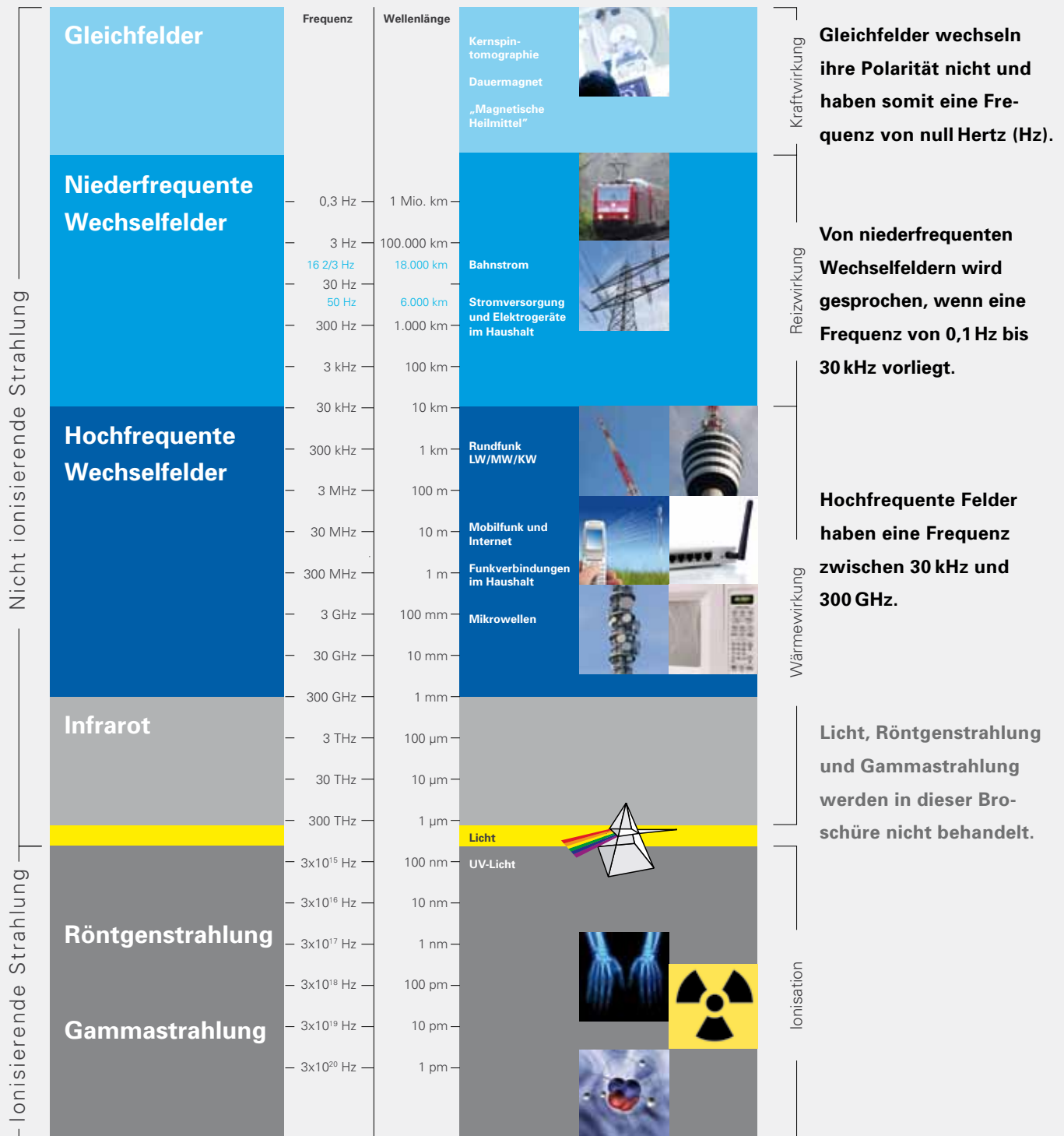
Abhängig von der Frequenz werden die Felder in Gleichfelder, niederfrequente Wechselfelder und hochfrequente Wechselfelder eingeteilt.

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

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

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

DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM



Einsatz

Gleichfelder 0 Hz

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

Statische Felder ändern ihre Frequenz nicht.

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

NAHVERKEHR UND INDUSTRIE

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

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

DAUERMAGNETE UND MEDIZIN-TECHNIK

Magnetische Gleichfelder werden in vielen technischen Anwendungen genutzt. Sie

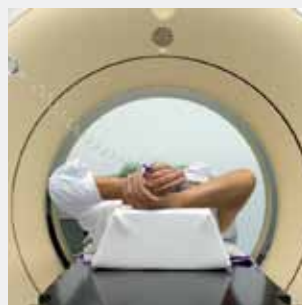
werden entweder mit Permanentmagneten oder Elektromagneten erzeugt. Permanentmagnete bestehen aus Eisen, Kobalt oder Nickel und sind dauermagnetisch. Sie werden z. B. in Elektromotoren, Lautsprechern, und vielen anderen Geräten eingesetzt.

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

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



Zwischen Oberleitung und Schiene tritt bei Straßenbahnen ein elektrisches Gleichfeld auf.



Kühlschrankschmagnet, Kernspintomograph, Lautsprecher

Einsatz

Nieder- frequente Wechsel- felder

0,1 Hz –
30 kHz

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

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

WECHSELSTROM 50 HZ

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

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

- die Spannung,
- die Stromstärke,
- die Form des Strommasts (Anzahl und Anordnung der Leiterseile) und
- der Durchhang der Leiterseile.

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

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

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

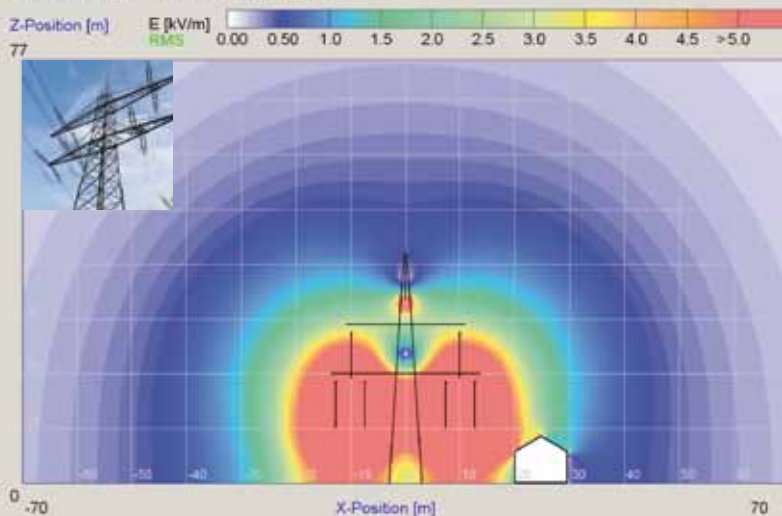
BAHNSTROM 16,7 HZ

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

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

Elektrische Feldstärke der 380-kV-Freileitung im Schnitt

Phasenlage: 123 123, Belastung: 2 x 1000 A

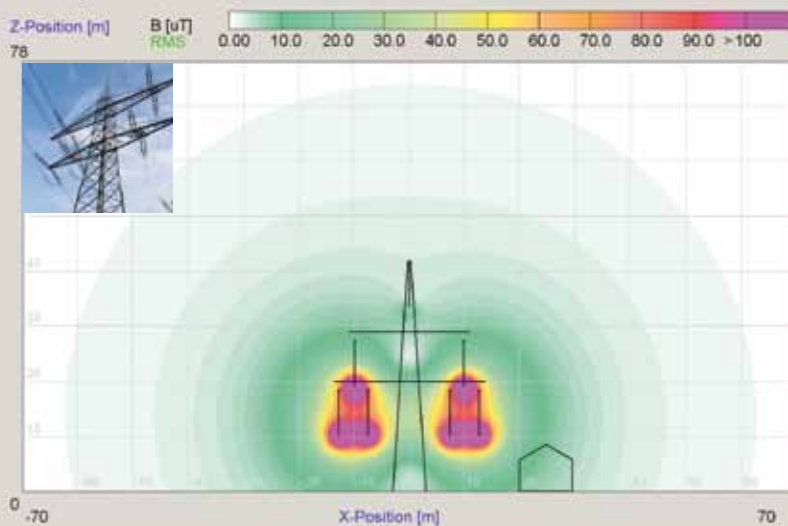


Quelle: WinField, Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie – FGEU

Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer 380 kV-Freileitung

Magnetische Flussdichte der 380-kV-Freileitung im Schnitt

Phasenlage: 123 123, Belastung: 2 x 1000 A



Quelle: WinField, Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie – FGEU

Verlauf der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 380 kV-Freileitung

Einsatz

Nieder- frequente Wechsel- felder

0,1 Hz –
30 kHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 66 - 70

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

ELEKTROGRÄTE IM HAUSHALT

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

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

Energiesparlampen besitzen ein elektronisches Vorschaltgerät, das die Netzspannung in eine interne Betriebsspannung mit einer Frequenz zwischen 25 und 60 kHz umwandelt. Körpernahe Lampenanordnungen ohne geerdeten Schirm (Schreibtisch, Leselampe) können Werte bis zu 30 %

der zulässigen internationalen Grenzwerte erreichen. Eine Alternative besonders für körpernahe Lampen sind strahlungsarme Energiesparlampen, die eine spezielle Beschichtung des Glaskolbens und besondere elektronische Komponenten besitzen. Ihr 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 höher frequente Magnetfelder mit einer Frequenz von 20 bis 100 kHz. Daher wird für Schwangere vorsorglich ein Mindestabstand von 20 bis 30 cm zur Kochzone empfohlen. Personen mit elektronischen Implantaten sollten die Sicherheitshinweise der Hersteller beachten und die Verwendung von Induktionskochherden mit ihrem Arzt besprechen. Bei korrektem Verhalten ist die Wahrscheinlichkeit einer Störung des Implantats aber sehr klein.

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



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

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

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

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

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

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

**Hochfrequente Wech-
selfelder werden zur In-
formationsübertragung
flächendeckend genutzt.**

MOBILFUNK

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

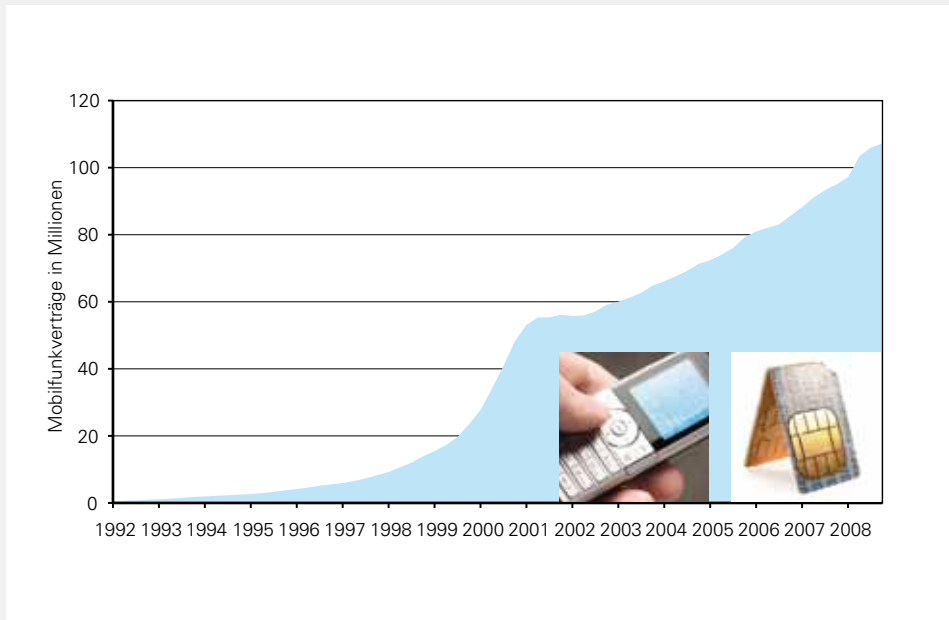
Funksendeanlagen dürfen nur mit einer Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur betrieben werden. Der Betreiber meldet der Bundesnetzagentur die geplante Sendeleistung sowie Art, Ausrichtung, Aufstellort und Montagehöhe der Antennen. Daraus resultieren für diesen Standort bestimmte Sicherheitsabstände,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

Weltweit gab es Ende 2008 fast vier Milliarden Mobilfunkverträge. In Deutschland gab es 2008 über 100 Mio. Mobilfunkverträge und rund 63.000 Standorte mit Mobilfunksendern, an denen ca. 500.000 Sendeantennen installiert waren. Die heutigen Handys arbeiten überwiegend nach dem

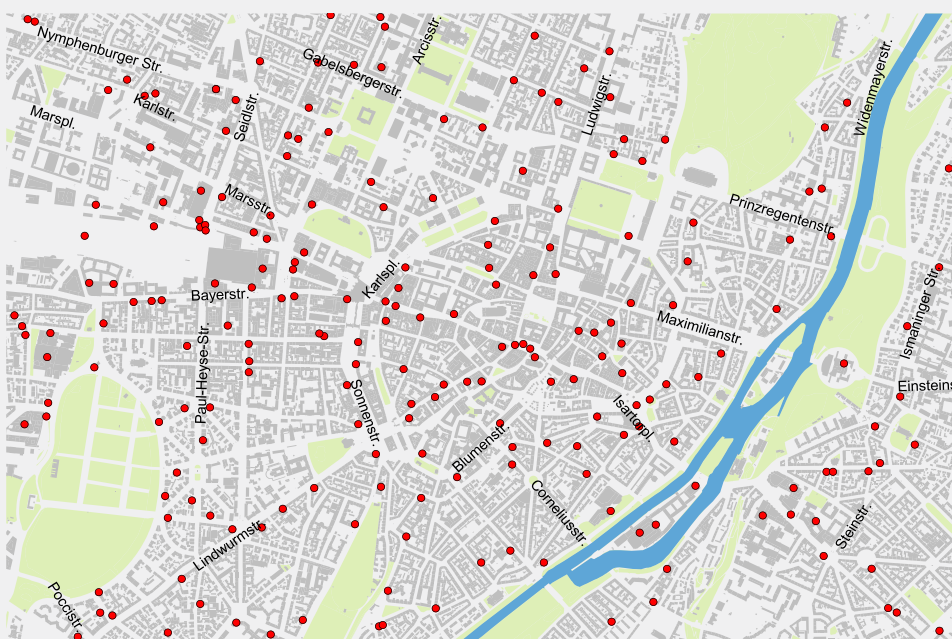
GSM-Standard. Seit 2002 wird in Deutschland das UMTS-Netz ausgebaut, mit dem mobiles Internet-Surfen mit hoher Geschwindigkeit möglich ist. In Folge des steigenden Angebots und der starken Nachfrage nach Mobilfunkdiensten nehmen die Einwirkungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder in der Umwelt zu.

Das Mobilfunknetz ist zellulär und flächendeckend aufgebaut. Im englischsprachigen Ausland werden Mobiltelefone deswegen als „cellular“ oder „cellular phone“ bezeichnet. 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 und eine Gesprächsübergabe von einer Funkzelle in die nächste ermöglichen.

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



Die Mobilfunknutzung in Deutschland nimmt seit Jahren stetig zu. Seit 2008 gibt es mehr als 100 Mio. Anschlüsse. Quelle: Bundesnetzagentur, Stand Februar 2009



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

Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 74 - 86

Mobiltelefone erzeugen zur Datenübertragung und Anwesenheitskontrolle elektromagnetische Felder.

STRAHLUNG DER MOBILFUNKANTENNEN

Es gibt zwei Typen von Antennen für Mobilfunkbasisstationen:

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

Die Stärke der Strahlung ist von folgenden Faktoren abhängig:

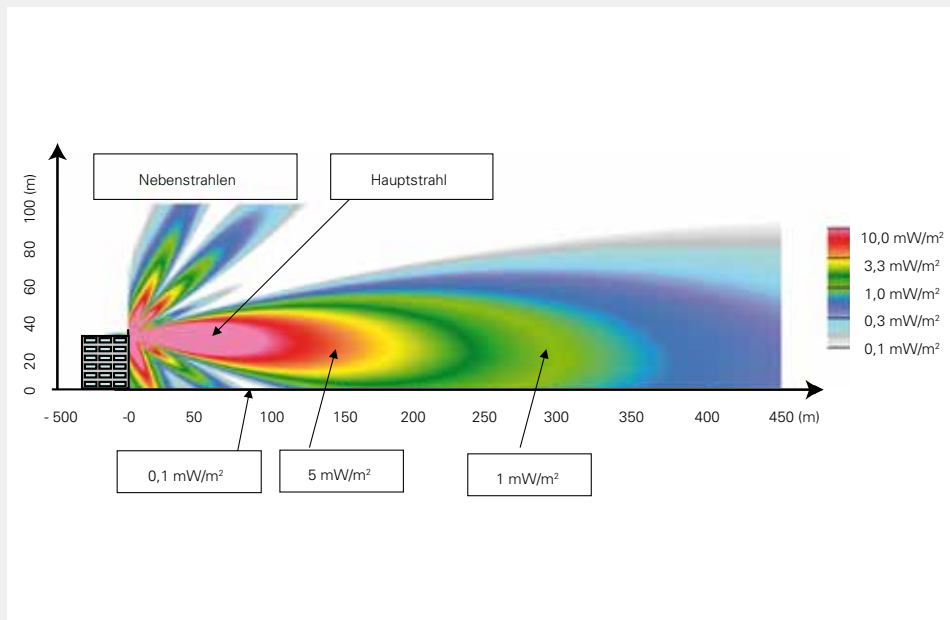
- Sendeleistung
- Strahlbündelung der Antenne
- Abstand zur Antenne
- Montagehöhe und Hauptstrahlrichtung der Antenne
- Hindernisse zwischen Antenne und Handy
- Tageszeit
- Wetter

STRAHLUNG DER HANDYS

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

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

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



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



Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 86-91**

**Rundfunk und Internet-
Funklösungen decken
mit einem Masten grö-
ßere Flächen ab als der
Mobilfunk.**

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 65.000 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 Abstrahlung erfolgt meist von hohen Bergen oder von lokalen Fernsehtürmen aus. Die Sender strahlen horizontal meist in alle Richtungen ab, in vertikaler Richtung werden die Strahlen wie beim Mobilfunk gebündelt. Wegen der hohen Sendeleistung sind große Sicherheitsabstände zum Sender eingerichtet.

INTERNET ÜBER FUNK

Internetdaten können heute über große Flächen und weite Strecken mittels Funk übertragen werden. Es gibt in diesem Bereich eine Vielzahl von Technologien. Man unterscheidet Funklösungen als kostengünstige Alternative zu Kabelstrecken und solche, die in erster Linie die Mobilität der Nutzer im Auge haben.

Da viele Häuser zu weit von der nächstgelegenen Vermittlungsstelle 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 dünn 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 Sat-Schüsseln an Balkonen, Hauswänden oder Dächern befestigt werden. Alternativ können Minivermittlungsstellen per Richtfunk angebunden werden; die einzelnen Nutzer werden dann über die Telefonleitung mit schnellen DSL-Verbindungen versorgt. Die Immissionen von stationären Funklösungen sind aufgrund der geringen Sendeleistung etwa 1.000-mal geringer als beim Mobilfunk und damit vernachlässigbar.

Internet-Funklösungen, welche die Mobilität des Nutzers unterstützen, sind wie Mobilfunknetze zellulär und flächendeckend aufgebaut. In einem bestimmten Raster sind Funkmasten installiert, so dass Verbindungen unterbrechungsfrei in benachbarte Funkzellen übergeben werden können (hand-over). Die Sendeleistungen von Basisstationen und Endgeräten sind mit UMTS vergleichbar.



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

Quelle: LfU, LUBW



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

Einsatz

**Hoch-
frequente
Wechsel-
felder** 30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 93 - 95**

**Zur Minimierung der Ein-
wirkungen im Haushalt
sollten Basisstationen
von Funkgeräten nicht
an Daueraufenthaltsor-
ten installiert werden.**

FUNKVERBINDUNGEN IM HAUSHALT

Schnurlose Telefone basieren fast ausschließlich auf dem digitalen DECT-Standard und senden bei Frequenzen um 1.900 MHz. Die maximale Sendeleistung beträgt 250 mW, die mittlere Sendeleistung etwa 10 mW. Im Ruhebetrieb sendet die Basisstation 100-mal pro Sekunde Systeminformationen an das Mobilteil. Zur Minimierung der Einwirkungen sollte die Basisstation nicht an Orten stehen, wo man sich häufig aufhält, z. B. direkt am Bett oder auf dem Schreibtisch. Inzwischen gibt es besonders strahlungsarme DECT-Telefone, die ihre Sendeleistung im Ruhebetrieb grundsätzlich abschalten (ECO DECT).

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

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

Babyfone dienen der akustischen Überwachung von Säuglingen und Kleinkindern. Sender und Empfänger werden entweder über ein eigenes Kabel, das Hausstromnetz oder über Funk miteinander verbunden. Geräte, die über das Stromnetz verbunden sind, erzeugen keine nennenswerten elektromagnetischen Felder. Bei den Funk-Babyfonen sind diejenigen zu bevorzugen, die nur dann senden, wenn ein Geräusch vorhanden ist. Aus Vorsorgegründen empfiehlt es sich bei allen Geräten, einen Mindestabstand von 2 m zum Kind einzuhalten.

MIKROWELLENHERDE

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



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



Einsatz

Hoch- frequente Wechsel- felder

30 kHz –
300 GHz

**Ausführliche Informati-
onen zum Thema finden
Sie auf den Seiten 92 - 93**

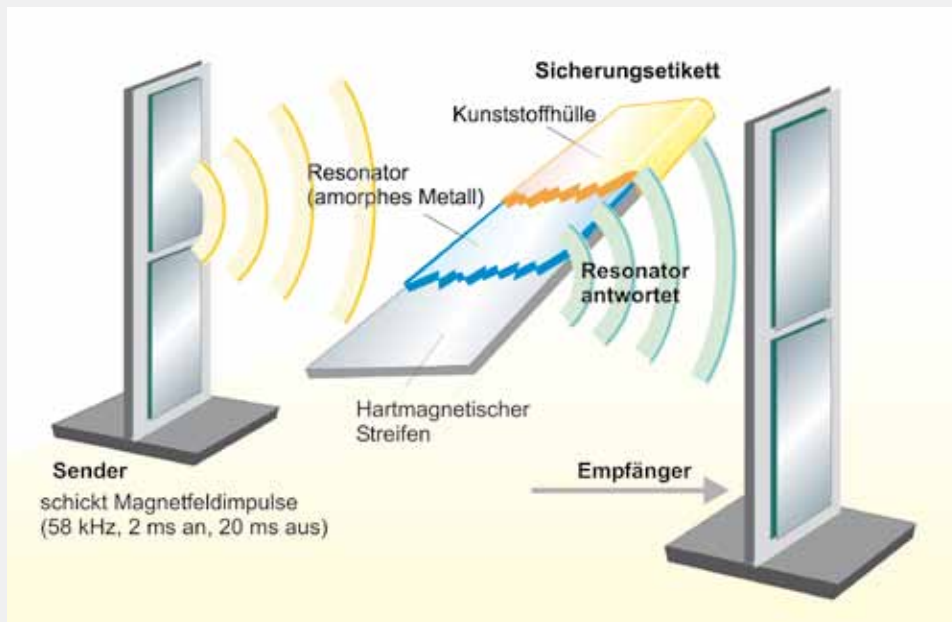
**Artikelsicherungsanla-
gen erkennen anhand
von elektromagne-
tischen Feldern, ob beim
Bezahlen das Etikett
entwertet wurde.**

ARTIKELSICHERUNGS- UND -ERKENNUNGSANLAGEN (RFID)

Auch Artikelsicherungsanlagen an Kassen und Kaufhausausgängen arbeiten mit elektromagnetischen Feldern. Dabei kommen unterschiedliche Frequenzen zwischen 10 Hz und 3 GHz zum Einsatz. Bei einem Verfahren sendet eine der beiden Standsäulen magnetische Impulse aus. Gerät ein nicht entwertetes Sicherungsetikett in das Feld, reagiert es auf die magnetischen Impulse. Dies erkennt die gegenüberliegende Standsäule und löst Alarm aus. Dieses System funktioniert ohne Elektronik im Sicherungsetikett, kann dafür aber auch nur erkennen, ob ein solches Etikett entwertet wurde oder nicht. Bei Warensicherungsanlagen kann es im Überwachungsbereich zu einer Überschreitung der empfohlenen Referenzwerte kommen. Da die Expositionsdauer in der Regel sehr kurz ist, besteht keine gesundheitliche Gefährdung für die allgemeine Bevölkerung durch die Warensi-

cherungsanlagen. 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 Lesegerät 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.



Artikelsicherungsanlagen senden sehr starke elektromagnetische Wellen aus.



Innenleben einer RFID-Karte

Wirkung

Wechselwirkungen mit dem Körper

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

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

Die Wirkung 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)
- Nicht ionisierende Strahlung, deren Energiegehalt zu gering ist, um Ionen zu erzeugen, wie z. B. Radiowellen oder Mikrowellen

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

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

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

In folgenden Frequenzbereichen sind akute Wirkungen belegt:

■ Gleichfelder (0 Hz)

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

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

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

■ Hochfrequente Felder (30 kHz - 300 GHz)

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



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

Mikrowellentherapie:
Mikrowellen (2450 MHz)
verursachen eine oberflä-
chennahe Erwärmung.

Wirkung

Reizwirkung

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

Niederfrequente Strahlung kann Nerven und Muskeln reizen.

AKUTE WIRKUNGEN

NIEDERFREQUENTER FELDER

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

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

REIZWIRKUNGEN

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

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

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

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

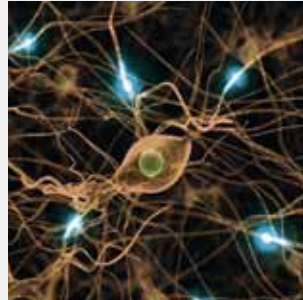


TABELLE: WIRKUNGEN VERSCHIEDENER KÖRPERSTROMDICHTEN DURCH VON AUSSEN EINWIRKENDE ELEKTROMAGNETISCHE FELDER NACH WHO

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

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

Wirkung

Wärme- wirkung

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 108 - 111

Hochfrequente Strahlen werden im Körper in Wärme umgewandelt.

AKUTE WIRKUNGEN

HOCHFREQUENTER FELDER

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

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

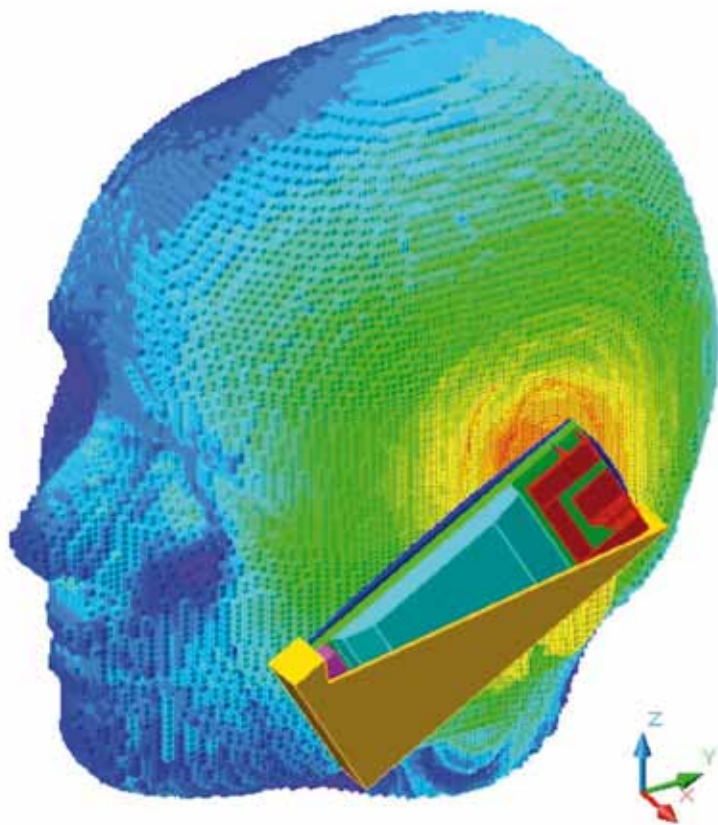
Ganzkörper-SAR-Werte von 1 bis 4 W/kg führen bei Erwachsenen zu einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von weniger als 1 °C. Körperliche Arbeit oder

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

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

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

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



Quelle: IMST GmbH, Kamp-Lintfort, 2001

Exposition des Menschen durch die hochfrequenten elektromagnetischen Felder eines Handys.

Wirkung

Sonstige Wirkungen

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 112 - 115

Bisher wurde kein Zusammenhang zwischen Strahlungsfeldern und Krebs nachgewiesen.

LANGZEITWIRKUNGEN NIEDER- UND HOCHFREQUENTER FELDER

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

NIEDERFREQUENTE FELDER UND KREBS

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

HOCHFREQUENTE FELDER UND KREBS

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

Die internationale Interphone-Studie, an der 13 Länder teilnehmen, untersucht mögliche Zusammenhänge zwischen der Handynutzung und dem Risiko, an einem Tumor im Kopfbereich zu erkranken. Die deutsche Teilstudie zeigt kein erhöhtes Risiko für einen Zeitraum bis zu zehn Jahren Handynutzung. Bei mehr als zehn Jahren Nutzung besteht laut BfS noch Forschungsbedarf. Es gibt Hinweise auf ein „nicht signifikant erhöhtes Risiko“, an Gliomen (Hirngewebstumoren) zu erkranken. Die Gesamtauswertung der Interphone-Studie liegt noch nicht vor (Stand Juni 2009).



TABELLE: SKALA DER IARC ZUR EINSTUFUNG VERSCHIEDENER UMWELT-AGENZIE

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

**Niederfrequente Felder
werden als möglicher-
weise krebserregend
eingestuft.**

Wirkung

Sonstige Wirkungen

Ausführliche Informationen zum Thema finden Sie auf den Seiten 116 - 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

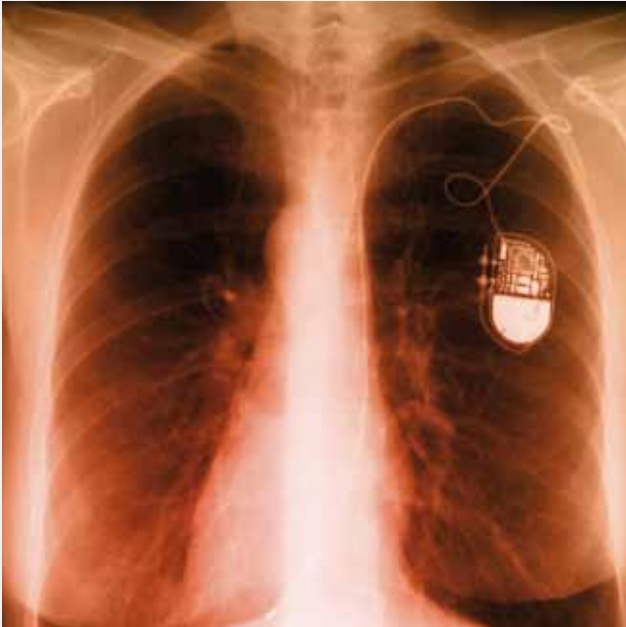
Implantaten zu beeinträchtigen. Störungen sind z. B. nicht ausgeschlossen

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

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

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

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



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

**Ausführliche Infor-
mationen zum Thema
finden Sie auf den
Seiten 124 - 129**

**Die gesetzlichen Re-
gelungen beinhalten
Grenzwerte mit hohem
Sicherheitsfaktor.**

Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern

Die Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor der Einwirkung nicht ionisierender elektromagnetischer Felder sind in der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, 26. BImSchV) festgelegt. Man unterscheidet zwischen Basisgrenzwerten und Referenzgrenzwerten.

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

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

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

Bedingungen für die Dauer von 8 h pro Arbeitstag ausgesetzt sind. Hier liegen die Grenzwerte bei 10 mA/m^2 bzw. $0,4 \text{ W/kg}$ (Ganzkörper-SAR-Wert) und 10 W/kg (Teilkörper-SAR-Wert).

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

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

GRENZWERTE FÜR NIEDERFREQUENZANLAGEN GEMÄSS DER 26. BIMSCHV

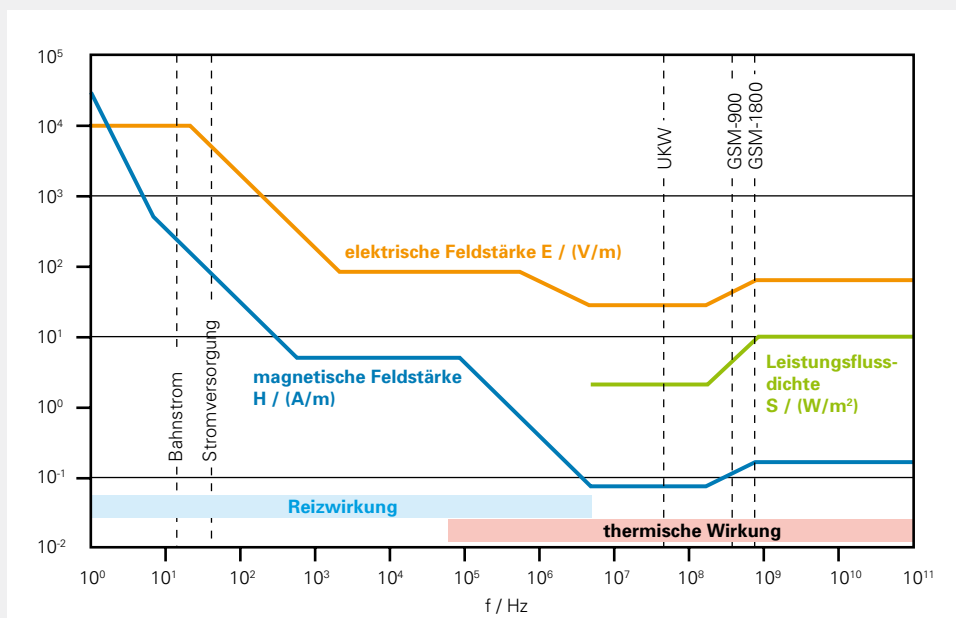
Frequenz in Hz	Elektrische Feldstärke in kV/m	Magnetische Flussdichte in μT
50	5	100
16 2/3	10	300

GRENZWERTE FÜR HOCHFREQUENZANLAGEN GEMÄSS DER 26. BIMSCHV

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

Für f ist der Zahlenwert in der Einheit MHz einzusetzen

Der Grenzwert ist teilweise frequenzabhängig (Wurzelfunktion).



Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 1 Hz bis 100 GHz für die Allgemeinbevölkerung (ungestörte Effektivwerte). Quelle: EU, 1999



II. Näher betrachtet

Elektromagnetische Felder im Alltag

1. Physikalische Grundlagen

1.1 ELEKTRISCHE UND MAGNETISCHE FELDER

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

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

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

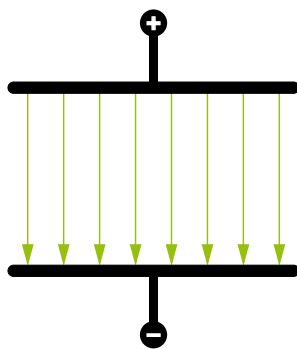
Elektrische Felder werden stark durch ihre Umgebung beeinflusst. Jedes leitfähige Objekt erfährt im elektrischen Feld eine Verschiebung der Ladungsverteilung (Influenz); dadurch wirkt es auf die Form des Feldes zurück. Im Innern eines geschlossenen leitfähigen Raumes („Faradayscher Käfig“) wird das elektrische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

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

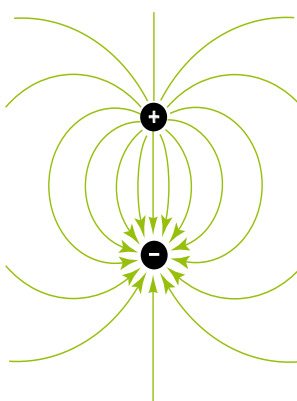
Wirkt ein zeitlich sich änderndes elektrisches Feld auf einen elektrisch leitfähigen Körper ein, so führt der ständige Ladungswechsel im Körper zu einem wechselnden Stromfluss. Der Strom wird in der Einheit Ampere (A) gemessen. Die elektrische Stromdichte gibt den Strom pro Fläche (A/m^2) an.

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

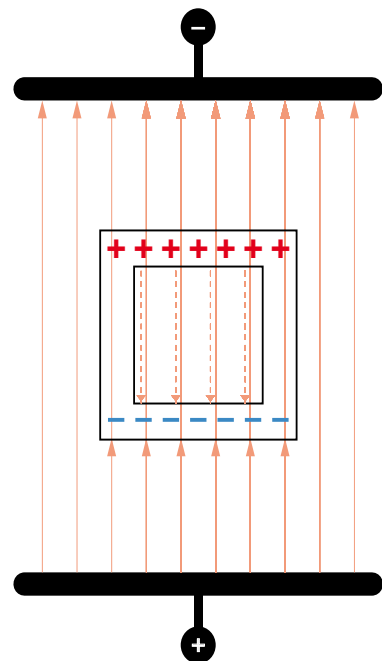
Die magnetische Flussdichte B gibt die



Homogenes elektrisches Feld
(Plattenkondensator; idealisiert)



Inhomogenes elektrisches Feld
zweier Ladungen (Dipol)



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.

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

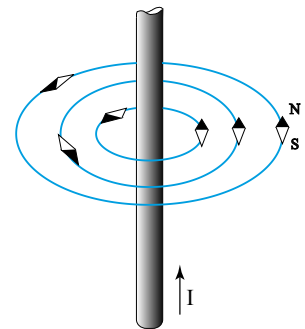
Die Stärke des Magnetfeldes

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

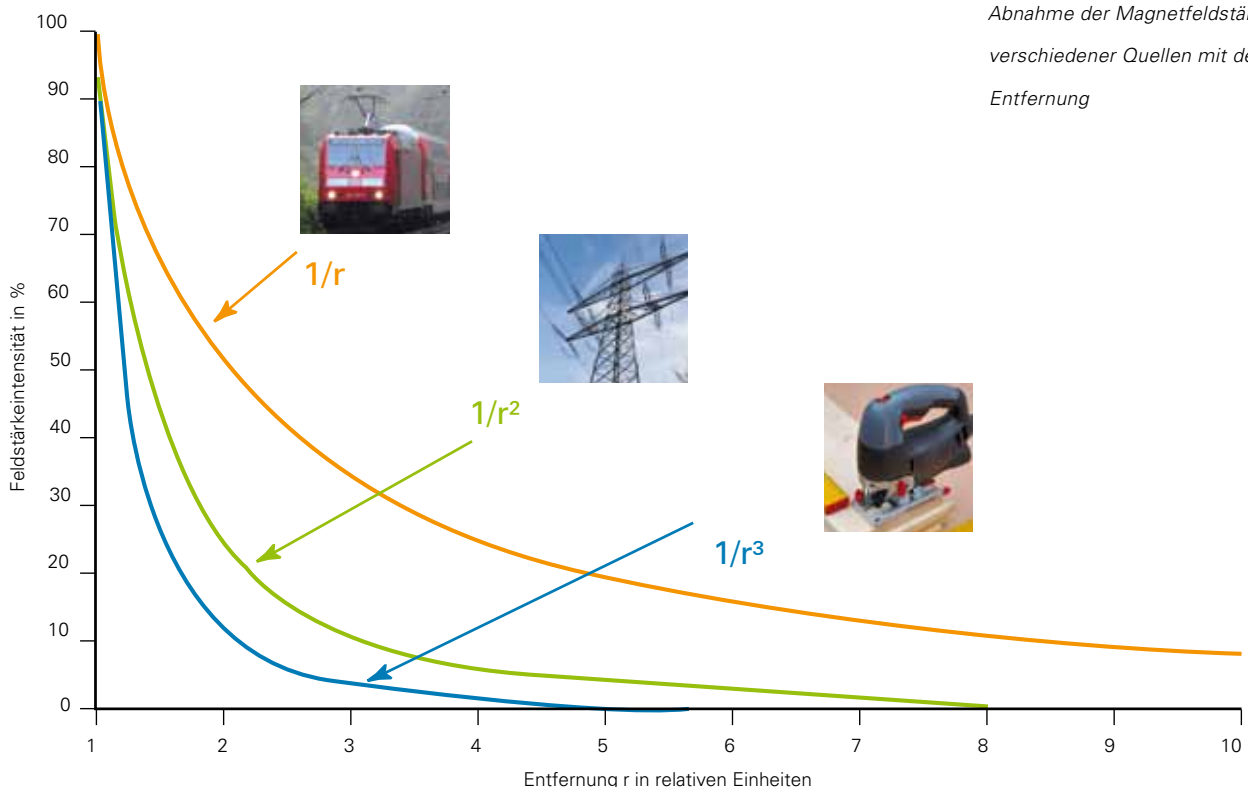
Als Beispiel für ein magnetisches Feld sind

in der Abbildung rechts die Magnetfeldlinien eines geraden, stromdurchflossenen Leiters dargestellt.

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



Magnetfeldlinien eines stromdurchflossenen Leiters



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. Typischer Weise erfolgt dieser Polartätswechsel in Form einer Sinusschwingung, wie sie in der Abbildung unten dargestellt ist.

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

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

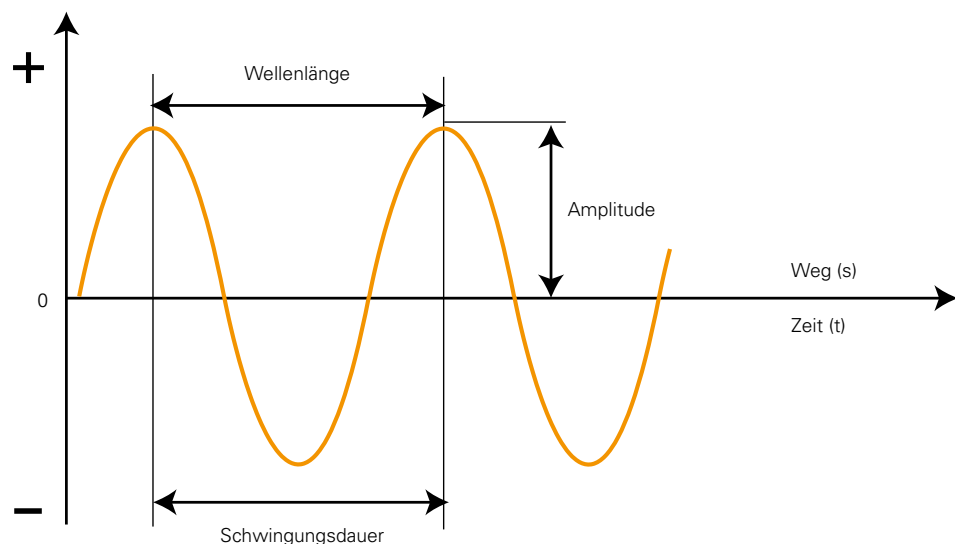
oder zwei Wellentälern wird als **Schwingungsdauer T** bezeichnet und in Sekunden gemessen.

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

Beim Mobilfunk liegt die Frequenz zwischen 900 Millionen Schwingungen und 2 Milliarden Schwingungen pro Sekunde (900 MHz – 2 GHz).

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

Verlauf einer sinusförmigen Welle



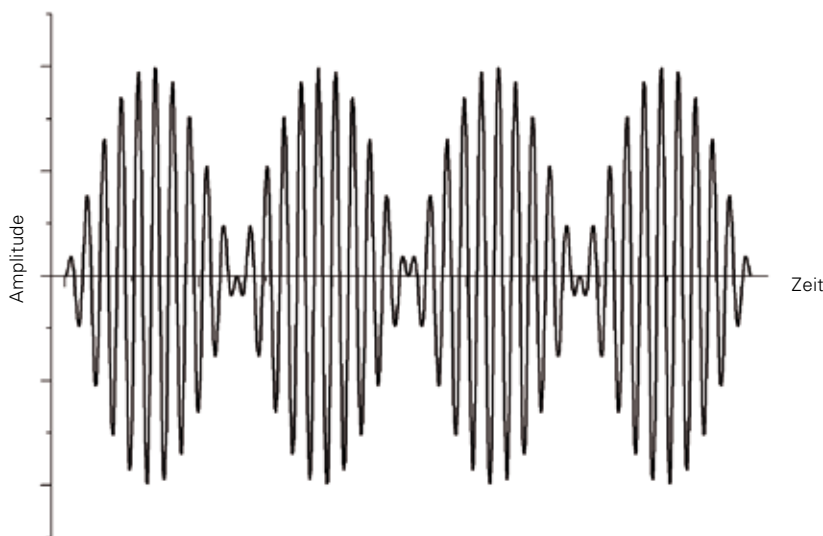
Wellen haben eine **Ausbreitungsgeschwindigkeit**. Bei Wasserwellen liegt sie typisch bei 5 bis 10 m/s, bei Schall beträgt sie 343 m/s (Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20 °C).

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

$$\lambda = T \cdot c$$

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

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



Die einfachste Form einer Modulation: Amplitudenmodulation

1.3 ELEKTROMAGNETISCHES SPEKTRUM

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

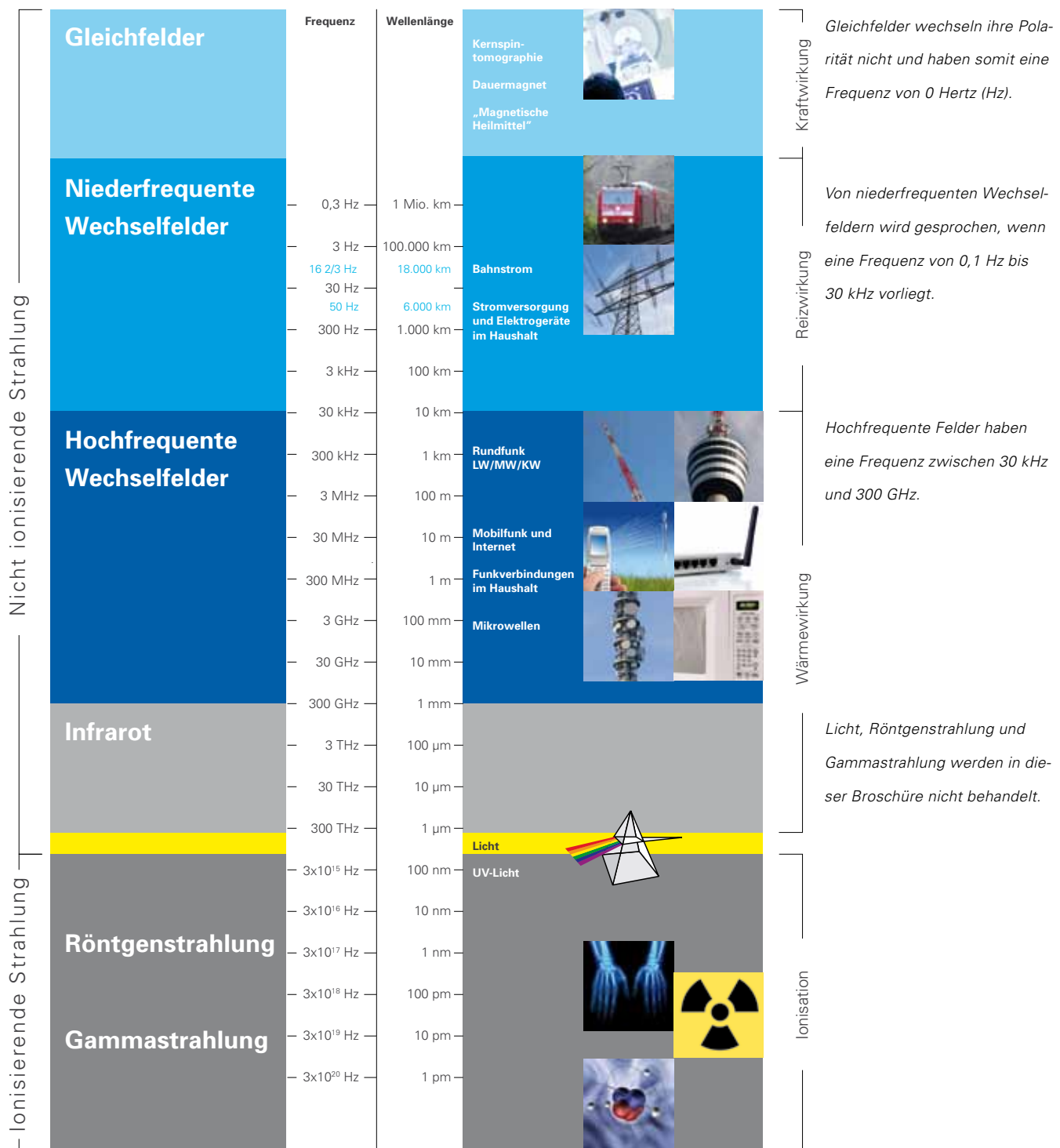
Der physikalische Begriff der elektromagnetischen Wellen bzw. Felder und Strahlen umfasst einen weiten Frequenzbereich (Abbildung rechts). In einer groben Aufteilung wird der Bereich bis etwa 30 kHz als Niederfrequenz und der Bereich von 30 kHz bis 300 GHz als Hochfrequenz bezeichnet. Das Frequenzband von 30 kHz bis 300 MHz wird vielfach als Radiofrequenz, zusammengesetzt aus Langwellen (LW), Mittelwellen (MW), Kurzwellen (KW) und Ultrakurzwellen (UKW), bezeichnet. Im Bereich von 300 MHz bis 300 GHz spricht

man von Mikrowellen. Den Mikrowellenbereich nutzen zum Beispiel Fernsehsender, Mobilfunknetze, Radaranlagen und Mikrowellenherde.

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

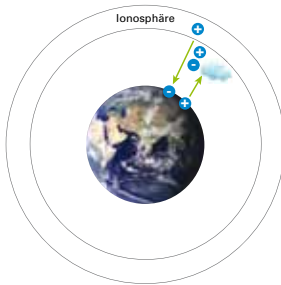
Das elektromagnetische Spektrum kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden: Den der nicht ionisierenden Strahlung und den der ionisierenden Strahlung. Zur ionisierenden Strahlung zählen harte ultraviolette Strahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung, die eine hohe Quantenenergie haben und die Bindungen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

ELEKTROMAGNETISCHES SPEKTRUM

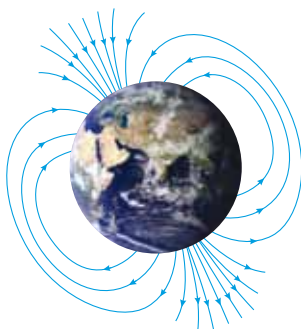


2. Natürliche elektromagnetische Felder

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 8 - 9**



Elektrisches Feld der Erde
(LUBW)



Feldlinien des Erdmagnetfeldes
(schematisch)

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

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

2.1 ELEKTRISCHES FELD IN DER ATMOSPHÄRE

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

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

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

2.2 MAGNETFELD DER ERDE

Die geomagnetischen Pole der Erde fallen nicht genau mit den geographischen Polen der Erde zusammen. Zurzeit ist die Achse des geomagnetischen Dipolfeldes um etwa $11,5^\circ$ gegenüber der Erdachse geneigt. Dies führt dazu, dass ein Kompass an den meisten Orten nicht genau nach Norden zeigt. Man nennt diese Abweichung auch Ortsmissweisung.

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

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

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

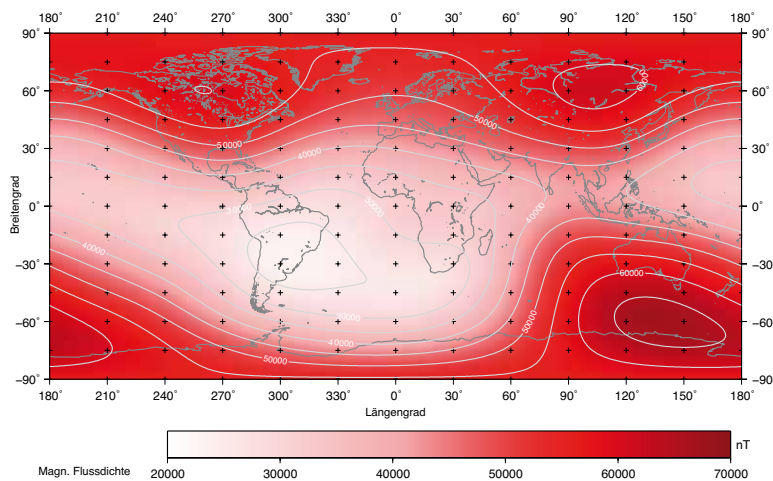
Das Erdmagnetfeld setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

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

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

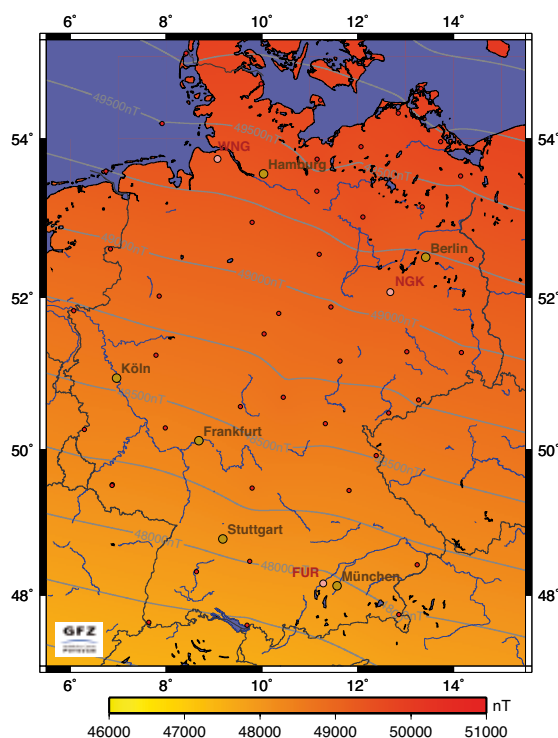
- Effekte der äußeren Atmosphäre (Magnetosphäre und Ionosphäre, Anteil ca. 2 %), die sich unter dem Einfluss der Sonneneinstrahlung und des Sonnenwindes ständig ändern.

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



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

Quelle: GeoForschungsZentrum Potsdam, Stand 2006



Magnetische Feldstärke in Deutschland im Jahr 2006

Quelle: GeoForschungsZentrum Potsdam, Stand 2006



Polarlicht

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

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

Bei einigen höheren Lebewesen, auch bei Wirbeltieren, wurden Magnetosome im Bereich der Ohren oder im Gehirn nachgewiesen. Möglicherweise spielen sie auch hier eine Rolle bei der Orientierung im 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 entstehen auf der Erde etwa eine Million Blitze, die in geringem Maße zum Erdmagnetfeld beitragen. In Deutschland wurden im Jahr 2007 insgesamt 2,6 Millionen Blitze registriert [4]. In unmittelbarer Nähe eines Blitzes können magnetische Flussdichten von bis zu 1000 μT 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.

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. Die Erde reflek-

tiert auf der Tagseite die Sonnenstrahlung, kann dagegen selbst nur langwellige Wärmestrahlung mit Wellenlängen von 10 bis 100 µm abstrahlen, da sie mit durchschnittlich 15 °C eine weitaus niedrigere Oberflächentemperatur aufweist als die Sonne.

Natürliche elektromagnetische Felder und ihre Feldstärken bzw. Flussdichten

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



Blitze verursachen starke elektromagnetische Impulse und Magnetfelder.

3. Niederfrequente und statische Felder

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 16 - 21**

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

3.1 ELEKTRISCHE UND MAGNETISCHE GLEICHFELDER

Elektrische Gleichfelder treten bei vielen Elektrogeräten und Maschinen als Nebenprodukt auf, meist sind sie sehr schwach. Im **öffentlichen Nahverkehr** werden Straßenbahnen, U-Bahnen und Stadtbahnen meist mit 750 V Gleichspannung betrieben. Zwischen der Oberleitung und der Schiene tritt ein elektrisches Gleichfeld auf. Mit Gleichstrom fahren auch die S-Bahnen in Hamburg (1.200 V) und Berlin (750 V). Alle anderen deutschen S-Bahnen fahren wie auch die Fernbahnen mit dem 16,7 Hertz-Wechselstrom der Deutschen Bahn. Aufgrund der niedrigen Fahrdrachtspannungen treten in unmittelbarer Nähe der Nahverkehrsstrecken nur geringe elektrische Feldstärken von weniger als 50 V/m auf. Im Fahrzeuginnenraum der Straßen- oder U-Bahnen wird das elektrische Feld nahezu vollständig abgeschirmt (Effekt des Faradayschen Käfigs).

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

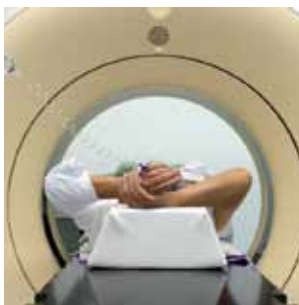
Röntgenröhre oder Verstärker-röhren, die vor der Erfindung des Transistors noch in jedem Radio verbaut waren.

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

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

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

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



Kernspintomographie



Magnetschwebbahn

Sie werden u. a. eingesetzt in

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

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

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

Supraleitende Magnete sind eine beson-

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

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



Spielzeugmagnete



Lautsprecher

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

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

3.2 NIEDERFREQUENTE FELDER

3.2.1 BAHNSTROM 16,7 HZ

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

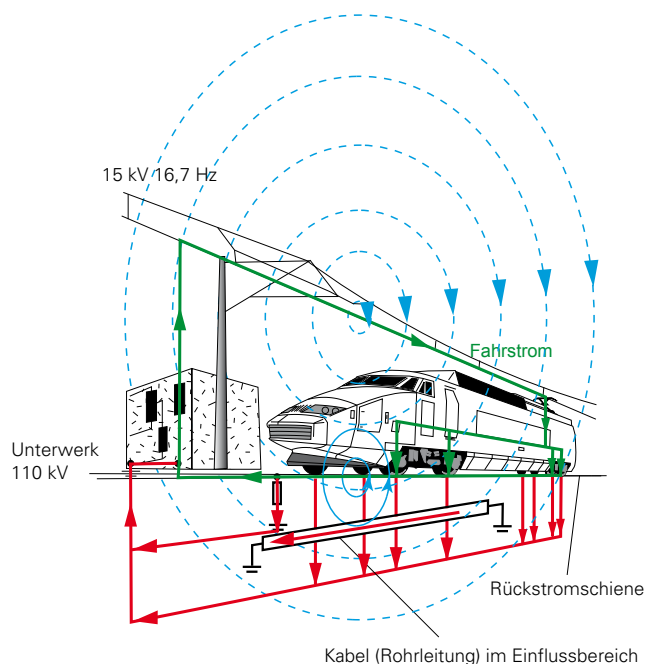
Das Stromsystem der DB erfordert eine eigene „Stromwelt“, die vom Kraftwerk über ein Hochspannungs-Verteilungsnetz bis zu den Umspannstationen exklusiv für diese Frequenz konzipiert ist. Das bahneigene 110-kV-Hochspannungsnetz mit einer Länge von rund 7.600 km (DB Energie GmbH, Stand 2004) verbindet Kraft-, Umformer- und Umrichtwerke mit Bahnunterwerken, in denen der 110-kV-Bahnstrom auf 15 kV heruntertransformiert wird. Vom Bahnunterwerk gelangt der Strom direkt in die 15-kV-Oberleitungen und über den Abnehmer zum Zug. Als Rückleiter dienen die Schienen (s. Abbildung unten).

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

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

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

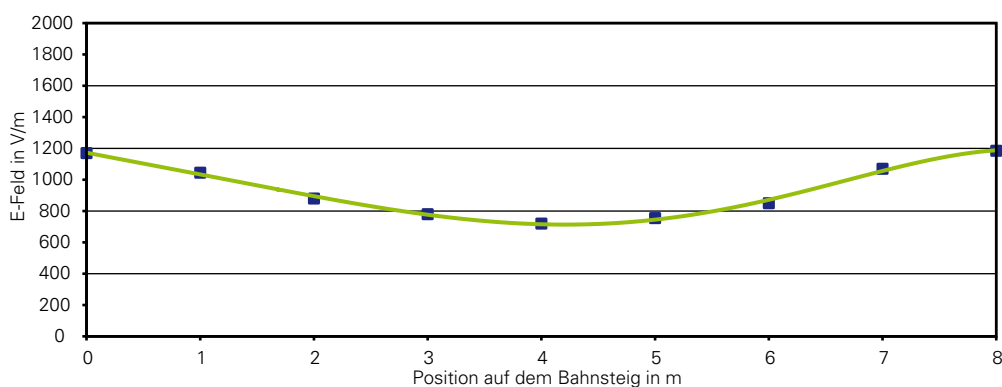
Stromkreise des Bahnstroms



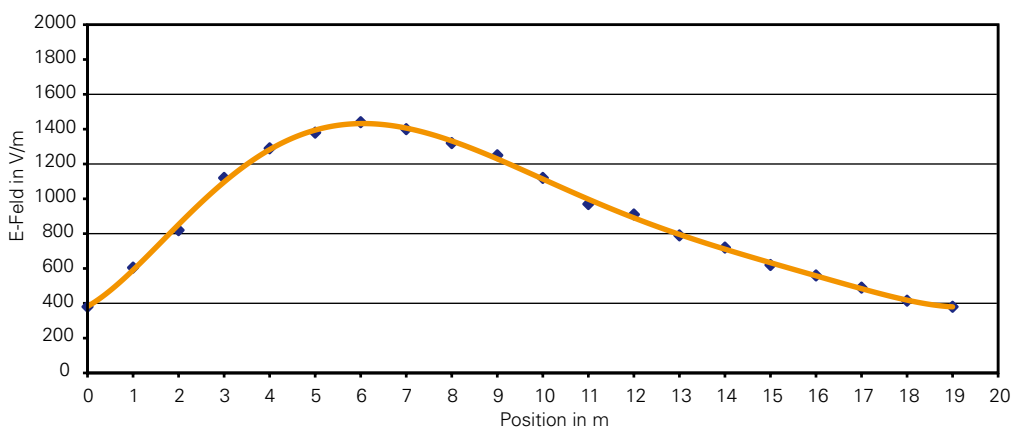
Die entgegen gerichteten magnetischen Felder des Hin- und Rückleiters kompensieren sich nur in geringem Maße, da der Abstand der beiden Leiter (Oberleitung und Schiene) anders als bei Freileitungen relativ groß ist. Dadurch nimmt die magnetische Flussdichte mit dem Abstand langsamer ab. Hinzu kommt,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

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

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



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



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

Quelle: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

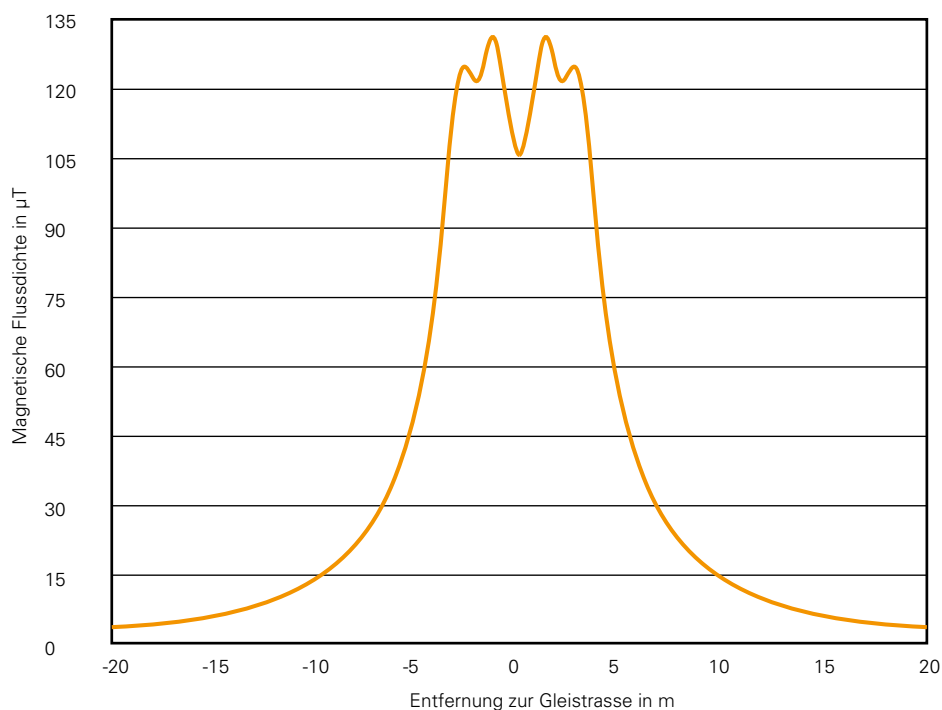
**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 16 - 21**

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

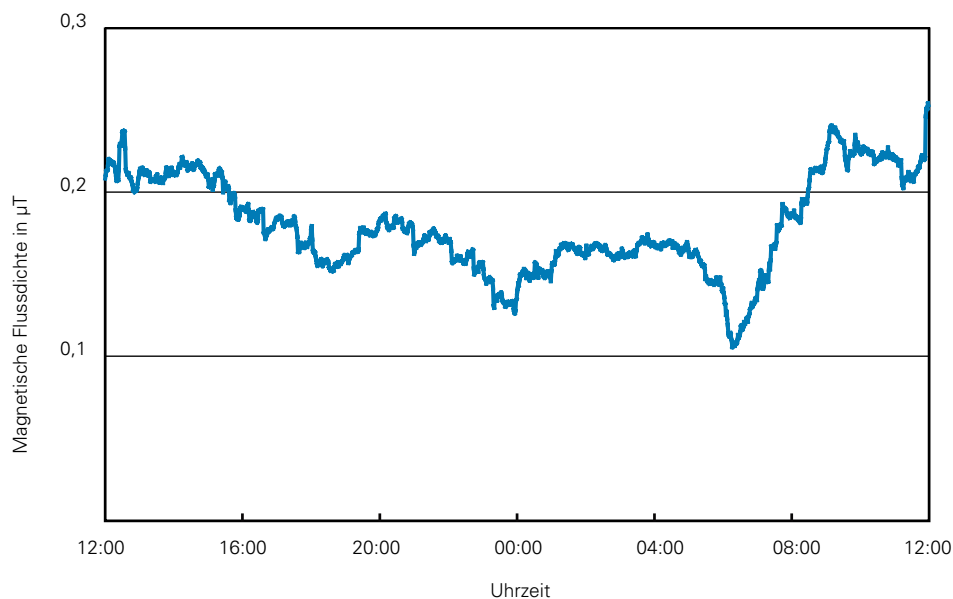
Natürlich unterliegen die Magnetfelder entlang der Eisenbahnstrecken tageszeitlichen Schwankungen. Zur Ermittlung des tageszeitlichen Verlaufs und der Abnahme

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

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



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



3.2.2 ÖFFENTLICHE STROM- VERSORGUNG 50 HZ

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

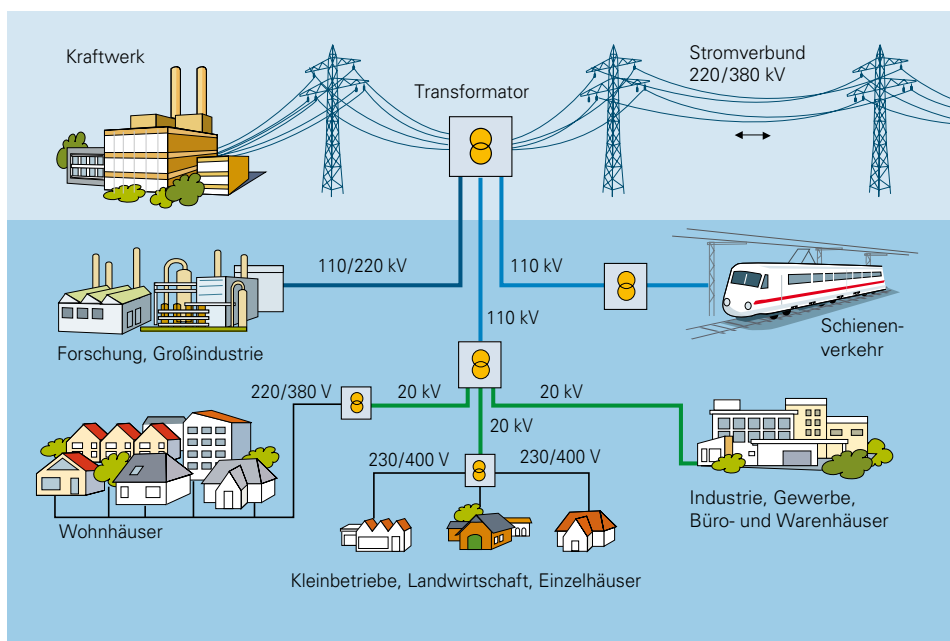
$$P = U \cdot I$$

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

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

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

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



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

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 16 - 21**

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

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

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

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

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

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

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

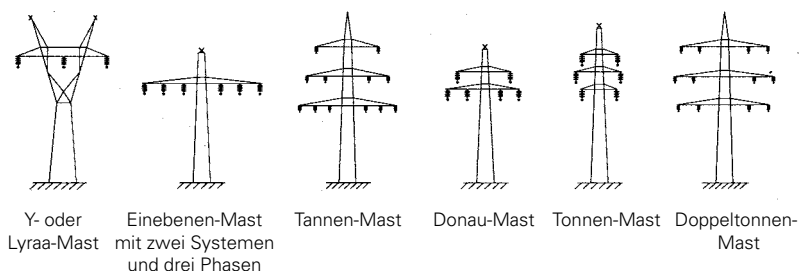
Da sich der Seildurchhang, bedingt durch Temperatur und Eisbelag, und der Stromfluss ständig ändern, kann man mit Messungen nur momentane Feldstärken von Freileitungen ermitteln. Deshalb werden Feldberechnungsprogramme wie z. B. WinField zur Ermittlung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen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

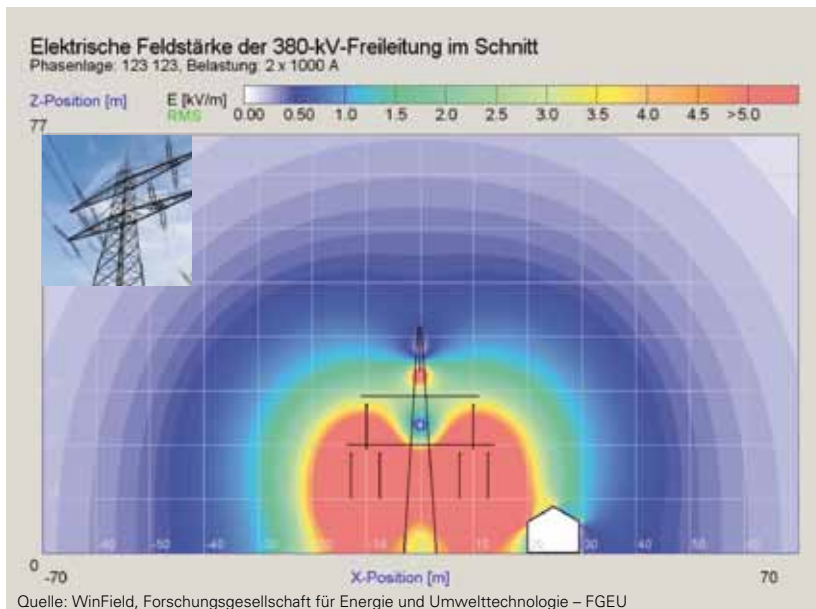
Die Abbildungen rechts zeigen beispielhaft, welche elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten unterhalb von Freileitungen auftreten können. Aus der Abbildung rechts oben ist der Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer Freileitung ersichtlich. In Bodennähe sind die höchsten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

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

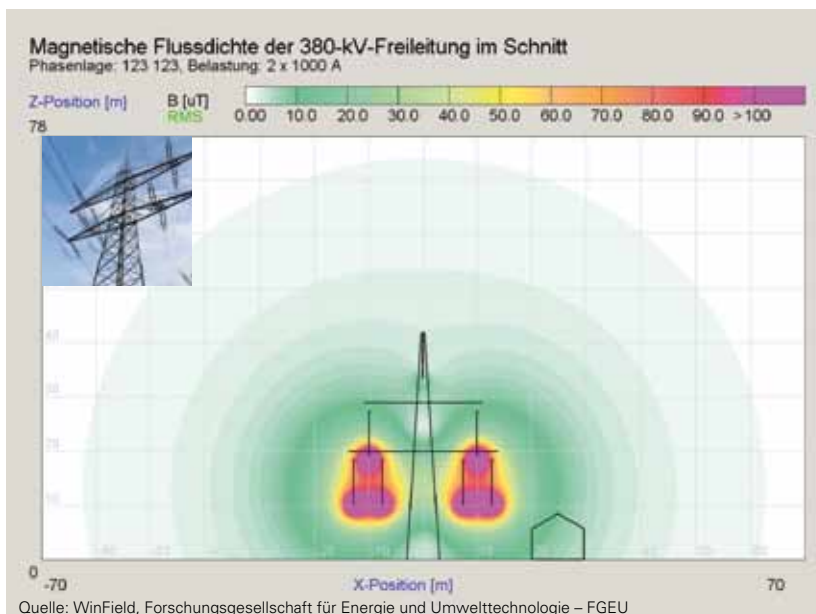
Im Gegensatz zum elektrischen Feld lässt sich das Magnetfeld nur mit großem Aufwand abschirmen. Das Magnetfeld kann aber durch eine günstige Anordnung der Leiterseile und eine so genannte Phasenoptimierung reduziert werden. Dabei macht

Beispiele für Mastformen von Freileitungen





Oben: Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Umgebung einer 380-kV-Freileitung



Unten: Verlauf der magnetischen Flussdichte in der Umgebung einer 380-kV-Freileitung

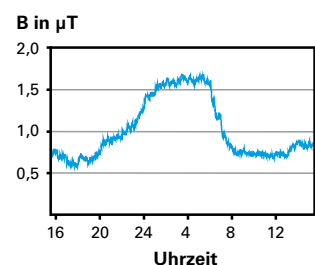
man sich den Umstand zunutze, dass in den verschiedenen Leitern zueinander zeitlich versetzte Wechselströme fließen, man spricht von Dreiphasen-Wechselstrom.

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

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

höher sein als in Zeiten geringen Strombedarfs.

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

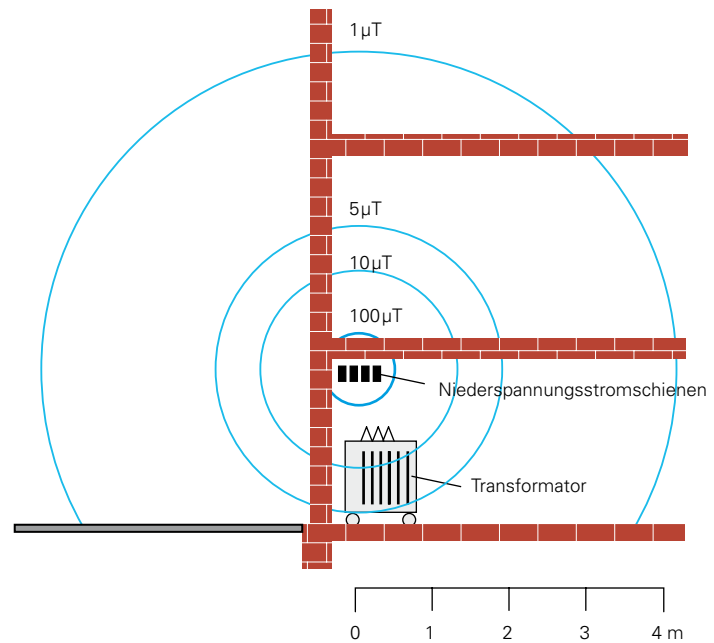


Gasisolierte Rohrleitung: Querschnitt durch ein GIL-Rohr der zweiten Generation. Der Stromführende Leiter befindet sich in der Mitte, außen das Mantelrohr mit einem Stützenpaar.

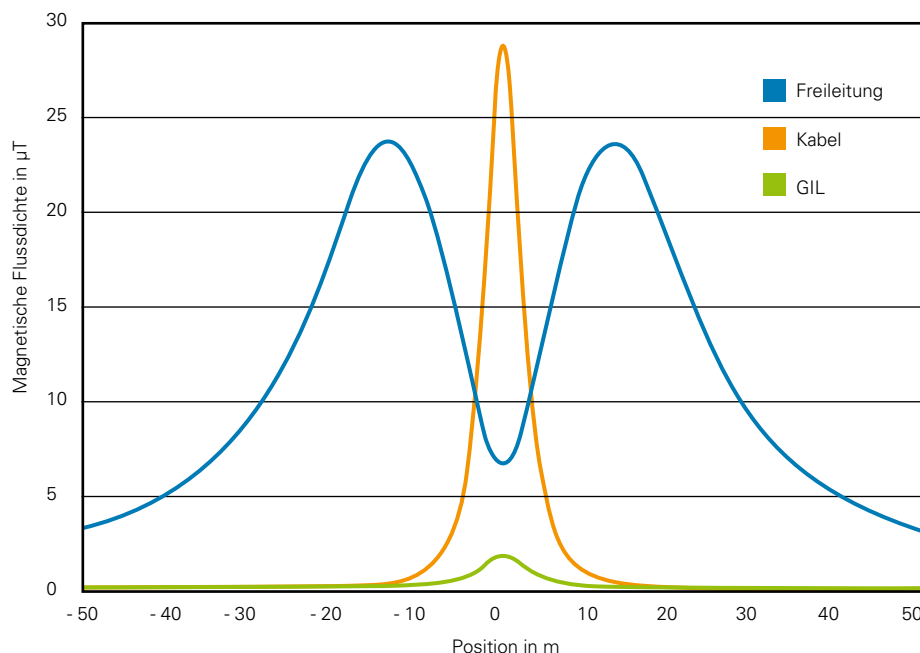
Quelle: Siemens

Erdkabel [9]. GIL weisen geringe Übertragungsverluste auf; sie sind auch im Fehlerfall absolut dicht und brennen nicht. Gas-isolierte Rohrleiter sind wie Kabel deutlich teurer als Freileitungen und finden ihre Anwendung hauptsächlich in der Spannungsebene 380 kV im Leistungsbereich über 1000 MVA.

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



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



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

3.2.3 FELDER IM HAUSHALT

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Gerade bei einem kontinuierlichen Betrieb sollte auf genügenden Abstand zu Dauer-
aufenthaltsorten geachtet werden. Die
Felder nehmen jedoch mit der Entfernung
sehr schnell ab. In der Tabelle auf Seite 21
ist die Stärke des magnetischen Feldes bei
verschiedenen Abständen von einigen
Haushaltsgeräten aufgeführt. Allerdings
können die Emissionen der Geräte je nach
Hersteller z. T. erheblich schwanken. Anga-
ben zu Mikrowellengeräten finden sich im
Kapitel 4.

Magnetfeldexposition in Bayern (24 Stunden-Mittelwerte)

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

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

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

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 16 - 21**



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

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

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

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

28 bis 63 kHz umwandelt. Deshalb treten bei Energiesparlampen auch Felder in diesem Frequenzbereich auf. Messungen des Bayerischen Landesamts für Umwelt und des Bundesamts für Strahlenschutz an 43 verschiedenen Energiesparlampen haben ergeben, dass die derzeit gültigen internationalen Grenzwerte (WHO, ICNIRP) eingehalten werden [10]. Allerdings ist die Ausschöpfung der Referenz- bzw. Grenzwerte um ein Vielfaches höher als bei der Glühlampe. Dies bestätigen auch Simulationsrechnungen. Abschirmmaßnahmen durch geerdete Lampenschirme sowie technische Maßnahmen an den Lampen könnten die elektromagnetischen Felder deutlich vermindern. Das würde jedoch u. a. voraussetzen, dass Leuchten durchgängig mit Schutzleiteranschluss und metallischen Schirmen ausgestattet sind. Körpernahe Lampenanordnungen ohne geerdeten Schirm (Schreibtisch, Leselampe) sind hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Felder als nicht optimal anzusehen, da die Werte unter bestimmten Bedingungen bis zu 30 % der zulässigen internationalen Grenzwerte erreichen.

Eine Alternative besonders für Nachttisch- oder Schreibtischlampen sind strahlungsarme Energiesparlampen (siehe Abbildung links), die eine spezielle Beschichtung des Glaskolbens und besondere elektronische Komponenten besitzen. Ihr elektrisches Feld ist im Vergleich mit einer normalen Energiesparlampe gleicher Leistung um etwa 80 % bis 90 % kleiner.

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

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

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

Auch Träger von elektronischen Implantaten sollten Induktionskochherden nicht

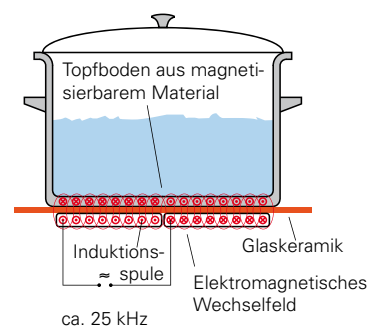
zu nahe kommen. Es gibt Hinweise, dass magnetische Streufelder von Induktionskochherden auf kurze Distanz elektronische Implantate beeinflussen können. Im Fall von unipolaren Herzschrittmachern liegen konkrete Hinweise auf Gefährdung vor. Dabei sind auch die Ableitströme zu berücksichtigen. Personen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

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

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



Induktionsherd



Funktionsweise eines Induktionsherdes (schematisch)

Quelle: LMU München

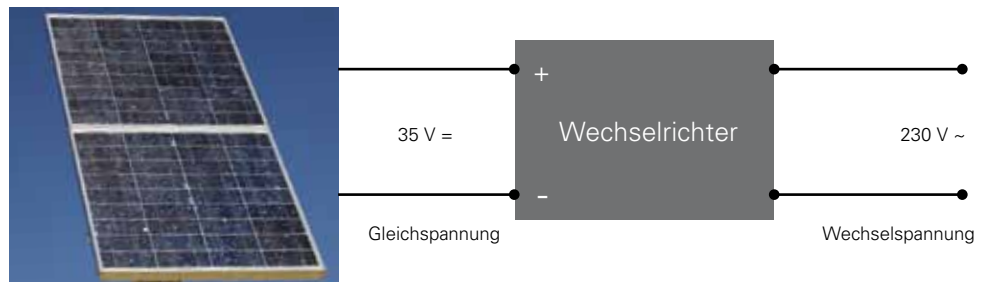
**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 16 - 21**

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

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

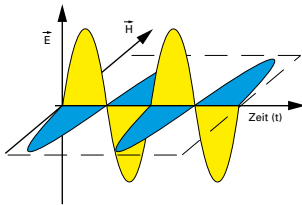
Die erzeugte Gleichspannung wird durch Wechselrichter in die erforderliche 50 Hz-Wechselspannung umgewandelt (siehe Abbildung unten). Dadurch entstehen Wechselfelder, die neben den 50 Hz-Anteilen auch elektronisch bedingte höherfrequente Anteile im kHz-Bereich enthalten. Art und Intensitäten der Wechselfelder hängen stark von den verwendeten Bauteilen und der übrigen Konstruktion der Anlage ab. Durch einen durchdachten Aufbau der Anlage können die Immissionen stark minimiert werden. Beispielsweise sollte der Wechselrichter nicht in unmittelbarer Nähe von Daueraufenthaltsbereichen liegen. Es ist daher sinnvoll, Hersteller und Lieferanten frühzeitig darauf anzusprechen.

Prinzip einer Photovoltaikanlage



4. Hochfrequente Felder

Kompakte Informationen zum Thema finden Sie auf Seite 22 - 31



Elektromagnetische Wellen im Fernfeld

4.1 GRUNDLAGEN UND MESSGRÖSSEN

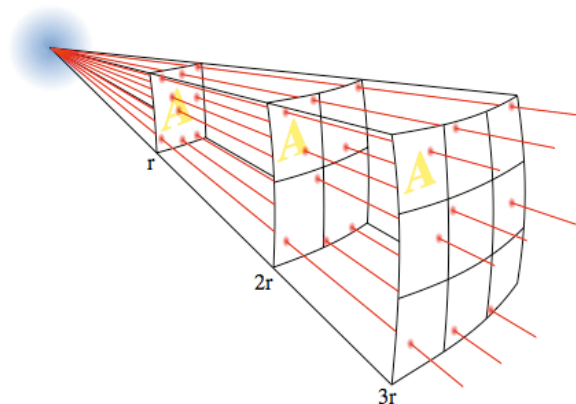
Während niederfrequente Wechselfelder meist unerwünschte Nebeneffekte bei der Übertragung und Nutzung elektrischer Energie sind, werden hochfrequente elektromagnetische Felder in der Regel absichtlich erzeugt. Im Niederfrequenzbereich können elektrische und magnetische Felder getrennt betrachtet werden,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

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

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

$$S = E \cdot H$$

Die Leistungsflussdichte nimmt mit dem Abstand quadratisch ab (symbolisch).



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

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

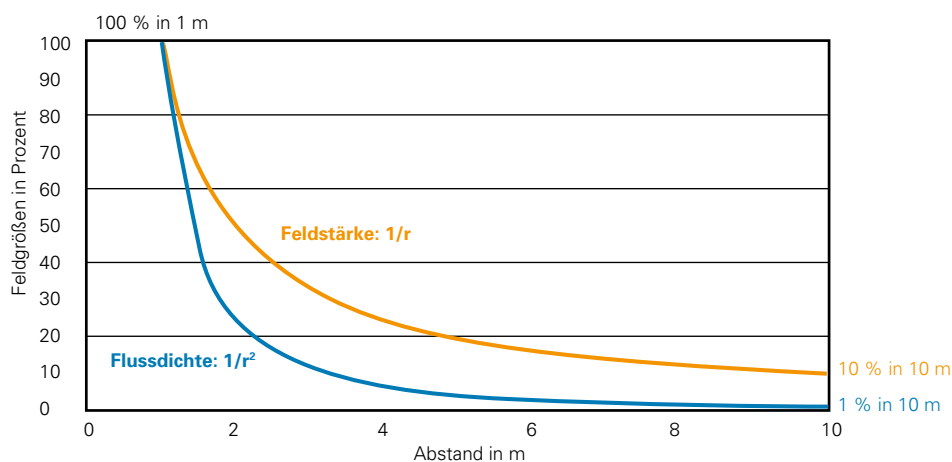
Dabei bedeutet Z_0 den Feldwellenwiderstand im Fernfeld, das sind 377 Ohm.

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

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

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

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



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

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 22 - 31**



Abblendlicht beim Auto

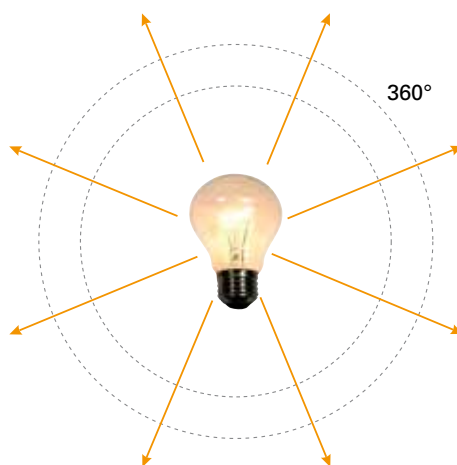
Die Leistung einer Sendeantenne wird nicht gleichmäßig in alle Richtungen (isotrop) abgegeben, sondern **gebündelt abgestrahlt**. Das funktioniert wie bei einem Scheinwerfer, bei dem durch die Bündelung das Licht in Hauptstrahlrichtung viel heller ist, als bei einer Lampe ohne Reflektor. Dafür strahlt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

Ein isotroper Mobilfunksender würde 50 % der Sendeleistung in den Himmel abstrahlen und 48 % auf den Boden in der unmittelbaren Umgebung des Senders. Damit würden etwa 98 % der Sendeleistung verloren gehen. Mobilfunkantennen werden deshalb so gebaut, dass sie die Strahlungsleistung fächerförmig in einer Ebene parallel zum Erdboden bündeln. Der Hauptstrahl ist dabei meist ein wenig (ca. 2° bis 3°) nach unten geneigt, so dass er je nach Montagehöhe der Antenne in ca. 150 bis 250 m Entfernung vom Sender den Boden trifft. In Hauptstrahlrichtung strahlt eine Mobilfunkantenne typischerweise 30-fach stärker als es eine isotrope Antenne gleicher Leistung tun würde. Hier spricht man vom **Antennengewinnfaktor $G = 30$** .

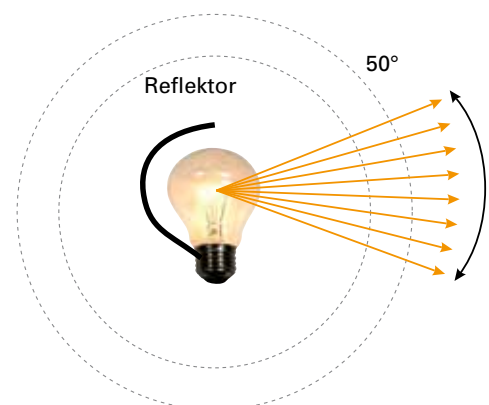
Die **Strahlungsleistung** von Antennen wird auf einen isotropen Strahler bezogen, man spricht dann von **EIRP** (Equivalent Isotropically Radiated Power, Äquivalente isotrope Strahlungsleistung). Die EIRP ist eine fiktive Größe, die angibt, mit welcher Sendeleistung man eine in alle Raumrichtungen gleichmäßig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

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

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



Gleichmäßige (isotrope) Abstrahlung



Gebündelte Abstrahlung (Scheinwerfer)

4.2 ZULASSUNG UND ÜBERWACHUNG VON FUNKSENDEANLAGEN

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

In der Standortbescheinigung werden Sicherheitsabstände festgelegt. Dabei werden auch die am Standort durch umliegende Funksendeanlagen bereits vorhandenen elektromagnetischen Felder berücksichtigt. Außerhalb der Sicherheitsabstände

sind die Grenzwerte der 26. BImSchV (siehe Kapitel „Grenzwerte“) selbst bei Volllast aller installierten Sendeantennen eingehalten.

In Baden-Württemberg wurde für 9.958 Standorte von ortsfesten Funksendeanlagen eine Standortbescheinigung erteilt, in Bayern waren es 12.259 Standorte. Davon waren 7.809 Standorte in Baden-Württemberg und 9.995 Standorte in Bayern, an denen sich mindestens eine Mobilfunksendeanlage befand (Oktober 2008) [12].

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

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

Anlage	Frequenz (MHz)	Sendeleistung (Watt)
Rundfunksender (Langwelle)	0,15 bis 0,28	bis 2.000.000
Rundfunksender (Mittelwelle)	0,53 bis 1,61	bis 1.000.000
Rundfunksender (Kurzwellen)	3,90 bis 26,1	bis 500.000
Amateurfunkdienst	Alle Frequenzbereiche	1 bis 750
Rundfunksender (Ultrakurzwellen)	87,5 bis 108	10.000 bzw. 160.000 (EIRP)
BOS-Funk (z. B. Polizei, Feuerwehr)	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 76 und 480	< 12
Betriebsfunk	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 35 MHz und 470 MHz	< 12
Digital Radio (VHF III)	174 bis 230	1.000 bzw. 16.000 (EIRP)
Digitales Fernsehen (DVB-T)	470 bis 862	10.000 bzw. 160.000 (EIRP)
Mobilfunk-Basisstation (GSM-900)	921 bis 960	10 bis 50 (je Kanal)
Mobilfunk-Basisstation (GSM-1800)	1.805 bis 1.880	10 bis 40 (je Kanal)
Mobilfunk-Basisstation UMTS-2000	2.110 bis 2.170	10 bis 20 (je Kanal)
Richtfunk	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 6.000 und 38.000	0,1 bis 1
Radar (Luftüberwachung und Militär)	Ausgewählte Frequenzbereiche zwischen 1.000 und 12.000	bis 2.000.000 (Impulsleistung)
Satellitenfernsehen	10.700 bis 12.750	150 bzw. 200.000 (EIRP)

4.3 MOBILFUNK

4.3.1 DER MOBILFUNK-BOOM

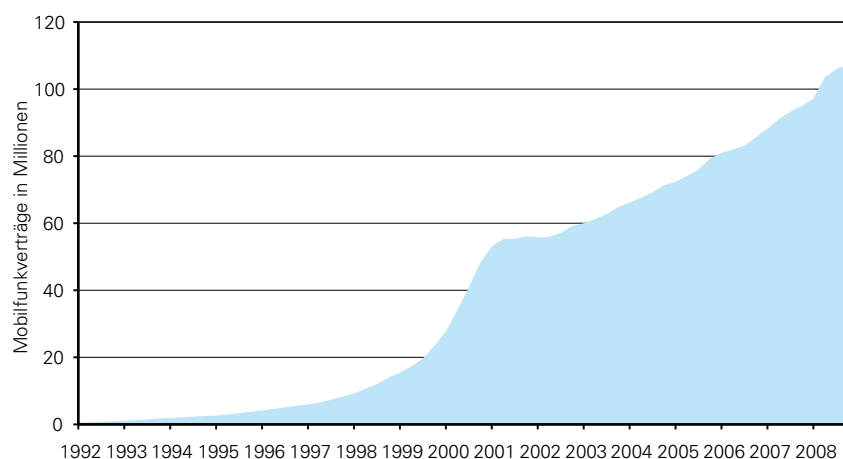
Die Anfänge des analogen Mobilfunks in Deutschland mit dem A-Netz gehen auf das Jahr 1958 zurück. Es folgten 1972 das B-Netz und 1984 das C-Netz. Mit der Einführung des digitalen D-Netzes (GSM-900) im Jahr 1992 und des digitalen E-Netzes (GSM-1800) im Jahr 1994 wurde die Grundlage für den weltweiten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

Heutige Mobilfunktelefone arbeiten überwiegend nach dem GSM-Standard (Global System for Mobile Communications), der neben einer guten Übertragungsqualität auch Datenanwendungen ermöglicht. Seit 2002 wird in Deutschland das UMTS-Netz ausgebaut, das mittlerweile in weiten Flächen verfügbar ist. Mit UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) und HSPA (High Speed Packet Access, seit 2006) ist mobiles Internet-Surfen mit hoher Geschwindigkeit möglich. Bereits heute können Daten mit bis zu 7,2 MBit/s übertragen werden.

Insgesamt betreuen die vier deutschen Netzbetreiber nach Angaben der Bundesnetzagentur über 107 Millionen Mobilfunkverträge [12]. Der Weltmarktanteil von GSM inkl. UMTS am Mobilfunkmarkt liegt nach Angaben der GSA (Global mobile Suppliers Association) über 89 %, das entspricht 3,54 Mrd. aktiven SIM-Karten [14]. Diese Zahlen geben den Stand von Dezember 2008 wieder.

In Folge des ständig steigenden Angebots und der starken Nachfrage nach Mobilfunkdiensten wächst auch die Belastung der Umwelt durch hochfrequente elektromagnetische Felder. Im Dezember 2007 gab es in Deutschland 62.843 Standorte mit Mobilfunksendern [12], an denen ca. 500.000 Sendantennen installiert sind [15]. So kommt auf 200 Mobilfunkverträge etwa eine Mobilfunksendeantenne. Multipliziert man die 500.000 Mobilfunk-Sendeantennen mit 50 W Sendeleistung pro Antenne, so ergeben sich für ganz Deutschland 25 MW Sendeleistung – mehr als die installierte Rundfunksendeleistung, aber in der selben Größenordnung.

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



4.3.2 NETZSTRUKTUR

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

Verantwortlich für die Versorgung einer Funkzelle ist die Basisstation. Basisstationen sind die Schaltschränke neben oder unterhalb einer Mobilfunkantenne, die per (Glasfaser-) Kabel oder Richtfunk mit dem Mobilfunknetzwerk verbunden sind. Jede Mobilfunkbasisstation kann einen Umkreis von einigen hundert Metern bis zu mehreren Kilometern abdecken. Die theoretische Reichweite von GSM beträgt 37,8 km, an den Küsten bis zu 70 km. Hier wird das Funksignal zur Reichweitensteigerung leicht verändert, da nur wenige Benutzer in einem großen Gebiet versorgt werden müssen.

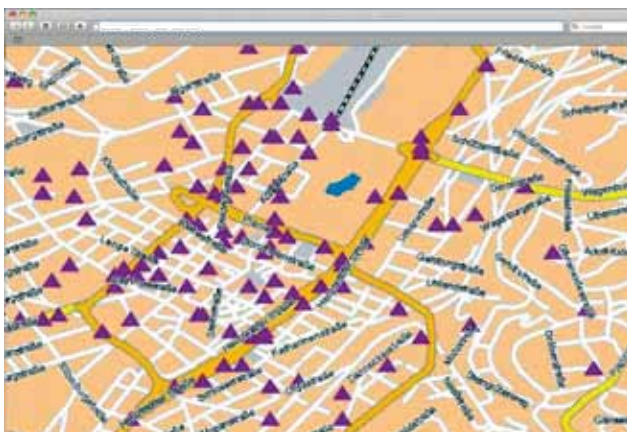
Die meisten Mobilfunkzellen sind jedoch nicht reichweitenbegrenzt, sondern kapazitätsbegrenzt. Jede Basisstation kann nur eine bestimmte Anzahl von Gesprächen (ca. 20 bis 90) gleichzeitig übertragen. Bei Datenverbindungen sinkt die Zahl der gleichzeitigen Nutzer auf 2 bis 20 (14,4 MBit/s, zwei Nutzer entsprechen 7,2 MBit/s). Die Größe einer Funkzelle ergibt sich daher direkt aus der Teilnehmerdichte. Innerstädtisch sind die Sendemasten deshalb in Abständen von wenigen hundert Metern aufgestellt.

Neueste Entwicklung sind die UMTS-Femtozellen – häusliche Basisstationen, die wie WLAN-Router einen Zellradius von wenigen Metern haben und so auf kleinstem Raum hohe Kapazitäten zur Verfügung stellen können. Diese Klein- und Kleinstsender arbeiten mit sehr niedrigen Sendeleistungen von 1 W und weniger. Aus Sicht des Immissionsschutzes sind solche kleinmaschigen Netze zu begrüßen, da sie mit einer insgesamt niedrigeren Strahlungsleistung mehr Gespräche und Daten übertragen können als große zentrale Stationen mit Sendeleistungen von mehreren 100 W oder 1.000 W (EIRP).

Standorte genehmigungspflichtiger Mobilfunkbasisstationen in zwei Gebieten der Landeshauptstadt Stuttgart. Quelle: Bundesnetzagentur, EMF-Datenbank [13]

▲ An diesem Standort befindet sich ein genehmigungspflichtiger Sender.

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



Ausschnitt Stuttgart Zentrum (hohe Senderdichte)
Bildbreite entspricht ca. 2,3 km



Ausschnitt Sigmaringen (geringere Senderdichte)
Bildbreite entspricht ca. 2,6 km

Auf der Internetseite der Bundesnetzagentur [13] sind alle genehmigungspflichtigen Sender mit mehr als 10 W (EIRP) verzeichnet. Als Beispiel für eine Großstadt ist in Abbildung Seite 77 links die Stuttgarter Innenstadt dargestellt. Hier wird offensichtlich deutlich mehr mobil telefoniert als in einer Kleinstadt. Stellvertretend dafür wurde Sigmaringen mit ca. 16.500 Einwohnern ausgewählt (siehe Abbildung S. 77 rechts).

In den Kartenausschnitten stehen die lila Dreiecke für Standorte von Sendeanlagen. An den grünen Punkten fand in der Vergangenheit eine Messung der Bundesnetzagentur statt. Man kann in den Karten anhand der Sendersichte indirekt ablesen, wie viel an einem Ort typischerweise mobil telefoniert wird.

Senders ist groß: Von 0,5 W (EIRP) einer Mikrozelle bis über 10.000 W (EIRP) an einer Autobahn ist alles möglich. UMTS-2000 kommt systembedingt mit ca. 50 % bis 90 % geringeren Sendeleistungen pro Standort aus, dafür sind deutlich mehr Standorte erforderlich. Für eine 7,2 MBit/s Datenverbindung sollte man nicht weiter als 300 m von Sender entfernt sein; dies führt zu einem 600 m-Standort-Raster.

Hindernisse zwischen Basisstation und Handy, wie Gebäude oder Berge, schwächen die Strahlung stark ab. Dicke Stahlbetonwände oder metallbedampfte Fenster dämpfen die von außen kommende Strahlung teilweise um mehr als den Faktor 1.000 in der Leistungsflussdichte, siehe auch [16].

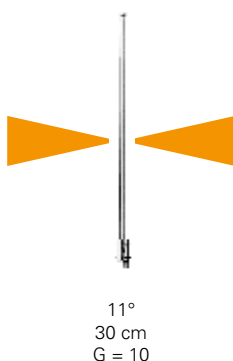
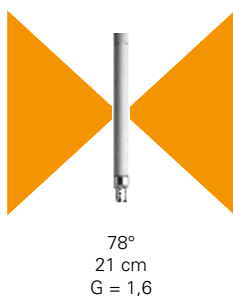
Die Strahlungsleistung einer Mobilfunkstation verändert sich mit der Auslastung. Bei GSM-Anlagen ist die Schwankung relativ klein. Der Steuerkanal (BCCH) eines jeden Sektors sendet immer (24 h) auf voller Leistung, während leistungsgeregelte Gesprächskanäle (TCH) nur bei Bedarf zugeschaltet werden. Dies führt tagsüber typischerweise zu einer 10 % bis 50 % höheren Sendeleistung als zu den Nachtstunden. Stationen mit nur einem Kanal, die im ländlichen Bereich noch recht häufig sind, haben keine auslastungsabhängige Leistungsschwankung. Rein theoretisch kann sich bei Stationen mit vier Gesprächskanälen die Sendeleistung auch um 400 % erhöhen, wenn die vier Kanäle mit voller Leistung zugeschaltet werden. Auch bei UMTS-Anlagen schwankt die Sendeleistung je nach Auslastung. Die Signalisierungssignale, die immer auf voller Leistung gesendet werden, liegen hier bei ca. 20 % der maximal möglichen Leistung.

4.3.3 IMMISSIONEN EINER MOBILFUNKANLAGE

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

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

Die Sendeleistungen von Basisstationen liegen bei GSM-900 zwischen 10 W (je Kanal) in Wohngebieten und bis zu 50 W (je Kanal) entlang von Autobahnen. Bei GSM-1.800 und UMTS-2.000 beträgt die Sendeleistung maximal 40 W (je Kanal). Die Bandbreite möglicher Leistungen eines



Rundstrahlantennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung

Je nach gewünschter Versorgungsreichweite kommen schwach bis sehr stark bündelnde Antennen mit Antennengewinnfaktoren G zwischen 1,6 und ca. 130 zur Anwendung.

Beim Mobilfunk werden, wie in den Abbildungen links und rechts dargestellt, entweder Rundstrahlantennen (Omniantennen) oder Sektorantennen (Panelantennen) eingesetzt: Das Bild unten zeigt die gemeinsame Montage verschiedener Antennen auf einem Mast.

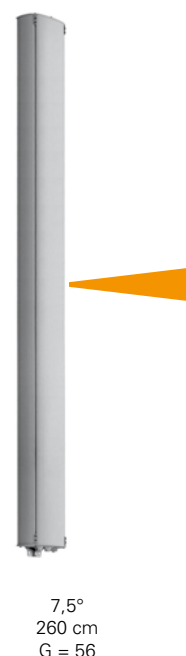
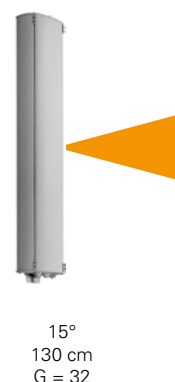
Rundstrahlantennen strahlen kreisförmig in alle Richtungen parallel zum Erdboden gleichförmig ab (omnidirektional) und bündeln nur vertikal. Sie sind sehr dünn und optisch unauffällig. Die Antennenkonstruktion ist sehr preiswert, bietet aber nur eine geringe Übertragungskapazität von 20 bis 30 Telefonaten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



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

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

Die oft vorgetragene Befürchtung, dass große Antennen stärker strahlen oder gefährlicher sind als kleine, ist unberechtigt. Im Gegenteil: Die starke vertikale Bündelung hat zur Folge, dass das bodennahe Umfeld unterhalb der Antenne bzw. die Räume eines Gebäudes, auf dem die Antenne steht, wesentlich geringere Immissionen durch hochfrequente elektromagnetische Wellen erfahren als man dies von der Entfernung her erwarten würde. Deutlich wird dies in der Simulation auf Seite 80 unten.



Sektorstrahlantennen unterschiedlicher vertikaler Bündelung

4.3.4 ABSTRAHLUNG EINER ANTENNE

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

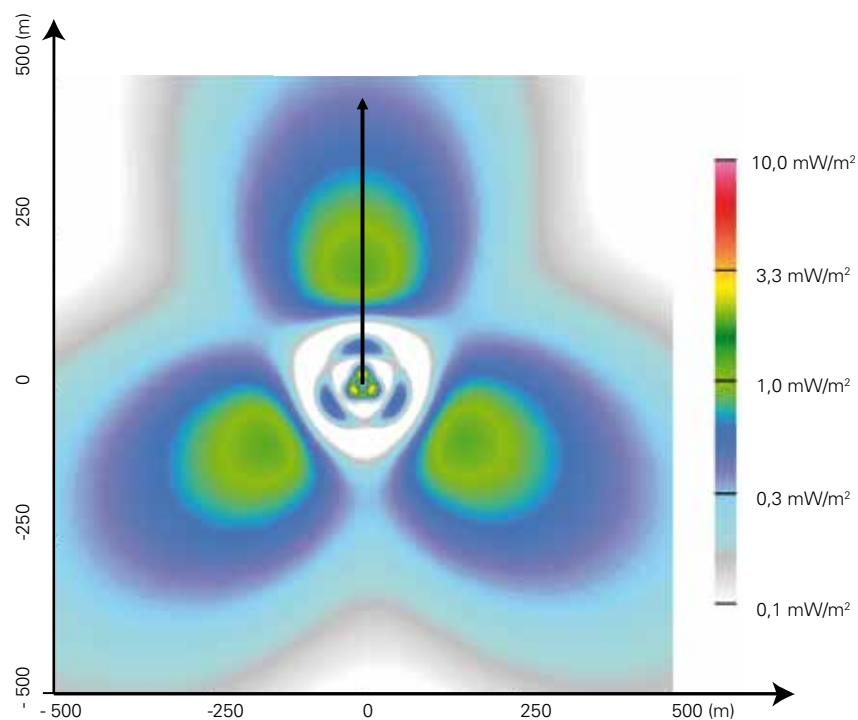
In der Abbildung auf Seite 81 ist deutlich der Hauptstrahl zu sehen, der in einer Entfernung von 150 bis 200 m den Boden trifft. Neben dem Hauptstrahl treten in bestimmten Winkeln so genannte Neben-

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

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

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

Horizontale Bündelung einer
Mobilfunkantenne mit drei Sek-
torantennen



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

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

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

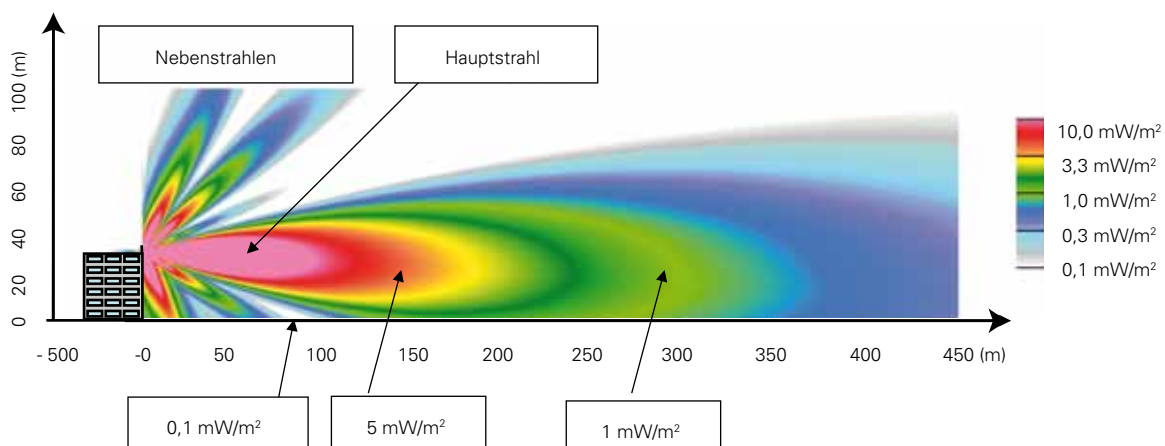
Im nächsten Abschnitt ist näher beschrieben, wie die Leistungsflussdichten in den Abbildungen unten berechnet werden. An einfachsten ist diese Berechnung für die Hauptstrahlrichtung. Dort kann die Leistung EIRP verwendet werden, also das Produkt von Speiseleistung und Antennengewinnfaktor G. Für die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



Antennenkonstellation einer typischen Mobilfunkbasisstation mit drei Sektorantennen.

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

Vertikale Bündelung einer Sektorantenne



Die in Hauptstrahlrichtung einer Antenne und ohne Dämpfung durch Gebäude maximal erreichbaren **Leistungsflussdichten** sind in der Tabelle unten dargestellt. Die sieben Zeilen stehen für beispielhafte Sendeleistungen zwischen 10 W und 10.000 W (EIRP), die fünf Spalten für Leistungsflussdichten zwischen 10 W/m² und 1 mW/m². Die Leistungsflussdichten der Spalten zwei bis vier entsprechen den in Deutschland gültigen Grenzwerten für UMTS-2000 (10 W/m²), GSM-1800 (9 W/m²) und GSM-900 (4,5 W/m²) nach der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV), siehe Kapitel 6.

Für die Berechnung der Tabelle wurde das quadratische Abstandsgesetz

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

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

Betrachtet man einen Punkt außerhalb des Hauptstrahls oder wird der Hauptstrahl durch Gebäude gedämpft, so sind die Werte sehr viel niedriger. Dies gilt ebenso in Gebäuden und an Orten ohne direkten Sichtkontakt zu einem Mobilfunkmast; dort werden Leistungsflussdichten von 1 mW/m² selten erreicht. In Wohnungen liegen typische Werte zwischen 0,0001 mW/m² und 1 mW/m².

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

Leistungsflussdichte in W/m ² bzw. mW/m ² für den berechneten Abstand					
Sendeleistung in Hauptstrahlrichtung in W (EIRP)	10 W/m ² Grenzwert für UMTS-2000	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

4.3.5 MESSUNGEN AN MOBILFUNK-SENDESTATIONEN

Das EM-Institut Regensburg, Prof. Wuschek, hat im Jahr 2004 zusammen mit dem Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) Kamp-Lintfort im Auftrag des LfU Bayern die Umgebung von Mobilfunkmasten untersucht. Die Studie ist auf der Bayerischen LfU-Homepage verfügbar [16].

An 865 Messpunkten bestand freie Sicht auf mindestens eine Mobilfunkbasisstation. Wie in der Abbildung unten zu sehen ist, wird der in Deutschland gültige Grenzwert meist nur zu einem sehr geringen Teil ausgeschöpft. Nur jeder zwanzigste Messpunkt weist eine elektrische Feldstärke von über 10 % des Grenzwertes (GW-E) und damit eine Leistungsflussdichte über 1 % des Grenzwertes (GW-P) auf. Die Werte des Abstandsgesetzes werden weit unterschritten, da Messpunkte in unmittelbarer Nähe der Basisstation fast immer außerhalb des Hauptstrahls liegen.

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

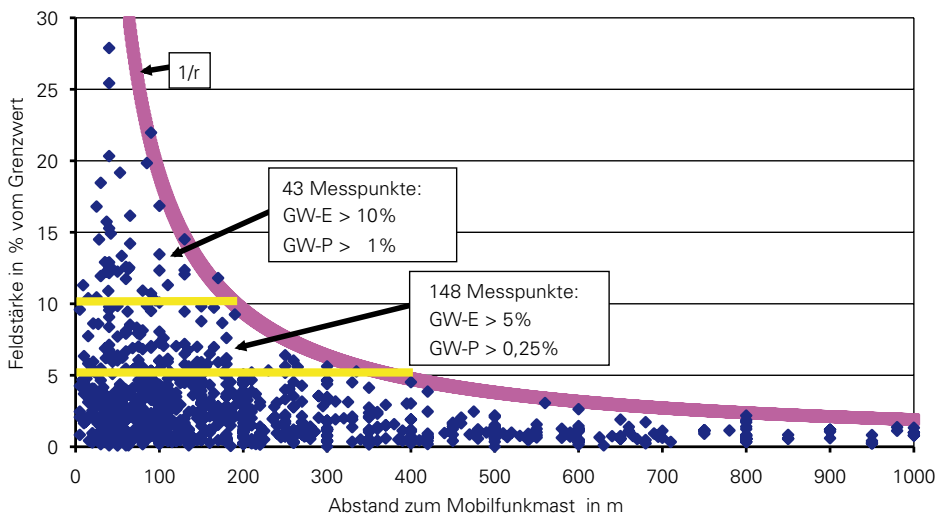
■ 6,1 V/m bzw. 100 mW/m² bei UMTS-2000

■ 5,8 V/m bzw. 90 mW/m² bei GSM-1800

■ 4,1 V/m bzw. 45 mW/m² bei GSM-900.

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

An der Häufung der Punkte in der linken unteren Ecke des Diagramms kann man erkennen, dass die meisten Messpunkte weniger als 200 m vom Fußpunkt des jeweiligen Mobilfunkmasten entfernt lagen und trotzdem meist nur ein GW-E unter 5 % gemessen wurde.



Abhängigkeit der Feldstärke vom Abstand zum Mobilfunkmast auf der Basis von 865 Messpunkten mit Sichtkontakt zum Sender. Die rote Kurve zeigt, dass mit dem $1/r$ -Gesetz das elektrische Feld sehr gut nach oben abgeschätzt werden kann. Quelle: LfU

4.3.6 IMMISSIONEN EINES HANDYS

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

Ein Handy sendet nur bei:

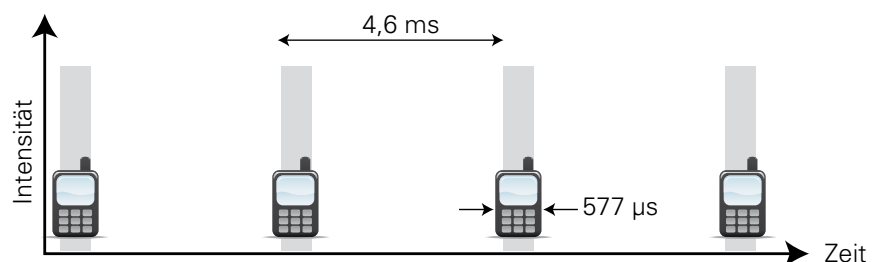
- Telefongesprächen
- Datenverbindungen
- Funkzellenwechseln (ca. 1 s)
- Regelmäßiger Anwesenheitskontrolle (ca. 1 s)
- Versenden/Empfangen einer Kurzmitteilung (SMS) (ca. 1 s)

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

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

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

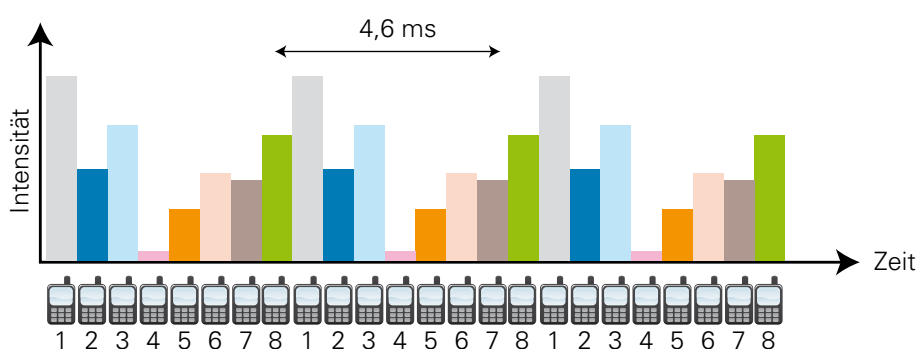
Schematische Darstellung der
Signalfolgen von GSM Handys
während eines Telefongesprächs



Die Sendeleistung des Handys – und mit Einschränkungen auch die der Basisstation – ist von der Verbindungsqualität zwischen Handy und Basisstation abhängig. Das bedeutet, dass bei schlechter Verbindungsqualität eine deutlich höhere Sendeleistung erforderlich ist als bei guter Versorgung. Die Sendeleistungen von GSM-Handys betragen im D-Netz höchstens 2 W, im E-Netz beträgt der Spitzenwert 1 W. Die maximal erreichbaren Mittelwerte bei der Sprachübertragung liegen bei etwa einem Achtel des Spitzenwerts, also bei 250 mW bzw. 125 mW. Bei gutem Empfang kann die Sendeleistung des Handys bei GSM theoretisch um den Faktor 1.000 und bei UMTS um den Faktor 100.000.000 reduziert werden. Allerdings senden GSM-Handys bei jedem Gesprächsaufbau, bei jedem Funkzellenwechsel und schon bei mittelmäßigem Empfang mit voller Leistung. UMTS-Handys senden kontinuierlich mit ebenfalls höchstens 125 mW mittlerer Leistung, sie können ihre Leistung aber wesentlich effi-

zienter reduzieren, als dies im GSM-Standard vorgesehen ist. Ein umfangreiches Informationsangebot hierzu findet sich auf der Seite des Bundeswirtschaftsministeriums [17].

Die Sendeleistung von Basisstationen ist in der Regel um den Faktor 100 bis 1.000 stärker als die Sendeleistung von Handys. Der Kopf des Handynutzers ist jedoch elektrischen und magnetischen Feldern ausgesetzt, die um das 1.000-fache höher sind und damit Leistungsflussdichten, die 1.000.000-fach stärker sind als bei der Basisstation. Das ist damit zu erklären, dass der Abstand der Handyantenne zum Kopf nur wenige Millimeter beträgt, während der Abstand zur Basisstation in der Regel bei ein paar 100 m bis zu einigen Kilometern liegt. Im Kapitel „Biologische Wirkungen“ wird auf die Absorption von Mobilfunkstrahlung im Kopf und im menschlichen Körper ausführlich eingegangen.



Schematische Darstellung der Signalformen im Verkehrskanal (TCH) einer GSM Basisstation. Der Verkehrskanal ist leistungsgeregelt, es können maximal acht Gespräche abgewickelt werden.

4.3.7 MASSNAHMEN ZUR MINIMIERUNG DER STRAHLENBELASTUNG

1. Verwenden Sie eine Freisprecheinrichtung oder ein kabelgebundenes Headset; dadurch verringert sich die Leistungsflussdichte am Kopf um mehr als 95 %.
2. Wählen Sie einen Standort mit gutem Empfang (alle Empfangsbalken); das Gerät sendet dann mit deutlich geringerer Leistung (bis zu 99,9 % geringer).
3. Verwenden Sie strahlungsarme Handys, wie sie z. B. auf der Internetseite www.handywerte.de oder bei der Zeitschrift CONNECT [18] in der Bestenliste aufgeführt sind.
4. Stellen Sie Laptops mit WLAN auf einen Tisch und nicht auf Ihre Oberschenkel.
5. Stecken Sie UMTS-Datasticks nicht direkt in den Laptop, sondern verwenden Sie ein USB-Kabel und legen den Stick ans Fenster.

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

4.4 RUNDFUNK UND FERNSEHEN

Hochfrequente elektromagnetische Wellen werden seit Anfang des 20. Jahrhunderts zur Radioübertragung genutzt, einige Jahre später kam das Fernsehen dazu. Beides

wird unter dem Begriff Rundfunk zusammengefasst. Anders als der Mobilfunk mit seinen 65.000 leistungsschwachen Sendemasten, die oft nur ein Gebiet von einem Quadratkilometer abdecken, arbeitet der Rundfunk mit einem Netz leistungsstarker Grundnetzsender, die bisweilen Gebiete mit einem Radius von mehr als 100 km versorgen.

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

Die Abstrahlung von Rundfunkprogrammen erfolgt meist von hohen Bergen, in Großstädten wie Stuttgart oder München auch von lokalen Fernsehtürmen aus. Dabei werden entweder horizontal rundstrahlende Sendeantennen verwendet oder Sektorantennen werden so angeordnet, dass eine rundstrahlende Sendecharakteristik entsteht. Nur in manchen Fällen, etwa

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

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

beim Sender Wendelstein, dem nach Süden ein höherer Gebirgszug nachgelagert ist, erfolgt die horizontale Abstrahlung gerichtet. In vertikaler Richtung werden die Strahlen wie beim Mobilfunk gebündelt.

Aufgrund der hohen Sendeleistungen sind beachtliche Sicherheitsabstände erforderlich, die bisweilen mehrere hundert Meter betragen können. Für den Sender Wendelstein (UKW, DVB-T) weist die Bundesnetzagentur beispielsweise einen Sicherheitsabstand von 320 m in Hauptstrahlrichtung aus. Durch die Wahl der herausragenden Standorte lassen sich die Sicherheitsabstände gut kontrollieren. Hohe Grenzwertausschöpfungen treten nur in Ausnahmefällen in Wohngebieten auf. In Städten liegt die Grenzwertausschöpfung des Rundfunks gewöhnlich in derselben Größenordnung wie beim Mobilfunk [19].

2002 begann beim Fernsehen die Umstellung auf digitale Übertragung, die heute abgeschlossen ist. Mit der Umstellung der letzten „analogen Inseln“ in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz ist seit Ende 2008 das digitale Fernsehen DVB-T deutschlandweit in Betrieb. DVB-T kommt gegenüber dem analogen Fernsehen bei gleicher Reichweite mit bis zu 90 % weniger Sendeleistung aus, wobei aus Gründen der besseren Indoor-Versorgung die Sendeleistung in der Praxis meist nur drei bis fünf mal geringer ist als die zuvor für analoges Fernsehen eingesetzte Leistung. In den Gebieten, die nur eine Grundversorgung öffentlich-rechtlicher Fernsehprogramme erfahren, ergibt sich daraus eine deutliche Reduktion der Immissionen [19].



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

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 22 - 31**

In Ballungsräumen mit zusätzlichen privaten Fernsehanbietern sind die gemessenen Immissionen auf vergleichbarem Niveau wie beim analogen Fernsehen. Durch die größere Anzahl abgestrahlter Kanäle ergibt sich in diesen Bereichen keine Reduzierung der Sendeleistung.

Beim Hörfunk ist der Verbreitungsgrad von UKW-Radio mit praktisch 100 % und geschätzten 300 Mio. Empfangsgeräten [20] viel zu hoch, um eine schnelle Digitalisierung durchführen zu können. Ein Nachfolgesystem für UKW ist derzeit weder zeitlich noch technisch absehbar. Das in den 1980er Jahren konzipierte und Anfang der 1990er Jahre eingeführte Digitalradio DAB (Digital Audio Broadcasting) gilt heute mit wenigen Empfangsgeräten und sehr wenigen Sendern als gescheitert [21], so dass möglicherweise dessen Nachfolger DAB+ in Frage kommt. Ein sukzessiver „sanfter“ Umstieg könnte auch mit DRM+ erfolgen,

das im UKW-Frequenzband mit analogem Radio koexistieren kann. Es stellt eine Weiterentwicklung von DRM (Digital Radio Mondiale) dar, das im Bereich der Mittel- und Kurzwellensender bereits teilweise analoge Abstrahlungen abgelöst hat. Im Zuge der Konvergenz der Medien ist ferner mit einer zunehmenden Bedeutung von Internet-Radio zu rechnen, das über Mobilfunknetze auch über Handy nutzbar ist.

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

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



4.5 AMATEURFUNK

In Deutschland gibt es etwa 80.000 Hobby-Amateurfunker. Der Empfang des Amateurfunkdienstes ist in Deutschland jedermann gestattet. Die aktive Teilnahme am Amateurfunkdienst, d. h. der Betrieb eines Senders, ist an eine Zulassung gebunden. Das Amateurfunkzeugnis erwirbt man durch eine Prüfung bei der Bundesnetzagentur. Damit unterscheidet sich der Amateurfunk von Funkanwendungen wie CB-Funk, Kurzstreckenfunk SDR, DMR446 und vielen anderen, die jedermann ohne Genehmigung nutzen darf. Amateurfunk wird auf festgelegten Funkbändern betrieben, die in allen Wellenlängenbereichen zur Verfügung stehen.

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

Amateurfunkstellen müssen bei der Bundesnetzagentur nur angezeigt werden; sie benötigen keine Standortbescheinigung und sind deshalb nicht in der Standortdatenbank der BNetzA erfasst. Die maximal erlaubte Sendeleistung wird von Amateurfunkern im Normalfall nicht ausgeschöpft. Die meisten Anlagen haben Leistungen zwischen 5 und 100 W. Zudem sind Amateurfunkanlagen meist nur einige hundert Stunden pro Jahr in Betrieb [11].

4.6 DRAHTLOSE STADT-NETZWERKE (WIMAX)

Internetdaten können heute über große Flächen und weite Strecken mittels Funk übertragen werden. Es gibt in diesem Bereich eine Vielzahl von Technologien, so dass nur einige exemplarisch besprochen werden können. Man unterscheidet Funklösungen, die Kabelstrecken aus Kostengründen einsparen, und Funklösungen, die den Nutzer mobil machen.

Da viele Häuser zu weit von der nächstgelegenen Vermittlungsstelle entfernt liegen, steht dort kein oder nur langsames DSL 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 (Outdoor-DSLAMs) stehen oft die hohen Kosten entgegen. Gerade in sehr dünn besiedelten Gebieten kann mit WiMAXstationär (IEEE 802.16-2004) schnelles Internet einfach und kostengünstig zur Verfügung gestellt werden, ohne Glasfaserkabel verlegen zu müssen.



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



WiMAXstationär-Antenne am
Balkon

Da mit kleinen Sendeleistungen (einige 100 mW bei ca. 5.500 MHz) Entfernungen bis zu 30 km überbrückt werden müssen, sind meist stark bündelnde Außenantennen bei den Nutzern notwendig, die wie kleine Sat-Schüsseln an Balkonen, Hauswänden oder Dächern befestigt werden. Diese Außenantennen sind mit einem WiMAX-Modem verbunden, das auch in einen WLAN-Router integriert sein kann.

Die Immissionen von WiMAXstationär sind aufgrund der geringen Sendeleistung etwa 1.000-mal geringer als beim Mobilfunk und damit vernachlässigbar [23].

WiMAXmobil (IEEE 802.16e) dient dazu, den Nutzer bei Übertragungsraten von 5 MBit/s bis 20 MBit/s mobil zu machen. Die Bundesnetzagentur hat im Dezember 2006 dazu Frequenzen im 3.500 MHz-Band versteigert. Die bundesweiten Lizenzen haben mehrere Firmen ersteigert, die bis Ende 2009 mindestens 15 % der Gemeinden versorgen müssen.

WiMAXmobil ist UMTS in vielen Punkten ähnlich. Es ist wie ein Mobilfunknetz zellulär und flächendeckend aufgebaut. In einem bestimmten Raster sind Funkmasten installiert, so dass eine Verbindung in benachbarte Funkzellen unterbrechungsfrei übergeben werden kann (hand-over). Die Sendeleistungen von Basisstationen und Endgeräten sind mit UMTS vergleichbar.

Mobiles WiMAX basiert auf Modulationstechniken (OFDM) und Antennentechniken (MIMO), die der kommenden Mobilfunkgeneration LTE (Nachfolger von

UMTS) ähneln. WiMAXmobil ist zum jetzigen Zeitpunkt (Dezember 2008) noch nicht kommerziell verfügbar. Ob es sich in Deutschland durchsetzt oder später abgewandelt als LTE in die Läden kommt, ist aus heutiger Sicht noch nicht zu sagen, dürfte aber für die Nutzer und die Allgemeinbevölkerung ohne Belang sein.

4.7 RICHTFUNK UND SATELLITENINTERNET

Bild-, Ton- und Datenübertragung ist mit Hilfe der **Richtfunktechnik** über weite Strecken einfach, schnell und kostengünstig realisierbar. Im terrestrischen Richtfunk werden typischerweise Distanzen von 1 bis 70 km überbrückt. Heutzutage werden Trägerfrequenzen im Mikrowellenbereich zwischen 6 und 40 GHz verwendet, 6 bis 8 GHz im Weitverkehrsfunk über 20 km, 11 bis 15 GHz für Entfernungen zwischen 10 und 20 km, sowie 18 bis 38 GHz für Entfernungen zwischen 1 und 10 km. Es kommen Richtantennen mit hohem Antennengewinnfaktor G meist zwischen 1.000 und 10.000 zum Einsatz. Sie werden auf erhöhten Standorten wie großen Funktürmen montiert, um große Entfernungen überbrücken zu können (Abbildung Seite 91). Meistens werden Parabolantennen oder Muschelantennen benutzt. Der Antennengewinn ist frequenzabhängig und steigt linear mit der Antennenfläche.

Die große Richtwirkung der Antennen erlaubt hohe Datenübertragungsraten trotz geringer maximaler Sendeleistungen zwischen 100 mW und 1 W. Die reale Sendeleistung wird zudem bei guten Witterungsbedingungen auf wenige Prozent der maximalen Sendeleistung reduziert. Bei

Richtfunkantennen ist der Hauptstrahl sowohl vertikal als auch horizontal stark gebündelt (siehe Abbildung Seite 79) und hat einen Öffnungswinkel von 1° bis 4° . Außerhalb des engen Hauptstrahls nimmt die Leistungsflussdichte rapide ab. Außerdem ergibt sich wie bei jeder Antenne in der Hauptstrahlrichtung eine quadratische Abnahme der Leistungsflussdichte (siehe Abbildung Seite 72). Wegen der verwendeten hohen Frequenzen und der geringen Sendeleistung ist eine optische Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfangsantenne Voraussetzung. Die Erdkrümmung, die Geländeform und die Flächennutzung (Bäume, Gebäude) müssen deswegen berücksichtigt werden. Besteht keine direkte Sichtverbindung muss die Richtfunkstrecke durch Relaisstationen in Teilstrecken aufgeteilt werden.

Der Einfluss von Richtfunk auf Aufenthaltsbereiche von Personen ist daher extrem niedrig und im Vergleich zum Mobilfunk völlig vernachlässigbar. Die typischen Leistungsflussdichten liegen meist neun Größenordnungen und mehr unter den gültigen Grenzwerten. Eine Überschreitung der Grenzwerte kann theoretisch nur dann auftreten, wenn sich jemand in unmittelbarer Nähe zur Antenne im Freihaltebereich aufhält. Die Richtfunkverbindung wäre in diesem Fall gestört oder unterbrochen. Schon um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, wird der Betreiber vermeiden, dass jemand in den Freihaltebereich gelangen kann.

Ein Sonderfall des Richtfunks stellt die Satellitenkommunikation dar. Die zahlenmä-

ßig weitaus meisten Parabolantennen (ca. 14 Mio. in Deutschland) befinden sich auf deutschen Hausdächern. Mit einem Öffnungswinkel von ca. 2° und einem Antennengewinn G zwischen 3.000 bis 8.000 empfangen sie beim **Satellitenfernsehen und -radio** im Frequenzbereich von 10,7 bis 12,75 GHz von geostationären Satelliten in ca. 38.000 km Entfernung. Als reine Empfangsantennen senden sie nicht und haben deshalb keinerlei Immissionen.

Mit modernen 2-Wege-Systemen kann über den Satelliten eine **Internetverbindung** hergestellt werden. Beim Satelliteninternet werden nicht nur Daten empfangen (downlink), sondern können mit einer Sendeleistung von bis zu 2 W und einer Frequenz von 14 GHz auch zum Satelliten gesendet werden (uplink). Hier können in direkter Nähe zur Parabolantenne geringfügige Immissionen durch Streustrahlung auftreten. Diese Technik ist mit ihren vergleichsweise hohen Kosten, niedrigen Übertragungsraten, vielen Beschränkungen und lauten Modems in Deutschland noch eine Randerscheinung und hat erst einige 10.000 Nutzer. Jeweils 10.000 Nutzer teilen sich die 36 MBit/s eines Satellitentransponders – kein Wunder, kostet dieser doch pro Jahr ca. 2 Millionen Euro Miete. Gerade in den Abendstunden ist dieser Zugang deshalb oft sehr langsam. Mit dem Start des „Ka-Sat“-Satelliten (downlink 20 GHz, uplink 30 GHz, 70 GBit/s Bandbreite) im Jahr 2010, der eine zigfach höhere Übertragungskapazität als bisherige Satelliten bietet, werden voraussichtlich die Teilnehmerzahlen deutlich steigen.



Richtfunkantennen auf einem hohen Turm in Karlsruhe

4.8 ARTIKELSICHERUNGS- UND ARTIKELERKENNUNGSANLAGEN

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

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

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

santen im Regelfall allerdings nur kurzzeitig ausgesetzt sind.

Das Bundesamt für Strahlenschutz weist darauf hin, dass durch Lesegeräte mit hoher Reichweite die von der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radio Protection) 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 [24].

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

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

Arbeitsweise einer Artikelsicherungsanlage



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 auf passivem Wege, indem der Transponder seine benötigte Energie aus dem Feld des Lesegeräts bezieht, oder auf aktive Weise über eine integrierte Batterie.

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

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

- Niederfrequenz: 100 – 135 kHz
- Hochfrequenz: 6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,125 MHz
- Ultrahochfrequenz (UHF): 868 MHz
- Mikrowelle: 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).

Ausführliche allgemeine Informationen hierzu bietet das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [25].

4.9 QUELLEN IM HAUSHALT

4.9.1 MIKROWELLENHERDE

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

Die Mikrowellen werden von Speisen absorbiert und regen dort Moleküle zu Schwingungen an. Die aufgenommene Schwingungsenergie bewirkt eine Erwärmung des Essens. Wassermoleküle können besonders gut, Fettmoleküle eher schlecht zu Schwingungen angeregt werden. Die Absorption von 2.455-MHz-Strahlung erfolgt deshalb bei wässrigen Speisen in einer ca. 0,6 cm dicken Schicht, bei Fett in einer ca. 5 cm dicken Schicht. Außerhalb des Geräts ist das elektrische Feld sehr schwach, da der Garraum mit Blechen und Gittern abgeschirmt ist. Zudem werden Mikrowellenherde von den Herstellern auf Leckstrahlung getestet, sollten aber regelmäßig (z. B. alle 2 Jahre) überprüft werden. Aus Sicherheitsgründen wird beim Öffnen der Tür automatisch die Energiezufuhr abgeschaltet.



Innenleben einer RFID-Card



Mikrowellenherd



DECT-Telefon mit
ECO-Modus-Plus



WLAN-Router 802.11n

4.9.2 SCHNURLOSTELEFONE (DECT)

Heutige Schnurlostelefone basieren fast ausschließlich auf dem digitalen DECT-Standard und senden auf einer Frequenz um 1900 MHz. Die maximale Sendeleistung ist mit 250 mW deutlich geringer als bei GSM-Handys. Die Daten werden in kurzen Pulsen gesendet, die mittlere Sendeleistung der Basisstation und des Mobilteils liegen deshalb mit 10 mW noch deutlich darunter. Im Ruhebetrieb sendet das Mobilteil nicht. Die Basisstation sendet im Ruhebetrieb 100-mal pro Sekunde mit einer mittleren Sendeleistung von 2,1 mW Systeminformationen an das Mobilteil. Um die persönliche HF-Belastung zu minimieren, empfiehlt es sich deshalb, die Basisstation abseits von dauernden Aufenthaltsorten zu positionieren, also nicht direkt am Bett oder auf dem Schreibtisch. Umfangreiche Informationen hierzu bietet das EMF-Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) [26].

ECO-DECT-Telefone reduzieren die Strahlungsleistung im Ruhebetrieb um den Faktor 10.000 bis 10.000.000, wenn das Mobilteil in der Station liegt. Dazu ist es wichtig, nur ein Mobilteil pro Station anzumelden und es immer in diese zurückzulegen. Seit 2008 gibt es auch Telefone mit verbessertem ECO-Modus, bei denen mehrere Mobilteile angemeldet werden können und bei denen das Mobilteil außerhalb der Schale verbleiben kann, ohne auf den ECO-Modus verzichten zu müssen. Im Standby wird die Sendeleistung hier völlig abgeschaltet. Je nach Hersteller wird diese Funktion als Full-ECO-DECT oder ECO-Modus-Plus bezeichnet. Das BfS hat eine Auswahl von ECO-DECT Geräten zusammengestellt [27].

4.9.3 DRAHTLOSE HEIMNETZWERKE (WLAN)

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

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

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

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

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

Umfangreiche Informationen bietet das EMF-Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz [26].

4.9.4 BLUETOOTH

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

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

4.9.5 BABYPHONE

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

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

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



Kabellose Computer-Maus

4.10 EMF-MONITORING IN BAYERN UND BADEN-WÜRTTEMBERG

Da das Thema Elektromagnetische Felder und ihre stetige Zunahme in der Öffentlichkeit seit Jahren heftig diskutiert wird, haben sich Baden-Württemberg und Bayern vor einigen Jahren dazu entschlossen, das elektromagnetische Spektrum an vielen hundert Punkten im Land zu messen. Mit diesen gewonnenen Messdaten war es erstmals möglich, statistisch belastbare Aussagen über die Exposition der Gesamtbevölkerung mit elektromagnetischen Feldern zu machen. In Bayern wurde das Monitoring bereits zweimal durchgeführt, so dass hier bereits erste Aussagen zur zeitlichen Veränderung möglich sind. In Baden-Württemberg laufen aktuell (2009) die Wiederholungsmessungen.

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

Beispiel:

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

Die Ausschöpfungsgrade GW-P der einzelnen Frequenzen können, im Gegensatz zu den Ausschöpfungsgraden GW-E, einfach

addiert werden. Da die thermischen Wirkungen, die man bei hochfrequenter Strahlung feststellt, linear von der Leistungsflussdichte abhängen, wurde in Bayern die GW-P-Darstellung gewählt.

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

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

4.10.1 PROGRAMME BAYERN

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

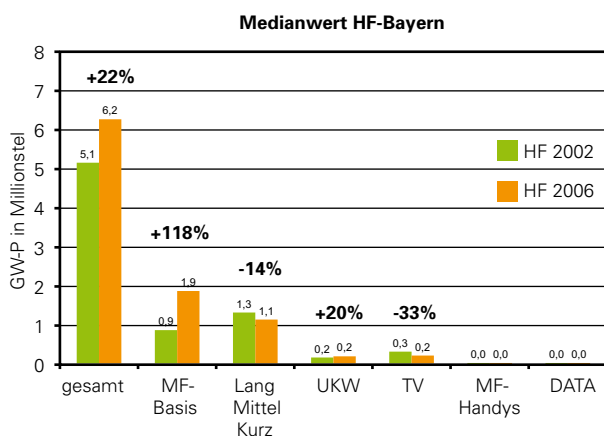
DATA umfasst Immissionen von Funkthermometern und Funkschaltern.

Der größte Unterschied der Diagramme besteht beim Mobilfunk. Während der Grenzwert an der Hälfte der Messorte nur zu weniger als zwei Millionstel ausgeschöpft wird (Median), gibt es ein paar Orte, an denen der Ausschöpfungsgrad bei bis zu 630 Millionstel liegt, dadurch ergibt sich ein Mittelwert von etwa 18 Millionstel.

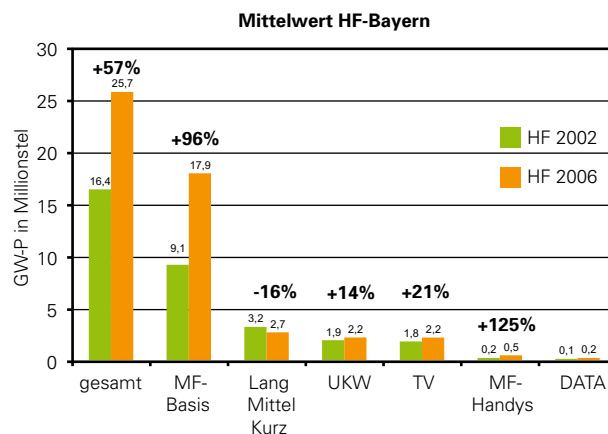
Beide Darstellungen ergeben jedoch, dass sich die Mobilfunkimmissionen auf geringem Niveau in Bayern innerhalb von vier Jahren (2002/2003 → 2006/2007) verdoppelt haben und heute die wichtigste Quelle

von Hochfrequenz-Immissionen darstellen. Angesichts der zunehmenden Verbreitung von Sprach- und Datenflatrates dürften sich die Mobilfunkimmissionen weiter erhöhen. Aus den Grafiken ist ebenfalls ersichtlich, dass an den Messorten DATA- und Handy-Immissionen bedeutungslos sind. Der Behördenfunk BOS (Feuerwehr, Polizei, THW) und DECT-Telefone sind in ihren Immissionen vergleichbar mit DATA und wurden deshalb nicht in die Grafik aufgenommen.

Die beiden ausführlichen Berichte mit weiteren Ergebnissen sind im Internet abrufbar [19].



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



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

4.10.2 PROGRAMME BADEN- WÜRTTEMBERG

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

Bei dem Funkwellenmessprojekt wurden in vier repräsentativen Gebieten Baden-Württembergs alle wesentlichen Funkanwendungen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz, insbesondere Rundfunk, Fernsehen und Mobilfunk, abgedeckt. 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. Die Messungen deckten etwa 10 % der Landesfläche ab und umfassten 143 Gemeinden, in denen etwa ein Drittel der Bevölkerung des Landes lebt. 667 Punkte lagen außerorts und 228 Punkte innerorts.

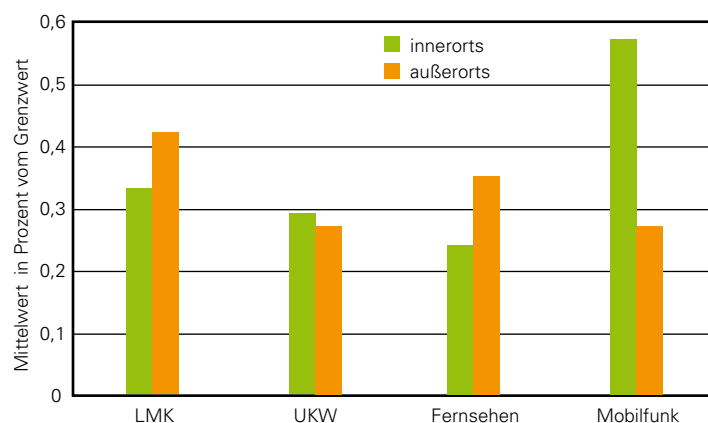
Das Messprogramm wird im Jahr 2009 an 600 Messpunkten wiederholt. Die Ergebnisse werden anschließend auf den Internetseiten der LUBW veröffentlicht.

Die Ergebnisse sind (im Gegensatz zur bayrischen Auswertung) in Prozent vom Grenzwert der elektrischen Feldstärke GW-E angegeben.

Die Einwirkungen durch elektromagnetische Felder lagen im landesweiten Durchschnitt bei etwa einem Hundertstel des Grenzwertes. An 60 % der Messpunkte war dieser Wert unterschritten. An acht Punkten war die Grenzwertausschöpfung größer als 5 %. Kein Einzelwert lag über 10 % des Grenzwertes.

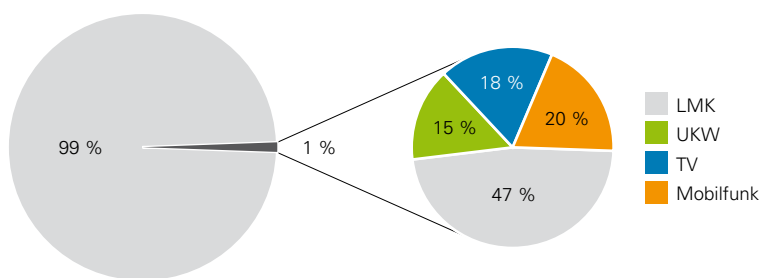
Neben dem Abstand zu den Sendeanlagen bestimmt vor allem die Sendeleistung die Höhe der Feldstärken. Die höchsten Einzelwerte wurden überwiegend durch leistungsstarke Rundfunk- und Fernsehsender verursacht. Einwirkungen von 2 % des Grenzwertes oder mehr ergaben sich nur in unmittelbarer Sendernähe. Beim Mobilfunk können solche Werte nur bis zu wenigen hundert Metern Entfernung von der Sendeanlage auftreten, wenn Sichtverbindung zu den Sendeantennen besteht. Die Abstrahlcharakteristik der Antennen, die meist auf Masten, Gebäudedächern oder Türmen montiert sind, minimiert die Im-

*Funkwellen in Baden-Württemberg: Beiträge von Rundfunk, Fernsehen und Mobilfunk innerorts und außerorts im Vergleich.
Quelle: LUBW*



missionen in Bodennähe. Innerorts war der Beitrag des Mobilfunks zu den Einwirkungen durch elektromagnetische Felder meist größer als der Beitrag durch Rundfunk und Fernsehen. Außerorts war es gerade umgekehrt, da sich die Sendeanlagen für Rundfunk und Fernsehen in der Regel außerhalb geschlossener Ortschaften auf Bergen oder hohen Sendetürmen befinden. Die Abbildung auf Seite 98 zeigt die durchschnittlichen Beiträge der einzelnen Funkdienste innerorts und außerorts im Vergleich.

Insgesamt dominierten Rundfunk – Lang-, Mittel- und Kurzwelle (LMK) sowie UKW- und Fernsehen an 80 % aller Messpunkte. Die Einwirkungen durch diese Funkdienste lagen im Landesdurchschnitt bei rund 0,8 % des Grenzwertes. Gemittelt über alle Messpunkte betrug der Anteil des Mobilfunks an den Gesamtmissionen etwa ein Fünftel. Dabei schöpfte der Mobilfunk den Grenzwert im Durchschnitt über alle Messpunkte nur zu rund 0,3 % aus. Die Abbildungen unten veranschaulichen die durchschnittliche Grenzwertausschöpfung und den Anteil der einzelnen Funkdienste an der Gesamtmission.

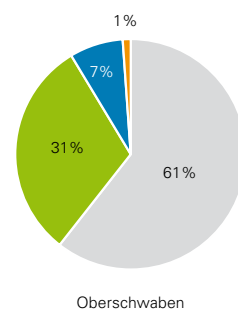
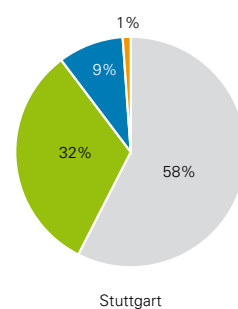
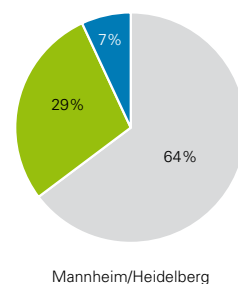
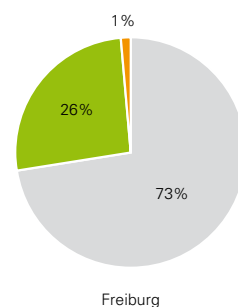


Durchschnittliche Grenzwertausschöpfung aller Funkdienste zusammen (links) und über alle Messpunkte gemittelter Anteil der einzelnen Funkdienste an den Gesamtmissionen (rechts).

Quelle: LUBW

Die Ergebnisse aus den Untersuchungsgebieten Mannheim-Heidelberg (161 Messpunkte), Freiburg (76 Messpunkte), Stuttgart (577 Messpunkte) und Oberschwaben (81 Messpunkte) zeigt die Abbildung rechts. Darin sind die jeweiligen Gesamtmissionen an den Messpunkten dargestellt, aufgeteilt in vier Klassen nach Anteil der Grenzwertausschöpfung. Die Verteilungen sind sich relativ ähnlich. Der höchste gemessene Einzelwert lag im Raum Mannheim-Heidelberg bei 4 % des Grenzwertes (Ursache: Mobilfunkbasisstation), in Freiburg bei knapp 10 % (Ursache: Rundfunksender).

Im Raum Stuttgart lagen sechs Werte zwischen 5,6 % und 8,7 % des Grenzwertes (Ursache: Rundfunk- und Fernsehsender, in einem Fall Mobilfunkbasisstation). In Oberschwaben lag der höchste gemessene Wert bei 7 % und wurde durch einen Rundfunksender verursacht. Eine detaillierte Projektbeschreibung mit weiteren Ergebnissen, auch die der einzelnen Messpunkte, ist im Internet abrufbar [28].



Verteilung der Gesamtmissionen in den vier Untersuchungsgebieten Baden-Württembergs

Quelle: LUBW

4.10.3 VERGLEICH DER UNTERSUCHUNGEN

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

Das Monitoring in **Bayern** konzentrierte sich von vornherein auf die bewohnten Gebiete. Die 400 Messpunkte lagen in keinem Fall weiter als 50 m von einem Wohnhaus entfernt, dafür jedoch weit über das ganze Land verstreut. Die meisten Messungen erfolgten in größerer Entfernung zu Hörfunk- und Fernsehsendeanlagen.

In **Baden-Württemberg** wurde ein festes 2 km x 2 km Raster für die Lage der knapp 900 Messpunkte gewählt. Dieser statische Ansatz gewährleistet, dass die Untersuchungsgebiete in der Fläche repräsen-

tativ abgedeckt sind. Es wurden sowohl innerstädtische Bereiche mit hoher Bevölkerungsdichte als auch dünn besiedelte Teile des Landes erfasst.

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



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

5. Biologische Wirkungen

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 32 - 41**

5.1 EINFÜHRUNG

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

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

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

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

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

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

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

In den folgenden Frequenzbereichen sind akute Wirkungen belegt:

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

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

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

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

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

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

5.2 AKUTE WIRKUNGEN NIEDERFREQUENTER FELDER

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



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

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

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

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

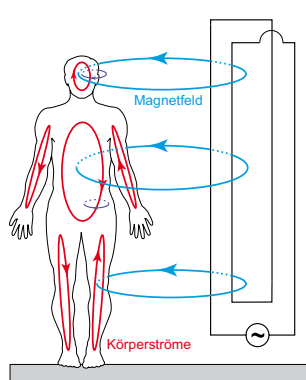
Niederfrequente **magnetische Felder** dagegen dringen praktisch ungestört in den Körper ein und erzeugen über Induktion im Körper elektrische Felder.

Die Stärke der induzierten Ströme und Stromdichten hängt insbesondere ab von

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

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

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



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

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

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

5.2.1 REIZWIRKUNGEN

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

Die Tabelle auf der rechten Seite stellt die Wirkungen verschiedener Stromdichten am jeweiligen Wirkungsort des menschlichen Körpers für den Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 300 Hz im Überblick dar [29].

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

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

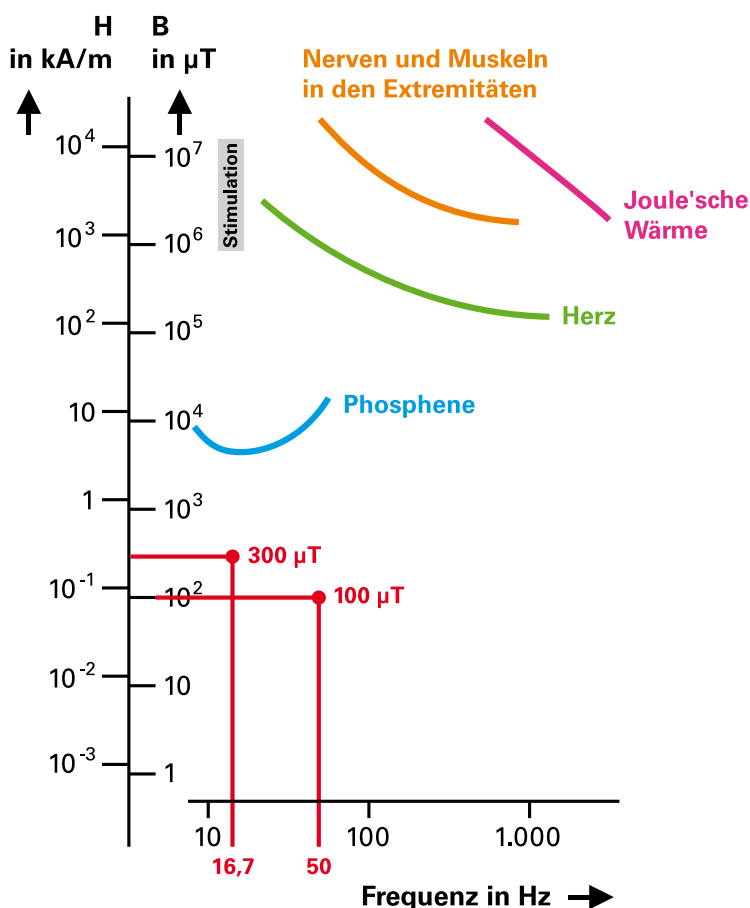
Die Körperstromdichte wird verwendet, um so genannte Basisgrenzwerte festzulegen. Diese Basisgrenzwerte betragen im Frequenzbereich von 4 Hz bis 1 kHz für die allgemeine Bevölkerung $2 \text{ mA}/\text{m}^2$, bei be-

rußlicher Exposition 10 mA/m^2 und bei überwachter Exposition in der medizinischen Diagnostik oder im Rahmen einer Therapie 100 mA/m^2 .

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

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

In der 26. BImSchV sind Grenzwerte für magnetische 16,7-Hz- und 50-Hz-Felder festgelegt worden ($300 \mu\text{T}$ und $100 \mu\text{T}$), die um einen Sicherheitsfaktor von 5 unterhalb der niedrigsten Schwelle belegter Effekte liegen.



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

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

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

5.2.2 INDIREKTE WIRKUNGEN

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

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

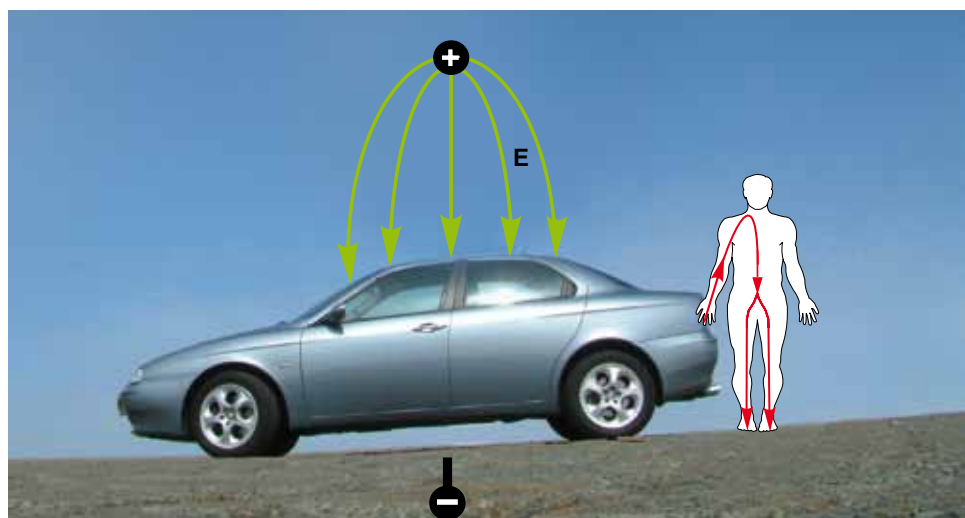
- dem Ableitwiderstand zur Erde,
- der Stärke und Dauer des Kontaktstromes,
- der Größe und Anordnung des Gegenstandes und
- der elektrischen Feldstärke.

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

Die wichtigsten Ergebnisse sind in der Tabelle rechts zusammengefasst [30]. Diese Schwellenwerte werden für die Beurteilung einer Gefahr durch elektrische Unfälle bei der Berührung von spannungsführenden Teilen herangezogen.

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

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



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

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

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

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

5.2.3 WEITERE WIRKUNGEN

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

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

Die Weltgesundheitsorganisation WHO hat in einer Studie alle bisher diskutierten möglichen Wechselwirkungen niederfrequenter Felder ausführlich dargelegt und bewertet. 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 [31].

5.3 AKUTE WIRKUNGEN HOCHFREQUENTER FELDER

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

Abhängig von physikalischen Eigenschaften wie z. B.

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

kann es zu Polarisierungseffekten, Orientierungsschwingungen permanenter Dipole (z. B. Wasser), Schwingungs- und Rotationsbewegungen innerhalb von Molekülen oder Verschiebung freier Ladungsträger kommen. Bei all diesen Vorgängen entsteht infolge von Reibungsverlusten Wärme im Gewebe, was zu einer Temperaturerhöhung einzelner Körperteile oder des ganzen Körpers führen kann.

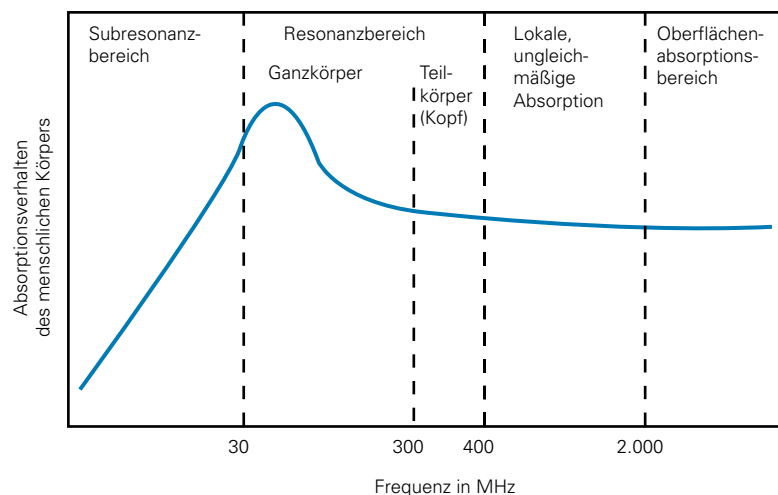
Die Absorption von Hochfrequenzstrahlung durch den menschlichen Körper ist stark frequenzabhängig: Die Eindringtiefe der Strahlung wird mit steigender Frequenz kleiner, das heißt, dass die Strahlungsenergie auf einem kürzeren Wegstück durch den Kör-

per absorbiert, also in andere Energieformen umgewandelt wird. So beträgt beispielsweise bei 0,5 GHz die mittlere Eindringtiefe in Muskelgewebe ungefähr 17 mm, bei 2,45 GHz (Mikrowellenherd) noch 6 mm und oberhalb von 10 GHz nur noch 0,2 mm oder weniger.

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

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

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



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.

5.3.1 WÄRMEWIRKUNG

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

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

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

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

Bei der Bewertung von Hochfrequenzstrahlung verwendet man wie bei den niederfrequenten Feldern das Konzept der Basisgrenzwerte. Damit sollen im Körper auftretende Wirkungen minimiert 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.

Die festgelegten Grenzen für eine Temperaturerhöhung des gesamten Körpers im Hochfrequenzfeld gelten in gleicher Weise auch für einzelne Körperteile und Organe bei lokaler Erwärmung.

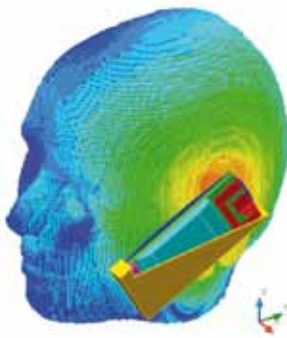
Insbesondere im Nahbereich von Sendeanennen kann eine sehr inhomogene Energieabsorption auftreten. Daher ist es notwendig, zusätzlich zu Ganzkörper-SAR Werten eine Begrenzung durch einen lokalen SAR-Wert einzuführen. Das Mittelungsvolumen für lokale SAR-Werte ist 10 g , so dass empfindliche Strukturen, wie z.B. das Auge, keinesfalls übererwärmt werden können.

In der Abbildung links wird veranschaulicht, dass bei Benutzung eines Mobiltelefons die dem Gerät zugewandte Gesichts-

hälfte am stärksten exponiert ist. Zum Schutz der einzelnen Körperteile muss die Feldeinwirkung so begrenzt werden, dass 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 (gemittelt über 10 g Körpergewebe) auch unter ungünstigen Bedingungen gegeben. Bei einem empfohlenen maximalen Teilkörper-SAR-Wert von 2 W/kg , wie z. B. für Handys im D-Netz, treten nur noch vernachlässigbar geringe Temperaturerhöhungen im Gewebe auf.

Der Basisgrenzwert wird dann in Feldstärken für das elektrische und das magnetische Feld außerhalb des Körpers umgerechnet. Diese abgeleiteten Grenzwerte sind aufgrund des im Abschnitt 5.3 genannten Absorptionsverhaltens und der je nach Körpergröße unterschiedlichen Resonanzfrequenzen stark frequenzabhängig.

In der Medizin werden bei der Hochfrequenzwärmetherapie oder der Hyperthermie lokale Temperaturüberhöhungen gezielt genutzt, um an bestimmten Stellen des Körpers das betreffende Gewebe aufzuwärmen und so einen therapeutischen Effekt zu erzielen. Dabei werden Teilkörper-SAR-Werte von 10 bis über 50 W/kg angewendet.



*Exposition des Menschen durch
die hochfrequenten elektroma-
gnetischen Felder eines Handys
Quelle: IMST GmbH, Kamp-Lint-
fort, 2001*

5.3.2 WEITERE WIRKUNGEN

Weitere akute Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung werden oft als „athermische Wirkungen“ bezeichnet, um sie von den Wärmewirkungen abzusetzen. Wie im Abschnitt 5.3 dargestellt, wird nach dem Eindringen hochfrequenter Strahlung die Strahlungsenergie durch Wechselwirkungsprozesse in verschiedene andere Energieformen umgewandelt, bis schließlich durch Reibungseffekte (Dissipation) Wärme entsteht. Daher berücksichtigt das bestehende Grenzwertkonzept bereits wesentliche athermische Aspekte.

Um bestehende Kenntnislücken zu schließen, wurden im Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) in den Jahren 2002 bis 2008 insgesamt 54 Forschungsvorhaben durchgeführt.

Im Bereich Wirkungsmechanismen beschreibt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) den **Wissensstand vor Beginn des Forschungsprogramms** zusammenfassend wie folgt [32]:

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

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

entstehen können. Des Weiteren wurde die Hypothese formuliert, dass das Hor-

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

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

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

Das BfS fasst die Ergebnisse der Studien des Forschungsprogramms aus diesem Bereich wie folgt zusammen [32]:

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

Detaillierte Informationen zum Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm und den einzelnen Forschungsprojekten, die im Rahmen des DMF durchgeführt wurden, finden sich im Internet [33].

5.4 LANGZEITWIRKUNGEN

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

5.4.1 NIEDERFREQUENTE FELDER UND KREBS

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

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

In einer umfassenden Bewertung niederfrequenter Felder durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) wurden neben den bestehenden Untersuchungen alle neueren Studien zur Krebsinitiation und -promotion nochmals genau beurteilt. Aufbauend auf dieser aktuellen Bewertung hat die WHO ein begleitendes „Fact Sheet“ mit dem Titel „Electromagnetic fields and public health – exposure to extremely low frequency fields“ auf ihrer Internetseite veröffentlicht, in dem u. a. Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise dargelegt werden [34].

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

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

Skala der IARC zur Einstufung verschiedener Umweltagenzien und Chemikalien

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

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

- Kindliche Leukämie ist bezogen auf die Weltbevölkerung eine relativ seltene Krankheit (weltweit etwa 49.000 neue Fälle pro Jahr). Ebenfalls selten ist die zeitlich gemittelte häusliche Magnetfeldexposition über $0,3 \mu\text{T}$ (nur etwa 1 % bis 4 % der Kinder sind über $0,3 \mu\text{T}$ exponiert). Wäre der beobachtete statistische Zusammenhang kausal, dann könnten weltweit zwischen 100 und 2400 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 (IC-NIRP 1998) einführen. (Dies ist in Deutschland durch die 26. BImSchV bereits erfolgt.) Bei Langzeitwirkungen wird die Wahrscheinlichkeit eines Kausalzusammenhangs zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition als schwach angesehen.

Nach Ansicht der WHO ergeben sich daraus folgende weitere Empfehlungen:

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

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

5.4.2 HOCHFREQUENTE FELDER UND KREBS

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

Nach Prüfung dieser und weiterer neuer Studien kommt das BfS in seinem Abschlussbericht zum DMF (Mai 2008) zu folgender Aussage [35]:

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

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

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

Bisher liegen erst die Resultate aus den einzelnen teilnehmenden Ländern vor. Die Gesamtanalyse aller Daten ist noch nicht publiziert worden. Einige Länderstudien geben zwar Hinweise darauf, dass das Risiko auf der Seite, wo üblicherweise telefoniert wird, höher ist als auf der Gegenseite. Die meisten dieser einzelnen Länderergebnisse sind allerdings statistisch nicht signifikant.

Die Ergebnisse der deutschen Teilstudie zu Interphone zeigten kein erhöhtes Risiko für Gliome (Hirngewebstumore), Meningiome (Hirnhauttumore) oder Akustikusneurinome (Hörnervtumore) bei häufiger Handynutzung in einem Zeitraum von weniger als zehn Jahren. Für eine Nutzung über zehn Jahre sind die Fallzahlen sehr klein und zeigen kein erhöhtes Risiko für Meningiome und Akustikusneurinome, für Gliome ist das Risiko nicht signifikant erhöht.

Im Abschlussbericht des BfS zum DMF wird daher gefolgert [35]:

- Studien zur Nutzung von Mobiltelefonen zeigen derzeit keinen Hinweis auf ein erhöhtes Risiko für Gehirntumore, Akustikusneurinome und Augenmela-

nome und lassen selbst auf Basis der wenigen Langzeitanwendungen vermuten, dass zumindest eine deutliche Risikoerhöhung nicht zu erwarten ist. Eine abschließende Bewertung zum Risiko für Langzeitnutzer kann erst nach Abschluss der Interphone-Studie gegeben werden.

Insgesamt hat das BfS deutlich gemacht, dass die Langzeitwirkung durch den Mobilfunk eine noch offene und durch vermehrte Forschung zu beantwortende Frage darstellt.

5.4.3 WEITERE LANGZEITWIRKUNGEN HOCHFREQUENTER FELDER

Den Wissensstand vor Beginn des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms zu weiteren Langzeitwirkungen von Hochfrequenzstrahlung fasst das BfS wie folgt zusammen [32]:

- Aus in vivo- und in vitro- Studien lagen Hinweise vor, dass im Falle einer chronischen Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke erhöht werden könne.
- Aus nicht reproduzierten tierexperimentellen Studien lagen Hinweise darauf vor, dass hochfrequente elektromagnetische Felder Lernen und Kognition negativ beeinflussen könnten.
- Weiterhin mangelte es an tierexperimentellen Langzeitstudien über mehr als eine Generation hinweg, vor allem zum Mobilfunkstandard UMTS, dessen Signalcharakteristik sich von der GSM-Signalcharakteristik wesentlich unterscheidet. Generell bestand die Besorgnis, dass Kinder besonders empfindlich gegenüber negativen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder sein könnten. Epidemiologische Studien zu Langzeiteffekten durch Mobilfunk bei Kindern fehlten völlig.
- Auch einen Einfluss auf das Hörsystem könnte man sich bei einer langen Exposition durch hochfrequente Felder vorstellen. In Ermangelung einer Erklärung zur Entstehung des Tinnitus wurde die Hypothese aufgestellt, dass der chronische Einfluss hochfrequenter Felder eine Ursache für die Entstehung dieses Phänomens sein könne.

Als Ergebnis stellte das BfS fest:

- Durch die Studien des DMF wird die Hypothese einer Schädigung der Blut-Hirn-Schranke durch hochfrequente elektromagnetische Felder unterhalb der Grenzwerte nicht gestützt. Dies gilt sowohl für eine chronische Ganzkörperexposition, die auch vorgeburtliche Entwicklungsstadien bei Tieren umfasste, als auch für eine lokale akute Exposition am Kopf.
- In keiner der über drei und vier Generationen hinweg durchgeführten tierexperimentellen Studien mit ununterbrochener Exposition von Mobilfunkfeldern fanden sich Hinweise auf eine negative Beeinflussung des Immunsystems, sehr empfindlicher Nervenzellen (CA1-Neuronen) sowie der Stressantwort. Ebenso konnten keine Hinweise auf eine negative Beeinflussung von Lernen und Kognition gefunden werden.
- Bei chronischer Ganzkörperexposition zeigte sich kein schädigender Einfluss auf Fortpflanzung und Entwicklung.
- In einem etablierten und validierten Tiermodell für Tinnitus wurde ein möglicher Einfluss einer chronischen Exposition durch hochfrequente Felder auf die Entstehung des Tinnitus untersucht. Weder unterhalb noch oberhalb des Teilkörpergrenzwertes von 2 W/kg und weder in Verhaltenstests noch auf molekularer Ebene wurden Hinweise auf die Induktion von Tinnitus gefunden.

5.5 BEFINDLICHKEITSSTÖRUNGEN

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

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

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat im Jahr 2005 den Kenntnisstand im Fact Sheet 296 zusammengefasst. Darin heißt es [36]:

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

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

Um bestehende Kenntnislücken zu schließen, wurden im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms (DMF) auch mehrere Untersuchungen zu Befindlichkeitsbeeinträchtigungen durchgeführt. Im Abschlussbericht vom Mai 2008 zieht das Bundesamt für Strahlenschutz folgendes Fazit [35]:

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

5.6 BEEINTRÄCHTIGUNGEN BEI IMPLANTATEN UND KÖRPERHILFEN

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

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

Eine längere Störung von lebenserhaltenden aktiven Implantaten kann nicht nur während der Exposition, sondern auch noch wesentlich später zu lebensbedrohlichen Situationen führen (z. B. bei Insulinpumpen).

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

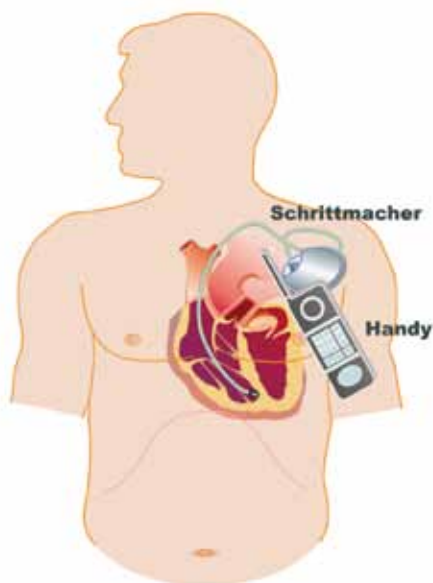
Eines der am häufigsten verwendeten aktiven Implantate ist der Herzschrittmacher. In Deutschland lebten 2007 ca. 500.000 Personen mit einem solchen Implantat. Daher dient der Herzschrittmacher hier als Beispiel für mögliche Wechselwirkungen von elektromagnetischen Feldern mit ak-

tiven Implantaten. Dies kann analog auf andere aktive Implantate übertragen werden.

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

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

Insbesondere bei Patienten ohne eigenen Herzrhythmus (atrioventrikulärer oder AV-Block) können sich lebensbedrohliche Situationen entwickeln, wenn mehrere Schrittmacher-Reize ausbleiben. In der Praxis treten derartige Komplikationen jedoch



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

äußerst selten auf. Gelegentlich werden Kreislaufbeeinträchtigungen bis hin zur Bewusstlosigkeit als Folge einer längeren Störbeeinflussung bei Herzschrittmacher-Patienten gemeldet.

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

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

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

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

Die pulsmodulierten Felder, die bei der Handynutzung auftreten, können keine

Störungen auslösen, wenn die betriebsbereiten Geräte in einem Abstand von mehr als 20 cm vom Implantat bzw. der Körperhilfe gehalten werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Störung durch Handys, die in höheren Frequenzbereichen arbeiten (GSM-1.800 und UMTS-Netz), wird niedriger eingeschätzt.

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

Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) hat dazu 2008 ein Positionspapier verfasst [37]. Darin plädiert es dafür, Bereiche freizugeben, in denen die Nutzung von Mobilfunktechnik vom Krankenhausbetreiber erlaubt wird. Dagegen sei in allen nicht freigegebenen Bereichen die Handynutzung zu untersagen. Nach Ansicht des BfArM kann sonst der sichere Betrieb von Medizinprodukten auf Intensivstationen, in Eingriffsräumen, beim Transport von Patienten in Gängen und in Krankenzimmern nicht gewährleistet werden.

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

5.7 AUSGEWÄHLTE EINZELSTUDIEN

Für Grenzwertempfehlungen wird die Gesamtheit der vorliegenden Studien kritisch bewertet. Dennoch führen Medien und Interessengruppen immer wieder einzelne Studien als Beleg für ein besonderes Gefährdungspotenzial an. Daher hat das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) 2005 einige dieser kontrovers diskutierten Studien zusammengestellt und sowohl die Schlussfolgerungen der Autoren als auch die Stellungnahmen von Fachgremien hinzugefügt. Die Broschüre „Mobilfunk – Ein Gesundheitsrisiko? Studien – kontrovers diskutiert“ kann von der Internetseite des LGL heruntergeladen werden [38].

2007 gab das LGL die Broschüre „Mobilfunk: Mobilfunkbasisstationen und menschliche Befindlichkeit“ heraus [39]. Die LUBW veröffentlichte bereits 2004 die Broschüre „Mobilfunk und Gesundheit – Aktuelle Forschungsergebnisse im Überblick“ [40]. Sie gibt eine kompakte Einführung in das Thema und fasst wesentliche Erkenntnisse zusammen.

Eine neuere Zusammenstellung der Studien, die öffentliches Interesse erweckt haben, findet man beim BfS [41]. Einige davon wurden bereits vom LGL verwendet, andere sind erst kürzlich ins öffentliche Interesse gerückt.

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

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

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

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

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

6. Grenzwerte

**Kompakte Informationen
zum Thema finden Sie
auf Seite 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 nicht ionisierender 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 Strahlung elektromagnetischer Felder aufgestellt hat.

Diese Vorschläge wurden nach und nach von Gesetzgebern auf internationaler und nationaler Ebene aufgegriffen und mit kleinen Abweichungen im eigenen Geltungsbereich eingeführt. Daher stimmt die deutsche Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) mit der Empfehlung des Rates der Europäischen Union zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder aus dem Jahre 1999 auch weitgehend überein. Die Grenzwerte werden von der Strahlenschutzkommission (SSK) durch regelmäßige Neubewertung der Literatur überprüft [42]. Die Schutzwirkung der Grenzwerte für den Bereich des Mobilfunks wurde jüngst durch das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm des Bundesamts für Strahlenschutz bestätigt.

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

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

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

6.1 EMPFEHLUNGEN DER EUROPÄISCHEN UNION

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

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

Basisgröße für die Wirkung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder ist die im menschlichen Körper hervorgerufene Stromdichte in A/m². Bei den Frequenzen der Energieversorgung werden

von der ICNIRP und der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) als Basisgrenzwerte für beruflich exponierte Personen 10 mA/m² und für die Allgemeinbevölkerung 2 mA/m² (siehe Tabelle unten) empfohlen. Die Stromdichte wird dabei über eine Fläche von 1 cm² 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 Ganzkörper-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 Tabelle unten).

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

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

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

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

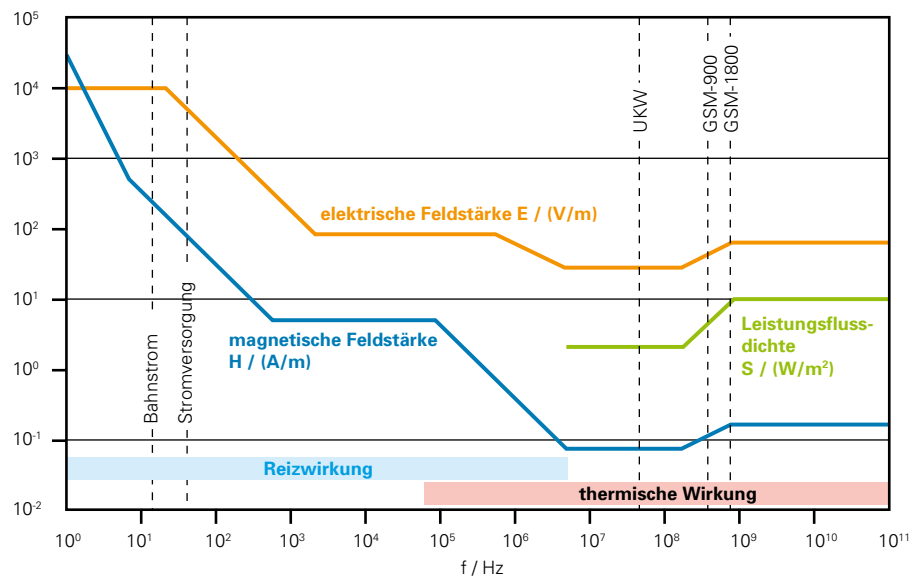
Die Referenzwerte für die Expositionsbegrenzung werden aus den Basisgrenzwerten für eine maximale Kopplung des Feldes im exponierten menschlichen Körper ermittelt. Die Abbildung unten gibt die Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder für den Frequenzbereich zwischen 1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

6.2 REGELUNGEN IN DEUTSCHLAND

In Deutschland wurde 1996 zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern die Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) von der Bundesregierung mit Zustimmung des Bundesrates erlassen [43]. Die Bundesregierung und der Bundesrat werden dazu im § 23 Absatz 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) ermächtigt. Die darin festgelegten Grenzwerte basieren auf den international anerkannten Empfehlungen der ICNIRP und der SSK.

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

Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 1 Hz bis 100 GHz für die Allgemeinbevölkerung (ungestörte Effektivwerte).
Quelle: EU, 1999



Im Niederfrequenzbereich sind die relevanten Frequenzen von 16 2/3 Hz und 50 Hz berücksichtigt. Im Hochfrequenzbereich fallen Anlagen, die Frequenzen zwischen 10 MHz und 300 GHz ausstrahlen und eine bestimmte Sendeleistung überschreiten, unter die Verordnung. Nicht einbezogen sind Rundfunksender der Kurz- und Mittelwelle. Für den Frequenzbereich von 100 kHz bis 10 MHz kann auf die Empfehlungen der ICNIRP und der SSK zurückgegriffen werden [42].

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

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

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

Für den Bereich des Arbeitsschutzes wurde im Jahr 2002 die berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B11 für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit unter der Einwirkung elektromagnetischer Felder veröffentlicht [44].

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

Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen gemäß 26. BImSchV

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

Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen gemäß 26. BImSchV

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

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

Der quadratische Zusammenhang zwischen Feldstärke und Leistungsflussdichte führt dazu, dass zu den Grenzwerten der 26. BImSchV, die in Feldstärkeeinheiten angegeben sind, im Hochfrequenzbereich auch entsprechende Grenzwerte der Leistungsflussdichte existieren. Werden gemessene Feldstärken auf Feldstärke-Grenzwerte bezogen, so erhält man die **Grenzwertausschöpfung** GW-E für die elektrische Feldstärke (siehe auch Seite 96). Analoges gilt für die Grenzwertausschöpfung GW-P, wenn die Leistungsflussdichte verwendet wird.

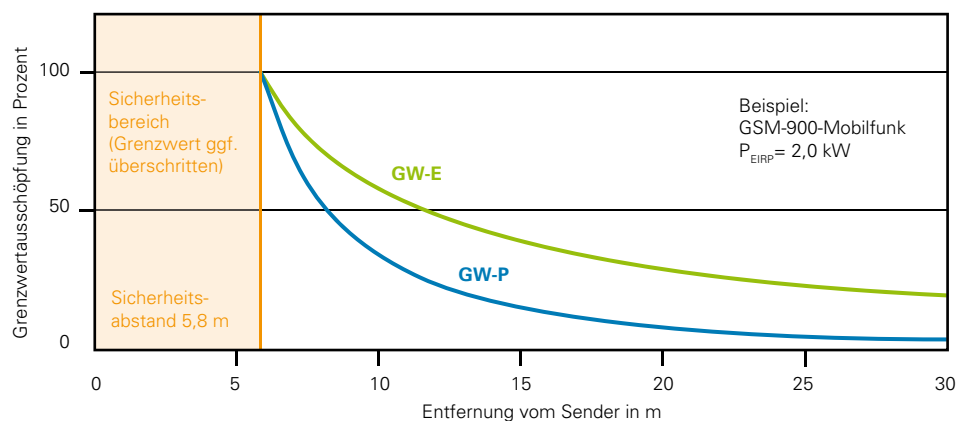
Der GW-P-Wert ist immer das Quadrat des GW-E-Wertes. Bei der Beurteilung einer gegebenen Grenzwertausschöpfung muss daher stets die Bezugsgröße genannt werden. Eine Grenzwertausschöpfung von zwei Prozent der elektrischen Feldstärke entspricht einer Grenzwertausschöpfung von 0,04 % der Leistungsflussdichte.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

6.3 SITUATION IM AUSLAND

Die meisten europäischen Staaten haben die Werte der EU-Ratsempfehlung von 1999 – sofern sie überhaupt gesetzliche Regelungen erlassen haben – als gesetzlich festgelegte Grenzwerte übernommen [45].

In einigen EU-Mitgliedsländern gelten niedrigere Grenzwerte. In Italien etwa wird unterschieden in Expositionsgrenzwerte, die generell nicht überschritten werden dürfen, und Vorsorgegrenzwerte, die in allen Bereichen gelten, an denen sich Menschen länger als vier Stunden aufhalten können. Im Mobilfunkbereich liegen die italienischen Expositionsgrenzwerte ein-

*Sicherheitsabstand und Verlauf
von GW-E und GW-P*



heitlich bei 20 V/m (ICNIRP: 42 - 61 V/m), die Vorsorgewerte sind bis zu einem Faktor zehn niedriger (bezogen auf die elektrische Feldstärke) als nach ICNIRP [46, 47].

In der Schweiz gelten so genannte Anlagegrenzwerte. Diese beziehen sich auf die von einer einzelnen Anlage verursachten Felder und auf Orte, an denen sich Menschen längere Zeit aufhalten, wie beispielsweise Wohnungen, Schulen oder Krankenhäuser. Die Anlagegrenzwerte liegen beim Mobilfunk um den Faktor zehn, bei Hochspannungsleitungen um den Faktor 100 unter den ICNIRP-Werten [48]. Es ist anzumerken, dass auch in Deutschland an den meisten Orten die Schweizer Anlagegrenzwerte eingehalten werden (vgl. auch Kapitel 4).

Umgekehrt sind in Österreich höhere Grenzwerte gültig. Die Abweichungen zu ICNIRP sind jedoch marginal. Erwähnenswert ist das „Salzburger Modell“, das 1998 im Bundesland Salzburg eingeführt wurde. Dabei wurde ein Vorsorgewert für die Leistungsflussdichte von 1 mW/m^2 , später noch darunter, für die Summe aller durch Mobilfunkanlagen verursachten Immissionen festgelegt. Dieser Wert hatte keine Rechtsverbindlichkeit und wurde auch in Salzburg des Öfteren nicht eingehalten. Er beruhte auf einer Einzelstudie [49], deren Autoren stets klarstellten, dass ihre Ergebnisse keine Grenzwertfestsetzung rechtfertigen [50]. Inzwischen wendet die Stadt Salzburg diese Vorsorgewerte nicht mehr an.



III. Anhang

Elektromagnetische Felder im Alltag

Abkürzungen und Erläuterungen

A	Ampere, Einheit für die Stärke des → elektrischen Stroms
Absorption	Aufnahme von Strahlungsenergie und Umwandlung in Wärme
Amplitude	Maximalwert einer periodischen Schwingung
Athermische Effekte	Effekte, die nicht mit einer Erwärmung des Gewebes einhergehen
B	→ Magnetische Flussdichte
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung, Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Die 26. BImSchV ist die Verordnung über elektromagnetische Felder.
Bluetooth	Übertragungsstandard für die Vernetzung von Geräten per Funk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
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
DVB-T	Digital Video Broadcasting Terrestrial, aktueller Standard für digitales Antennenfernsehen in Europa
E	→ Elektrische Feldstärke
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power, äquivalente isotrope Strahlungsleistung. Sie gibt an, mit welcher Sendeleistung man eine in alle Raumrichtungen gleichmäßig abstrahlende Antenne (Kugelstrahler) versorgen müsste, um im → Fernfeld dieselbe Leistungsflussdichte zu erreichen wie mit einer bündelnden Antenne.
Elektrisches Feld	Elektrischer Zustand des Raumes, der von ruhenden (elektrostatisches Feld) oder bewegten elektrischen Ladungen und zeitlich veränderlichen magnetischen Feldern (elektromagnetisches Feld) erzeugt wird.
Elektrische Feldstärke	Maß für die Stärke des → 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.
Emission	Aussendung, Austrag. Hier: Summe aller Felder, die von einer Antenne ausgehen.
Epidemiologische Studie	Untersuchung, die mit größeren Gruppen der Bevölkerung durchgeführt wird, um unbekannte Zusammenhänge zwischen Ursache und Verbreitung von Krankheiten zu ermitteln. Die häufigsten Typen sind die Fall-Kontroll-Studie und die Kohortenstudie.
ERP	Equivalent Radiation Power, äquivalente Strahlungsleistung. Die ERP unterscheidet sich von der EIRP dadurch, dass zum Vergleich nicht der idealisierte Kugelstrahler, sondern eine in der Praxis realisierbare Antenne Halbwellendipol herangezogen wird.
ESL	Energiesparlampe
Fernfeld	Strahlungsfeld in großer Entfernung von der Quelle
Frequenz	Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, Einheit Hertz (Hz)
GSM	Weltweit verbreiteter Standard für den digitalen Mobilfunk. In Europa liegen die verwendeten Frequenzen um 900 MHz (GSM-900) und um 1800 MHz (GSM-1800), in den USA u. a. bei 1900 MHz (GSM-1900).
GIL	Gasisolierter Leiter
H	→ 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
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung), Oberschleißheim. Unabhängige Vereinigung von Wissenschaftlern zur Erforschung der Auswirkung nicht ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, weltweiter Berufsverband von Ingenieuren aus den Bereichen Elektrotechnik und Informatik, der Fachtagungen veranstaltet, Fachzeitschriften herausgibt und bei der technischen Normung mitwirkt.
Induktion	Vorgang, bei dem durch Änderung des von einem Leiter umschlossenen magnetischen Flusses ein elektrischer Strom (Wirbelstrom) erzeugt wird.
Influenz	Vorgang, bei dem in einem Körper durch äußere Felder Ladungen umverteilt werden, so dass an seiner Oberfläche lokal Überschüsse an positiven und negativen Ladungen auftreten.

Immission	Einwirkung, Eintrag. Hier: Feld oder Summe aller Felder, die auf die Umwelt oder den Menschen einwirken.
ionisierend	Ionisierende Strahlung bezeichnet Teilchenstrahlung oder elektromagnetische Strahlung, die aus Atomen oder Molekülen Elektronen entfernen kann, so dass positiv geladene Ionen oder Molekülreste zurückbleiben (Ionisation). Ionisierende Strahlung geht u. a. von radioaktiven Stoffen aus und ist gesundheitsschädlich.
Kohortenstudie	Untersuchung, in der eine Gruppe von Personen (Kohorte) mit bekannten Expositionsbedingungen über längere Zeit beobachtet wird. Dabei wird versucht, die verschiedenen Expositionen mit dem Auftreten von Krankheiten in Verbindung zu bringen.
Kontaktstrom	Strom zwischen einer Person und einem Gegenstand
KW	Kurzwellen: Dekameterwellen (10 bis 100 m bzw. 3 bis 30 MHz)
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LW	Langwellen: Kilometerwellen (1 bis 10 km bzw. 30 bis 300 kHz)
Latenzzeit	Zeit zwischen Reiz und Wirkung
Leistung	Pro Zeit verrichtete Arbeit oder aufgewandte Energie, Einheit Watt (W)
Leistungsflussdichte	Maß für die Stärke einer hochfrequenten Strahlung, Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2)
Leukämie	Krebs der weißen Blutzellen, Ursachen weitgehend unbekannt. Inzidenzhäufigkeit jährlich 40 bis 50 Fälle je 1 Million Einwohner. Es gibt mehrere Typen mit unterschiedlichem Krankheitsverlauf und unterschiedlicher Heilungswahrscheinlichkeit.
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
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 Belastung 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.
Nicht ionisierend	Im Gegensatz zur ionisierenden Strahlung kann die nicht ionisierende Strahlung aufgrund ihres geringen Energiegehalts Molekularbindungen nicht zerstören. Die Absorption nicht ionisierender Felder wird mit Hilfe des SAR-Wertes bestimmt.
S	→ Leistungsflussdichte
SAR	Spezifische Absorptions-Rate, beschreibt, wie viel Leistung pro Kilogramm Körpergewicht (bzw. biologischem Material) absorbiert wird (in W/kg), wenn der Körper hochfrequenter Strahlung ausgesetzt ist. Grenzwerte in Deutschland: Ganzkörper 0,08 W/kg; Teilkörper 2 W/kg, gemittelt über 10 g Körpergewebe
Sendeleistung	Die von einer Antenne abgestrahlte elektrische Leistung, angegeben in Watt (W), als → ERP oder →EIRP
Skin-Effekt	Effekt, bei dem der Strom aus dem Inneren eines Leiters an seine Oberfläche verdrängt wird
SSK	Strahlenschutzkommission. Deutsches Wissenschaftsgremium, berät das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in Fragen des Schutzes vor den Gefahren ionisierender und nichtionisierender Strahlen.
StMUG	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
T	Tesla, Einheit der → magnetischen Flussdichte
UHF	Ultra High Frequency, Mikrowellen im Dezimeterbereich Dezimeterwellen: 0,1 bis 1 m bzw. 0,3 bis 3 GHz
UKW	Ultrakurzwellen: Meterwellen (1 bis 10 m bzw. 30 bis 300 MHz)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, Übertragungsstandard für Mobilfunk, Nachfolgestandard zu GSM. Erlaubt eine schnellere Datenübertragung, die verwendeten Frequenzen liegen um 2.000 MHz (UMTS-2000)
V	Volt, Einheit der → elektrischen Spannung
VHF	Very High Frequency (englisch für UKW)
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
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, Übertragungsstandard u. a. für drahtlose Internet-Zugänge
WLL	Wireless Local Loop; Vorläufer von WiMAX. Technik zur Einrichtung eines Telefonanschlusses über Funk
WLAN	Wireless Local Area Network, funkgestütztes lokales Netzwerk
Wirbelstrom	Durch Induktion in einem leitfähigen Körper erzeugter elektrischer Strom

DARSTELLUNG GROSSER UND KLEINER ZAHLENWERTE

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

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

Literatur und Internetquellen

II KAPITEL 2

NATÜRLICHE ELEKTROMAGNETISCHE FELDER

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

II KAPITEL 3

NIEDERFREQUENTE UND STATISCHE FELDER

- [5] Bundesamt für Strahlenschutz: Andere Anwendungen elektromagnetischer Felder
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > statische/niederfrequente Felder > Andere Anwendungen
- [6] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BauA):
„Schienengebundene Transportsysteme. Teil 2: Exposition durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder an Fernbahn, S-, U-Bahn und Straßenbahn“ Forschungsbericht Fb 800
www.baua.de > Publikationen > Schriftenreihe > Forschungsberichte > Forschungsberichte 1998 > Fb 800
- [7] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt: Magnetfelder von Fahrleitungen
www.bafu.admin.ch > Elektromog > Quellen > Eisenbahn > Magnetfelder von Fahrleitungen
- [8] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:
„Erfassung der niederfrequenten magnetischen Exposition der Bürger in Bayern“
Materialien Nr. 134, 1998 Teile der Studie sind im Internet verfügbar:
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > statische/niederfrequente Felder > Vorkommen im Alltag
- [9] Siemens AG: Gasisolierte Übertragungsleitungen
www.siemens.de > Corporate Responsibility > Umweltschutz > Umweltportfolio > Energieübertragung
- [10] Strahlenschutzpraxis: Felder von Energiesparlampen (2009)
„Ermittlung und Bewertung elektrischer und magnetischer Felder von Kompaktleuchtstofflampen“
www.strahlenschutzpraxis.com > Ausgabe 3/2009
- [11] Schweizerisches Bundesamt für Gesundheit (BAG): Induktionskochherd
www.bag.admin.ch > Suche: Induktionskochherd

II KAPITEL 4

HOCHFREQUENTE FELDER

- [12] Bundesnetzagentur: Funkanlagenstandorte
www.bundesnetzagentur.de > Sachgebiete > Telekommunikation > technische Regulierung Telekommunikation > Elektromagnetische Felder (EMF) > Statistik
sowie Bundesnetzagentur: Marktbeobachtung
www.bundesnetzagentur.de > Presse > Marktbeobachtung > Mobilfunkdienste > Teilnehmerentwicklung
- [13] Bundesnetzagentur: EMF-Datenbank für Sender und Messstandorte
<http://emf.bundesnetzagentur.de>
- [14] Global mobile Suppliers Association: Informationen zum GSM- und UMTS-Standard, www.gsacom.com > Fast Facts
- [15] Forschungsgesellschaft Funk: EMF-Monitoring – Eine Bilanz der Bundesnetzagentur Newsletter 4/2007 (Dezember 2007)
www.fgf.de > Publikationen > Newsletter > Jahrgang 2007
- [16] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Minimierung von Immissionen, Schirmung
www.lfu.bayern.de > Strahlung > Fachinformationen > Nicht ionisierende Strahlung > Minimierung
- [17] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Informationen zum Mobilfunk
www.mobilfunk-information.de > Hintergrund > Technik
- [18] EMF-Institut Dr. Niessen: Informationen über Handys
www.handywerte.de Connect – Magazin für Telekommunikation und Handys
www.connect.de > Handys > SAR/Strahlung > Strahlungsbestenliste
- [19] Bayerisches Landesamt für Umwelt: EMF-Monitoring
EMF-Monitoring in Bayern 2002/2003 (April 2006) bzw. 2006/2007 (August 2008)
www.lfu.bayern.de > Strahlung > Fachinformationen > Nicht ionisierende Strahlung > Messung und Bewertung elektromagnetischer Felder
- [20] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Digitaler Rundfunk im 21. Jahrhundert „Digitaler Hörfunk und digitales Fernsehen in Deutschland“ (09/2005)
www.bmwi.de > Suchfunktion verwenden oder Google
- [21] Kommission zur Ermittlung des Finanzbedarfs der Rundfunkanstalten:
16. Bericht (12/2007), www.kef-online.de > Berichte > 16. Bericht
- [22] Bundesnetzagentur: Sachgebiet Amateurfunk
www.bundesnetzagentur.de > Sachgebiete > Telekommunikation > Regulierung Telekommunikation > Frequenzordnung > Amateurfunk
- [23] Breitbandinitiative Bayern: Strahlenbelastung bei Funk-Breitband
„Hochfrequenz-Immissionen durch funkbasierte Breitbanddienste“ Teil 1 (09/2007)
„Hochfrequenz-Immissionen durch funkbasierte Breitbanddienste“ Teil 2 (09/2008)
www.breitband.bayern.de > Strahlenbelastung bei Funk-Breitband
- [24] Bundesamt für Strahlenschutz: Warensicherungsanlagen
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > BfS Texte zum Thema > Warensicherungsanlagen
- [25] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: RFID-Technik
www.mobilfunk-information.de > Hintergrund > Technik > RFID-Technik

- [26] EMF-Forschungsprogramm: DECT, WLAN, WiMAX, Bluetooth, Babyfone u.v.m.
 „Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro“ (07/2005)
www.emf-forschungsprogramm.de > Forschungsvorhaben > Dosimetrie > Abgeschlossene Forschungsprojekte Dosimetrie
- [27] Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlungsarme DECT-Schnurlostelefone
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > strahlungsarme DECT-Telefone
- [28] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: „Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg Ergebnisse des Funkwellenmessprojekts 2001 bis 2003“ (07/2003)
www.lubw.de > Themen > Elektromagnetische Felder > Messungen > Funkwellen-Messprojekt

II KAPITEL 5

BIOLOGISCHE WIRKUNGEN

- [29] UNEP/WHO/IRPA, Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields, Geneva 1987
- [30] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74(4) 494-522, 1998.
- [31] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Gesundheitliche Aspekte niederfrequenter Felder (2007) „Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria Monograph No. 238“, www.who.int/emf
- [32] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm „Das Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm – Ein wichtiger Beitrag zur transparenten Wissenschaft und zu offenen Fragen des Strahlenschutzes“ (2008)
www.bfs.de > Druckerzeugnisse > Broschüren
- [33] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
 Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF)
www.emf-forschungsprogramm.de (Stand November 2008)
- [34] 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
- [35] 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.
- [36] Weltgesundheitsorganisation (WHO): Elektrosensibilität „Electromagnetic hypersensitivity - Fact Sheet N°296“ (2005)
www.who.int/emf > EMF publications & information resources > Fact Sheets and archives

- [37] Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM):
Mobilfunk in Krankenhäusern „Nutzung von Mobilfunktechnik in medizinischen Einrichtungen“ Referenz-Nr.: 9/0508 (2008)
www.bfarm.de > Medizinprodukte > Informationen über Risiken > Empfehlungen des BfArM
- [38] Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL):
„Mobilfunk – Ein Gesundheitsrisiko? Studien –kontrovers diskutiert“ (05/2005)
www.lgl.bayern.de > Publikationen > Umweltmedizin
- [39] Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL): ,
„Mobilfunk: Mobilfunkbasisstationen und menschliche Befindlichkeit“ Band 18
(12/2007), www.lgl.bayern.de > Publikationen > Umweltmedizin
- [40] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW): Mobilfunk und Gesundheit – Aktuelle Forschungsergebnisse im Überblick (Juni 2004)
www.lubw.de > Elektromagnetische Felder > Informationen
- [41] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Beurteilung von Studien über Mobilfunkstrahlung „Studien, die öffentliches Interesse geweckt haben“ (2008)
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > BfS-Texte zum Thema

II KAPITEL 6

GRENZWERTE

- [42] Strahlenschutzkommission: Prüfung der Grenzwerte durch die SSK
„Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern“ (09/2001)
www.ssk.de > Strahlenschutz Themen > Elektromagnetische Felder > 2001
- [43] Gesetze im Internet: Gesetzliche Grenzwerte für elektrische und magnetische Felder
„Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder vom 16. Dezember 1996 – 26. BImSchV)“ (12/1996)
www.gesetze-im-internet.de > Gesetze/Verordnungen > 2 > 26. BImSchV
- [44] Bundesamt für Strahlenschutz: Berufsgenossenschaftliche Vorschriften im Umgang mit elektromagnetischen Feldern „BGV B11 Elektromagnetische Felder“ (06/2001)
www.bfs.de > Gesetze und Regelungen > Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz > 1 Rechtsvorschriften B > 1B-37.2
- [45] Deutscher Bundestag: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kotting-Uhl, Katrin Göring-Eckardt, Cornelia Behm
„Planung, Aufstellung und Grenzwerte von Mobilfunkanlagen im Kontext der freiwilligen Selbstverpflichtung der Mobilfunkbetreiber von 2001“ (07/2007)
<http://drucksachen.bundestag.de> > Bundestagsdrucksache 16/6133
- [46] Weltgesundheitsorganisation WHO: Grenzwerte in Italien
„Electromagnetic Fields (EMF) Protection: Italy“ (06/2004)
www.who.int > Health topics > E > Electromagnetic fields > Worldwide standards database Europe > Italy

- [47] Weltgesundheitsorganisation WHO: Grenzwerte in Italien
„Decreto del presidente del consiglio dei ministri: Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz” (07/2003)
www.who.int > Health topics > E > Electromagnetic fields > Worldwide standards database > Europe > Italy > GU n.199
- [48] Schweizerische Eidgenossenschaft: Die NISV-Verordnung
„Verordnung vom 23. Dezember 1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)“ (12/1999)
www.admin.ch > Suche: NISV
- [49] Neuropsychobiologie: Auswirkung von gepulster HF-Strahlung auf den menschlichen Schlaf
„Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep” (1996)
Neuropsychobiology Vol. 33 No. 1
www.doi.org > Resolve a DOI name > 10.1159/000119247
- [50] Salzburger Fenster, Interview mit J. Röschke, April 2000

WEITERE INFORMATIONEN ZU EINZELNEN THEMEN

- Elektromagnetische Felder allgemein
Schweizerisches Bundesamt für Umwelt
www.bafu.admin.ch > Elektromog
Hier ist auch unter Publikationen die Broschüre „Elektromog in der Umwelt“ (2005) als Datei im pdf-Format herunterladbar.
- Niederfrequente Felder
Bundesamt für Strahlenschutz: Allgemeine Informationen
www.bfs.de > Elektromagnetische Felder > statische/niederfrequente Felder
- Bahnstrom
Deutsche Bahn AG: Über 100 Jahre Eisenbahn unter elektrischem Fahrdrat
Geschichte der Elektrifizierung des Schienennetzes
www.deutschebahn.com > Konzernprofil > Geschichte > Themen > Bahnstrom
- Feldberechnungsprogramme
Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH:
Feldberechnungsprogramm WinField®
www.fgeu.de
- EMF-Portal des Forschungszentrums für
Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit femu
www.emf-portal.de > Unter der Rubrik „Feldquellen“ können eine Vielzahl von technisch erzeugten Quellen elektromagnetischer Felder abgefragt werden. Man erhält Informationen über die Stärke der auftretenden Felder.
- Wikipedia: kostenloses Onlinelexikon de.wikipedia.org
Stichworte: Frequenzband; Amateurband; Amateurfunk; RFID; DECT; Bluetooth; WLAN; GSM; UMTS; elektromagnetische Strahlung; Elektromagnetisches Spektrum; Elektromagnetische Welle; Inverse-square law (en.wikipedia.org)

■ Elektromoginfo

Informationsseite zum Thema Elektromog von Dipl. Ing. Ralf Dieter Wölfl
www.elektromoginfo.de

■ Mobilfunk Basisinformationen, Informationsseiten der LUBW

www.lubw.de > Elektromagnetische Felder > Mobilfunk

■ ukw.tv.de: Liste bekannter Rundfunksender

www.ukw.tv.de > Sendertabelle

Bildnachweis

INSTITUTION	SEITE
LUBW, Karlsruhe	1, 3, 8, 13, 15, 25, 27, 31, 35, 44, 46, 47, 48, 49, 51, 53, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 72, 73, 79, 87, 91, 92, 98, 99, 100, 104, 105, 106, 107, 108, 117
LfU, Augsburg	3, 23, 25, 27, 70, 72, 74, 76, 78, 79, 80, 81, 84, 85, 87, 97, 128
ÖkoMedia, Shutterstock, Pixelio	1, 6, 11, 13, 15, 17, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 35, 39, 41, 47, 51, 54, 55, 56, 57, 69, 70, 81, 93, 95, 103, 136
AVM GmbH	94
BMW Group	74
Bundesnetzagentur, Bonn	77
EM-Institut GmbH, Regensburg	83
Europäische Union	43, 126
GeoForschungsZentrum, Potsdam	9, 53
Gigaset Communications	94
FGEU mbH, Berlin	19, 63
IDV GmbH, Langenselbold	68
IMST GmbH, Kamp-Lintfort	37, 110
Landeshauptstadt München	23
LMU München	69
Mike Rupprecht (DK 3WN.info)	89
Sharp Electronics	93
Siemens AG, München	64, 65
Wikipedia (GNU)	72, 88
Wimax-Telekom Austria	90
PHYSIOMED ELEKTROMEDIZIN AG	33

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

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