

# EMF-Handbuch

Elektromagnetische Felder:  
Quellen, Risiken, Schutz



ECOLOG 

INSTITUT FÜR SOZIAL - ÖKOLOGISCHE  
FORSCHUNG UND BILDUNG gGmbH



# EMF-Handbuch

Elektromagnetische Felder:  
Quellen, Risiken, Schutz



# EMF-Handbuch

## Elektromagnetische Felder: Quellen, Risiken, Schutz

Text: Dr. H.-Peter Neitzke  
Dr. Julia Osterhoff  
Dr. Hartmut Voigt  
unterstützt durch:  
Julia Glahe  
Dr. Silke Kleinhückelkotten

Redaktion: Gesa Fiedrich

Gestaltung: Stephan Dezelske  
Dezelske Designstudio  
Elbinger Straße 5  
D-31319 Sehnde  
post@dezelske-design.de

Verlag: ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH  
Nieschlagstr. 26  
D-30449 Hannover  
mailbox@ecolog-institut.de  
ISBN 3-9807954-2-X

© 2006 ECOLOG-Institut, alle Rechte vorbehalten





<b>0</b>	<b>EINLEITUNG</b>	
<b>1</b>	<b>EIGENSCHAFTEN ELEKTROMAGNETISCHER FELDER</b>	<b>1-1</b>
1.1	Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	1-1
1.2	Hochfrequente elektromagnetische Felder	1-3
1.3	Elektromagnetisches Spektrum	1-4
1.4	Messung elektromagnetischer Felder	1-6
<b>2</b>	<b>RISIKEN DURCH ELEKTROMAGNETISCHE FELDER</b>	<b>2-1</b>
2.1	Wissenschaftliche Risikobewertung	2-1
2.2	Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	2-2
2.3	Hochfrequente elektromagnetische Felder	2-9
<b>3</b>	<b>SCHUTZ VOR ELEKTROMAGNETISCHEN FELDERN</b>	<b>3-1</b>
3.1	Grenz- und Vorsorgewerte	3-1
3.2	Maßnahmen zur Begrenzung elektromagnetischer Immissionen	3-2
3.3	Persönlicher Schutz vor elektromagnetischen Feldern	3-5
<b>4</b>	<b>QUELLEN ELEKTROMAGNETISCHER FELDER</b>	<b>4-1</b>
4.1	Übersicht	4-1
4.2	Natürliche Quellen	4-6
4.3	Stromversorgungsanlagen	4-8
4.4	Elektrische Installationen und Elektrogeräte in Wohnungen	4-14
4.5	Bahnanlagen und Züge	4-20
4.6	Sicherungsanlagen	4-22
4.7	Radio- und Fernsehsender	4-26
4.8	Mobilfunk	4-29
4.9	Schnurlose Telefone	4-41
4.10	WLAN und Bluetooth	4-43
4.11	Radar	4-50
4.12	Andere Funkdienste	4-52
4.13	Anlagen und Maschinen an Arbeitsplätzen	4-56
	<b>ANHÄNGE</b>	
<b>G</b>	<b>GLOSSAR</b>	
<b>K</b>	<b>KONTAKTE UND INFORMATIONEN</b>	





## Einleitung

Das elektromagnetische Umfeld hat sich in den letzten hundert Jahren in den hochtechnisierten Ländern drastisch verändert. Die natürlicherweise vorhandenen Felder werden überlagert von Feldern technischen Ursprungs, die in vielen Frequenzbereichen nicht nur viel stärker sind, sondern auch Merkmale aufweisen, die es bei den natürlichen Feldern so nicht gibt. Daher stellt sich zu Recht die Frage, ob und welche Gefahren für Umwelt und Gesundheit von diesen Feldern ausgehen. Eine wissenschaftlich allgemein akzeptierte Antwort auf diese Frage gibt es trotz Jahrzehnten der Forschung bisher nicht. Dies liegt zum einen an der Komplexität der Materie, zum anderen sind wissenschaftliche Bewertungen nicht frei von persönlichen und institutionellen Interessen. Die Positionen, die in der wissenschaftlichen Diskussion über Risiken eingenommen werden, die möglicherweise von elektromagnetischen Feldern ausgehen, beruhen daher nicht allein auf fachlichen Argumenten, sondern es stehen oft auch wirtschaftliche Abhängigkeiten und Interessen gegen das Schutzbedürfnis betroffener Bürger, Paradigmen des wissenschaftlichen Mainstreams gegen unkonventionelle Denkansätze oder das Bemühen, den Anspruch einer wertfreien Wissenschaft aufrecht zu erhalten, gegen die Überzeugung, dass auch Wissenschaft einer gesellschaftlichen Verantwortung unterliegt.

Eine abschließende Antwort auf die Frage, welche Risiken von den technogenen elektromagnetischen Feldern tatsächlich ausgehen, kann auch dieses Handbuch nicht geben. Das Autorenteam, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am ECOLOG-Institut, hat aber versucht, Informationen zusammenzutragen, die helfen können, die von sehr unterschiedlichen technischen Quellen ausgehenden elektromagnetischen Expositionen und die mit ihnen möglicherweise verbundenen Risiken einzuschätzen. Ein zweites Anliegen war, Möglichkeiten zum vorsorgenden Schutz vor elektromagnetischen Feldern aufzuzeigen. Ein besserer Schutz der Bevölkerung ist notwendig, denn obwohl bisher auch nur die gesundheitsschädigenden Wirkungen sehr starker Felder eindeutig nachgewiesen wurden, gibt es doch ernst zu nehmende wissenschaftliche Hinweise, dass auch Felder geringerer Intensität gesundheitlich relevante Wirkungen haben.

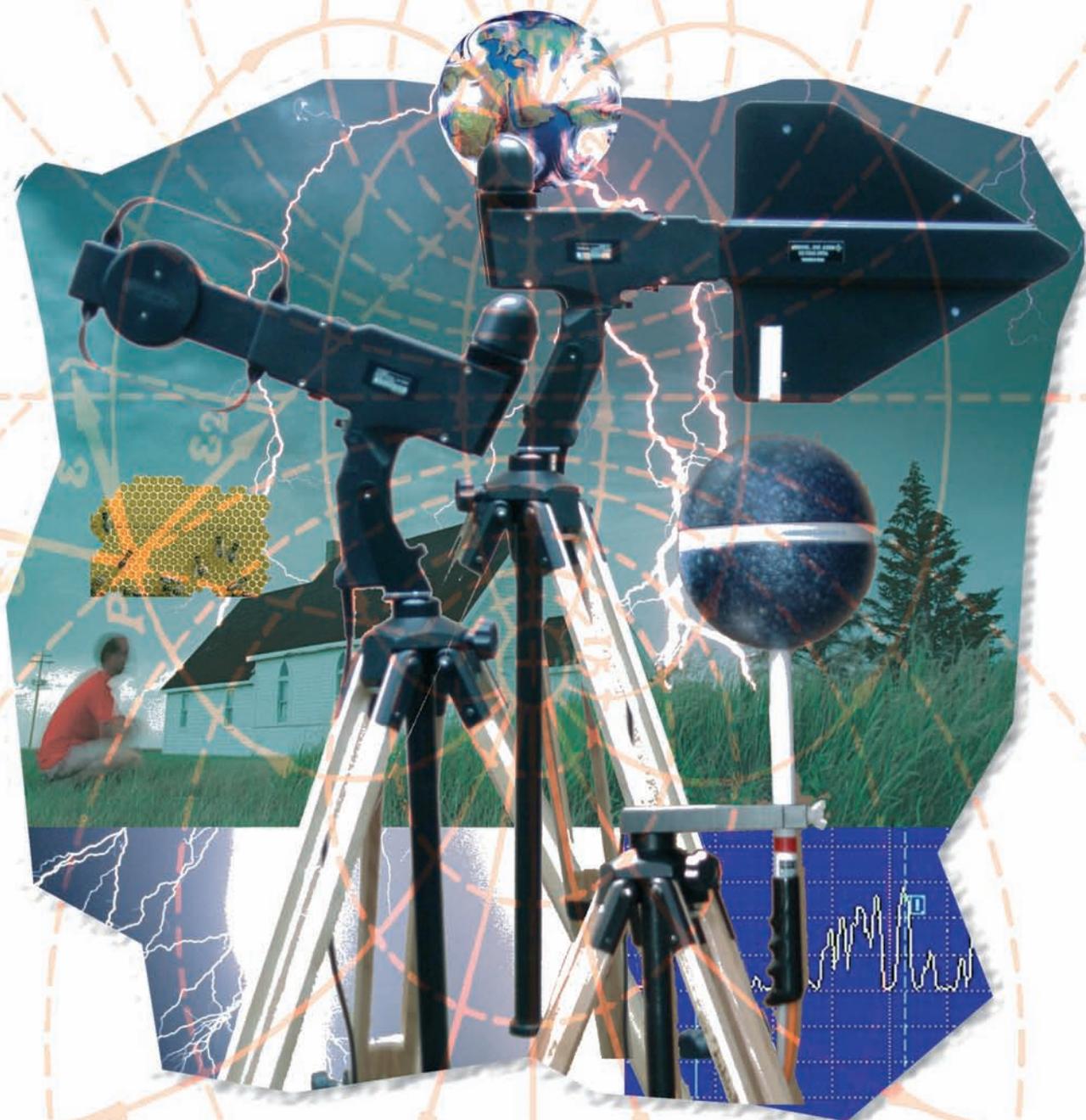
Da es sich bei elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern um wenig anschauliche physikalische Phänomene handelt, die Kenntnis ihrer grundlegenden Eigenschaften für das Verständnis des Folgenden aber wichtig ist, werden diese im Kapitel 1 kurz dargestellt. Hier werden auch die Maßeinheiten eingeführt, die im weiteren Text verwendet werden. Im Kapitel 2 wird ein Überblick über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand zu biologischen Effekten und gesundheitlich relevanten Auswirkungen elektromagnetischer Felder gegeben. Hier stellt sich natürlich das Problem der Bewertung der mitnichten immer konsistenten, oft sogar widersprüchlichen Befunde. Hierzu gibt es einige einführende Erläuterungen. Dieses Kapitel enthielt ursprünglich eine große Zahl von Hinweisen auf wissenschaftliche Publikationen zu den beschriebenen Untersuchungsergebnissen. Um der besseren Lesbarkeit willen, wurden diese aber bis auf einige illustrierende Beispiele herausgenommen. Im Anhang 'Kontakte und Informationen' sind stattdessen einschlägige Arbeiten des ECOLOG-Instituts aufgeführt, in denen die wissenschaftliche Literatur ausgewertet wurde und die Hinweise auf die Originalarbeiten enthalten. In diesem Anhang werden zudem ergänzende Informationsquellen angegeben. Gesetzliche und darüber hinausgehende Maßnahmen zum Schutz vor elektromagnetischen Feldern werden im Kapitel 3 beschrieben. Diese werden im Kapitel 4 ergänzt um Hinweise, was bei konkreten Quellen getan werden kann, um Belastungen zu vermeiden oder zu vermindern. Im Kapitel 4 werden die häufigsten Quellen nieder- und hochfrequenter Felder zunächst aber hinsichtlich ihrer technischen Merkmale und der von ihnen verursachten Expositionen ausführlich beschrieben. Da die Leserinnen und Leser dieses Handbuchs wahrscheinlich sehr unterschiedliche Wissenshintergründe haben und sich Fachbegriffe nicht immer vermeiden lassen, gibt es in einem zweiten Anhang ein Glossar, in dem diese kurz erklärt werden.

Im folgenden Text werden, wo immer es möglich ist, geschlechtsneutrale Formulierungen verwendet. Wo es von der Sache her geboten erscheint, werden Begriffe explizit in ihrer weiblichen und männlichen Form benutzt. An anderen Stellen folgt die Wortwahl um der besseren Lesbarkeit willen den allgemeinen sprachlichen Konventionen. Aus Sicht der Autorinnen und Autoren bedeutet dies keine Geringschätzung der Rolle von Frauen in Gesellschaft und Wissenschaft.



# Eigenschaften elektromagnetischer Felder

1







## 1 Eigenschaften elektromagnetischer Felder

Der Begriff 'elektromagnetische Felder' bezeichnet eigentlich eine bestimmte Art bzw. Kombination von (hochfrequenten) Feldern. Er wird zur Vereinfachung jedoch oft auch als Sammelbegriff für alle Arten niederfrequenter elektrischer und magnetischer (s. Kapitel 1.1) sowie hochfrequenter elektromagnetischer (s. Kapitel 1.2) Felder gebraucht. Die verschiedenen Feldarten haben aber sehr unterschiedliche Ursachen und Eigenschaften. Auch mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hängen von den genauen Eigenschaften des betreffenden Feldes ab. Der Begriff 'elektromagnetische Felder' wird daher im Folgenden nur benutzt, wenn tatsächlich (hochfrequente) elektromagnetische Felder gemeint sind oder wenn eine Unterscheidung (nach nieder- oder hochfrequenten, elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern) nicht notwendig ist.

### 1.1 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Der Niederfrequenzbereich umfasst Felder mit Frequenzen von 0 Hz (statische Felder) bis 30 kHz (zu den Frequenzeinheiten s.u.).

#### Elektrische Felder

Elektrische Felder treten immer im Zusammenhang mit elektrischen Spannungen auf. Ein elektrisches Feld wird im Allgemeinen durch mindestens drei Größen gekennzeichnet: die **Elektrische Feldstärke**, die **Frequenz** und die **Richtung**.

Die **Elektrische Feldstärke** ist das Maß für die Stärke elektrischer Felder. Sie wird in der Einheit 'Volt pro Meter' (abgekürzt: V/m) gemessen. Um bei sehr hohen und sehr niedrigen Frequenzen die Schreibweise zu vereinfachen, werden weitere abgeleitete Einheiten verwendet (s. Kasten 1.1). Elektrische Felder gibt es überall, wo elektrische Spannungen auftreten.

Die **Frequenz** ist das Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich die Stärke bzw. Richtung regelmäßig schwingender elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder ändert. Frequenzen werden in der Einheit 'Hertz' (abgekürzt: Hz) gemessen. Ein Feld, das seine Rich-

#### Kasten 1.1

##### Einheiten für elektromagnetische Größen

###### Frequenz

Grundeinheit: Hertz (Hz)

abgeleitete Einheiten:

1 Kilohertz (1 kHz) = 1.000 Hz

1 Megahertz (1 MHz) = 1.000 kHz

1 Gigahertz (1 GHz) = 1.000 MHz

1 Terahertz (1 THz) = 1.000 GHz

###### Elektrische Feldstärke

Grundeinheit: Volt pro Meter (V/m)

abgeleitete Einheiten:

1 Millivolt pro Meter (1 mV/m = 0,001 V/m)

1 Kilovolt pro Meter (1 kV/m = 1.000 V/m)

###### Magnetische Induktion

Grundeinheit: Tesla (T)

abgeleitete Einheiten:

1 Millitesla (1 mT) = 0,001 T = 1/1.000 T

1 Mikrottesla (1  $\mu$ T) = 1/1.000 mT

1 Nanotesla (1 nT) = 1/1.000  $\mu$ T

###### Leistungsdichte

Grundeinheit: Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>)

abgeleitete Einheiten:

1 Milliwatt pro Quadratmeter (1 mW/m<sup>2</sup>) = 0,001 W/m<sup>2</sup> = 1/1.000 W/m<sup>2</sup>

1 Nanowatt pro Quadratcentimeter (1 nW/cm<sup>2</sup>) = 0,000.01 W/m<sup>2</sup>

1 Millitesla (1 mT) = 0,001 T = 1/1.000 T

1 Mikrottesla (1  $\mu$ T) = 1/1.000 mT

1 Nanotesla (1 nT) = 1/1.000  $\mu$ T

###### Leistungsdichte

Grundeinheit: Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>)

abgeleitete Einheiten:

1 Milliwatt pro Quadratmeter (1 mW/m<sup>2</sup>) = 0,001 W/m<sup>2</sup> = 1/1.000 W/m<sup>2</sup>

1 Nanowatt pro Quadratcentimeter (1 nW/cm<sup>2</sup>) = 0,000.01 W/m<sup>2</sup>

tung 100mal pro Sekunde ändert hat eine Frequenz von 100 Hz. Die allgemeine Stromversorgung erfolgt mit elektrischen Wechselspannungen einer Frequenz von 50 Hz. Die

Anlagen sind von **elektrischen Wechselfeldern** dieser Frequenz umgeben. Elektrische Felder, deren Stärke konstant ist oder sich im Laufe der Zeit allenfalls langsam ändert, die aber keine regelmäßigen Schwingungen ausführen, haben die Frequenz Null und heißen **elektrische Gleichfelder** oder **statische Felder**. Solche Felder treten z.B. an Batterien oder an Fernseh- und Computerbildschirmen auf. Da bei hohen Frequenzen die Schreibweise mit vielen Nullen unpraktisch ist, werden neben der Grundeinheit Hz auch noch andere Einheiten benutzt (s. Kasten 1.1).

Die **Richtung** des elektrischen Feldes ist durch die Lage und Ladung der Pole festgelegt, zwischen denen eine Spannung besteht.

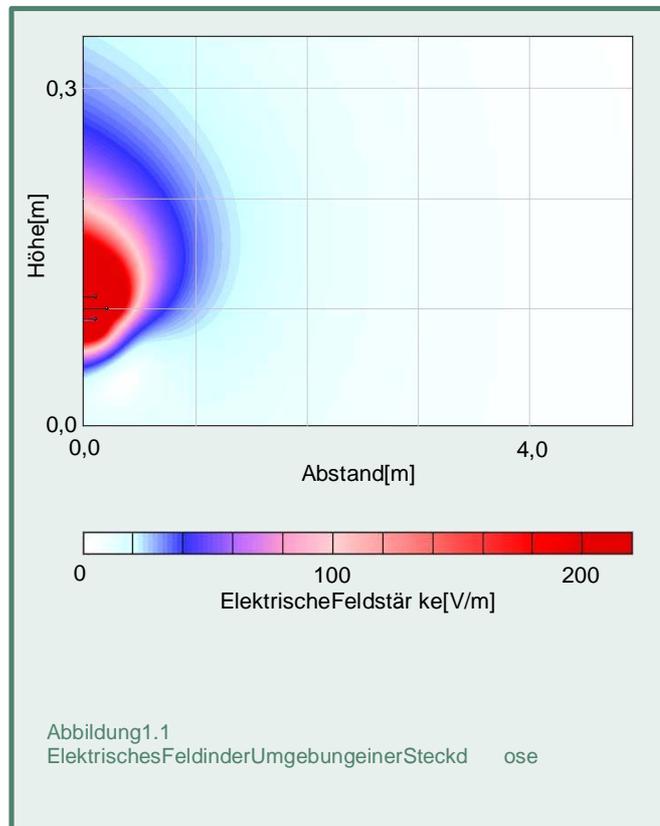
Jede elektrische Spannung führt zu einem elektrischen Feld. Daher sind elektrische Hochspannungsleitungen und elektrische Anlagen bis hin zur Steckdose von elektrischen Feldern umgeben. Für die Entstehung elektrischer Felder ist es nicht notwendig, dass ein elektrischer Strom fließt. Es gibt z.B. elektrische Felder in der Umgebung einer Steckdose (s. Abbildung 1.1) oder einer Batterie, ohne dass ein Verbraucher angeschlossen ist. Wird der Stecker eines elektrischen Gerätes in eine Steckdose gesteckt, so bildet sich um das Anschlusskabel und das Gerät ebenfalls ein elektrisches Feld aus, unabhängig davon, ob das Gerät eingeschaltet ist oder nicht.

Im Hinblick auf die Wirkungen elektrischer Felder und eventuelle Schutzmaßnahmen sind zwei Eigenschaften wichtig:

- Die Abschirmung elektrischer Felder ist durch elektrisch leitfähige Materialien mit Erdung relativ leicht möglich.
- Elektrische Wechselfelder erzeugen in elektrisch leitfähigem Material (Metalle, organisches Gewebe) elektrische Wechselströme. In lebenden Organismen können solche Ströme, wenn sie hinreichend stark sind, zu akuten Schäden führen. Ob und wie sich Langzeitexpositionen in schwächeren Feldern gesundheitlich auswirken, ist wissenschaftlich umstritten (s. Kapitel 2.2).

### Magnetische Felder

Magnetische Felder treten auf, sobald in einer Leitung oder in einem elektrischen Gerät ein elektrischer Strom fließt.



Die Stärke des Magnetfeldes hängt von der Stärke des elektrischen Stroms und vom Abstand zu der Leitung bzw. dem Gerät ab. Elektrische Gleichströme erzeugen **magnetische Gleichfelder**, das heißt Felder mit einer konstanten oder nur sehr langsam und nicht periodisch schwankenden Stärke. Bei den Feldern von Permanentmagneten handelt es sich ebenfalls um Gleichfelder, die durch mikroskopische elektrische Ströme hervorgerufen werden. Elektrische Wechselströme führen zu **magnetischen Wechselfeldern**, deren Stärke sich mit der Stromstärke zeitlich periodisch ändert.

Die Eigenschaften eines magnetischen Feldes werden durch die **Magnetische Feldstärke** bzw. die **Magnetische Flussdichte**, seine **Frequenz** und seine **Richtung** bestimmt.

Die **Magnetische Feldstärke** ist das Maß für die Stärke magnetischer Felder. Sie wird in der Einheit 'Ampere pro Meter' (abgekürzt: A/m) angegeben. Die Magnetische Feldstärke ist eine eher theoretische Einheit, tatsächlich messen kann man die **Magnetische Flussdichte** mit der Einheit 'Tesla' (T). Da die Einheit 'Tesla' sehr groß ist und

in der Praxis überwiegend magnetische Flussdichten mit nur einem Bruchteil von 1 T auftreten, wird meist die Einheit Mikrottesla ( $\mu\text{T}$ ) verwendet. In Gebrauch sind aber auch noch weitere Einheiten (s. Kasten 1.1).

Die **Richtung** des Magnetfeldes ist durch die Richtung des elektrischen Stroms vorgegeben.

Um elektrische Geräte oder Maschinen entstehen erst dann magnetische Felder, wenn diese eingeschaltet sind und elektrische Ströme fließen (Beispiel s. Abbildung 1.2). An Hochspannungsleitungen treten magnetische Felder erst auf, wenn an den Leitungen nicht nur die Hochspannung liegt, sondern durch sie auch tatsächlich ein elektrischer Strom fließt.

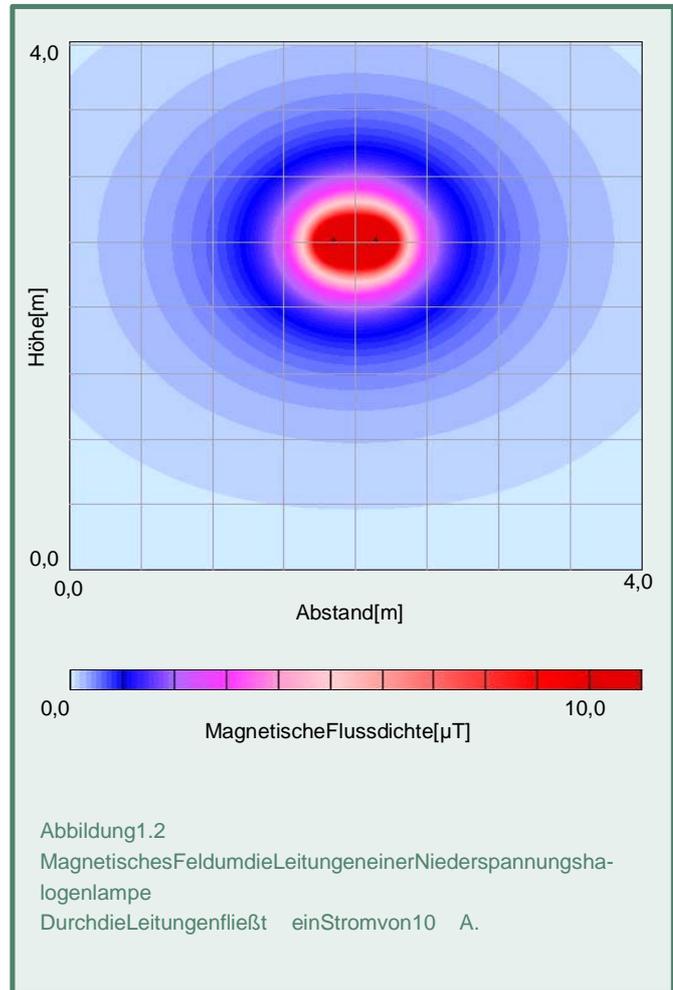
Auch bei den Magnetfeldern ist auf zwei wichtige Eigenschaften hinzuweisen:

- Die Abschirmung magnetischer Felder ist nur begrenzt und mit erheblichem Aufwand möglich.
- Magnetische Wechselfelder induzieren in elektrisch leitfähigem Material (Metalle, organisches Gewebe) kreisförmige elektrische Wechselströme. Diese Ströme können bei Stärken oberhalb bestimmter Schwellenwerte beim Menschen und anderen Lebewesen zu akuten Gesundheitsschäden führen. Es werden jedoch auch biologische Effekte unterhalb dieser Schwellen festgestellt und es gibt Hinweise auf Gesundheitsschäden durch (Dauer-) Expositionen in relativ schwachen Feldern (s. Kapitel 2.2). Hierfür gibt es bisher noch kein wissenschaftlich allgemein akzeptiertes Wirkungsmodell.

## 1.2 Hochfrequente elektromagnetische Felder

Der Hochfrequenzbereich umfasst den Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz.

Grundsätzlich wird jedes sich zeitlich ändernde elektrische Feld von einem Magnetfeld begleitet und jedes sich zeitlich ändernde Magnetfeld von einem elektrischen Feld. Wenn die Veränderungen langsam sind, die Frequenz also niedrig ist, ist die Kopplung zwischen den beiden Feldern jedoch sehr schwach, was dazu führt, dass im Niederfrequenzbereich elektrische und magnetische Felder praktisch unabhängig voneinander sind. Bei hohen Frequenzen treten



elektrisches und magnetisches Feld dagegen nur in Kombination miteinander auf – man spricht daher von einem **elektromagnetischen Feld** bzw. von einer **elektromagnetischen Welle**.

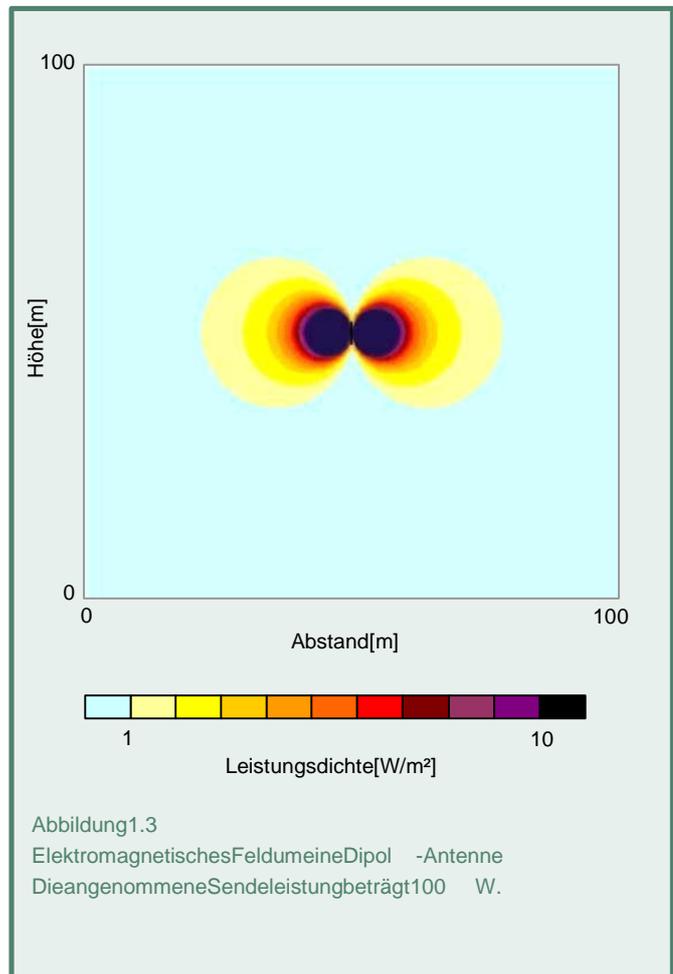
Ein elektromagnetisches Feld wird durch seine **Frequenz** und seine **Intensität** charakterisiert. Letztere wird anhand der Stärke des elektrischen Feldanteils (**Elektrische Feldstärke**, s.o.) oder der **Leistungsdichte** bestimmt. Die **Leistungsdichte** wird in der Einheit 'Watt pro Quadratmeter' (abgekürzt:  $\text{W}/\text{m}^2$ ) angegeben. In der Einheit  $\text{W}/\text{m}^2$  stecken die Einheit 'Watt' für die Energiemenge pro Sekunde und die Einheit 'Quadratmeter' für die Fläche. Das heißt, die Leistungsdichte gibt die Energiemenge an, die durch das elektromagnetische Feld pro Sekunde auf eine bestimmte Fläche übertragen wird. Neben der Einheit  $\text{W}/\text{m}^2$  sind noch eine Reihe anderer Einheiten in Gebrauch (s. Kasten 1.1).

Zur weiteren Charakterisierung hochfrequenter elektromagnetischer Felder kann manchmal noch die Angabe der **Polarisation** des Feldes, das heißt der Richtung, in der der elektrische Feldanteil schwingt, notwendig sein. Viele Antennentypen können z.B. nur Felder einer bestimmten Polarisationsrichtung empfangen oder aussenden. Für die Informationsübertragung durch elektromagnetische Felder aber auch für ihre biologische Wirkung ist zudem die Art der **Modulation** wichtig. Vom Radio her sind die Bezeichnungen **AM** und **FM** bekannt, die für Amplituden- bzw. Frequenzmodulation stehen. Im ersten Fall erfolgt die Informationsübertragung durch eine dem zu übertragenden Signal proportionale Veränderung (Modulation) des Maximalwerts (Amplitude) der elektrischen Feldstärke, im zweiten Fall werden zur Signalübertragung Änderungen der Frequenz der elektromagnetischen Trägerwelle benutzt. Eine weitere Form der Modulation ist die **Pulsmodulation**, bei der die Information durch Änderungen in der zeitlichen Abfolge bzw. der Länge von Funkpulsen erfolgt. Ein einfaches Beispiel hierfür ist das Morse. Beim Mobilfunk wird die zu übertragende Information in einzelne Pakete zerlegt, die in aufeinander folgenden Funkpulsen ausgesandt werden. Der Modulation, mit der die eigentliche Informationsübertragung erfolgt, ist dadurch eine zusätzliche Pulsstruktur überlagert.

In Abbildung 1.3 ist das elektromagnetische Feld in der Umgebung einer einfachen Dipol-Antenne dargestellt.

Bei den hochfrequenten elektromagnetischen Feldern sind zwei Eigenschaften bemerkenswert:

- Hochfrequente elektromagnetische Felder können durch Bleche, Folien oder Netze aus elektrisch leitfähigem Material, vor allem Metalle, relativ leicht abgeschirmt werden.
- Hochfrequente elektromagnetische Felder erzeugen in elektrisch leitfähigem Material (Metalle, organisches Gewebe) Wärme. Im unteren Hochfrequenzbereich (bis etwa 1 MHz) sind die Ursache hierfür die in dem Material erzeugten elektrischen Ströme und der elektrische Widerstand des Materials. Bei höheren Frequenzen wird der so genannte 'thermische Effekt' in biologischem Gewebe durch Absorption der Strahlung, vor allem durch Wassermoleküle, hervorgerufen. Bei hohen Intensitäten kann dieser Effekt in Gewebe mit einem hohen Wassergehalt zu einer starken Erwärmung führen.



ung führen. Dies wird im Mikrowellenkochgerät ausgenutzt. Zu hohe Erwärmungen können zu Verbrennungsschäden im Gewebe oder zur thermischen Überlastung des Organismus führen. Die Ergebnisse zahlreicher wissenschaftlicher Versuche zeigen jedoch, dass auch Felder, die so schwach sind, dass eine messbare Erhöhung der Temperatur im Gewebe ausgeschlossen werden kann, biologisch wirksam und wahrscheinlich auch gesundheitsschädlich sind (s. Kapitel 2.3). Diese Wirkungen können bisher wissenschaftlich noch nicht schlüssig erklärt werden.

### 1.3 Elektromagnetisches Spektrum

Der Gesamtbereich aller elektromagnetischen Felder mit unterschiedlichen Frequenzen wird als elektromagnetisches Spektrum bezeichnet. Das elektromagnetische Spektrum beginnt bei den so genannten **statischen Feldern**. Zu diesen Feldern mit der Frequenz 0 Hz zählt auch das Erd-



magnetfeld, da es bis auf kleine 24-Stunden-Schwankungen und langfristige Änderungen über hunderte von Jahren praktisch konstant ist.

Es schließt sich der **Niederfrequenzbereich** an, der den Bereich von den niedrigsten Frequenzen bis zur Frequenz 30 kHz umfasst. Zu den niederfrequenten Feldern gehören unter anderem die Felder an elektrifizierten Eisenbahnstrecken (Frequenz 16,7 Hz) und die Felder um elektrische Leitungen, Geräte und Maschinen (in Europa 50 Hz, in Nordamerika 60 Hz, sowie so genannte Oberwellen, das heißt Felder mit ganzzahligen Vielfachen dieser Grundfrequenzen). Felder mit Frequenzen im Bereich 10 bis 30 kHz werden von einigen Marinefunkanlagen abgestrahlt.

Oberhalb von 30 kHz bis 300 GHz erstreckt sich der **Hochfrequenzbereich**, der insbesondere zur Nachrichtenüber-

tragung und zur Ortung (Radar) aber auch zur Materialbearbeitung und -prüfung genutzt wird. Bis 300 MHz werden die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Felder auch als Radiowellen, darüber als Mikrowellen bezeichnet.

Mit weiter steigenden Frequenzen schließt sich die Infrarotstrahlung an, gefolgt von dem engen Bereich des sichtbaren Lichts.

Alle diese Wellen und Strahlen werden als **nicht-ionisierende Strahlung** bezeichnet, da sie nicht in der Lage sind, aus Atomen oder Molekülen ein Elektron herauszuschlagen und es dadurch zu ionisieren. Erst mit den energiereicheren ultravioletten Strahlen beginnt der Bereich der ionisierenden Strahlung. Dazu gehören auch die Röntgenstrahlung, die beim radioaktiven Zerfall entstehenden Gammastrahlen und die kosmische Höhenstrahlung.

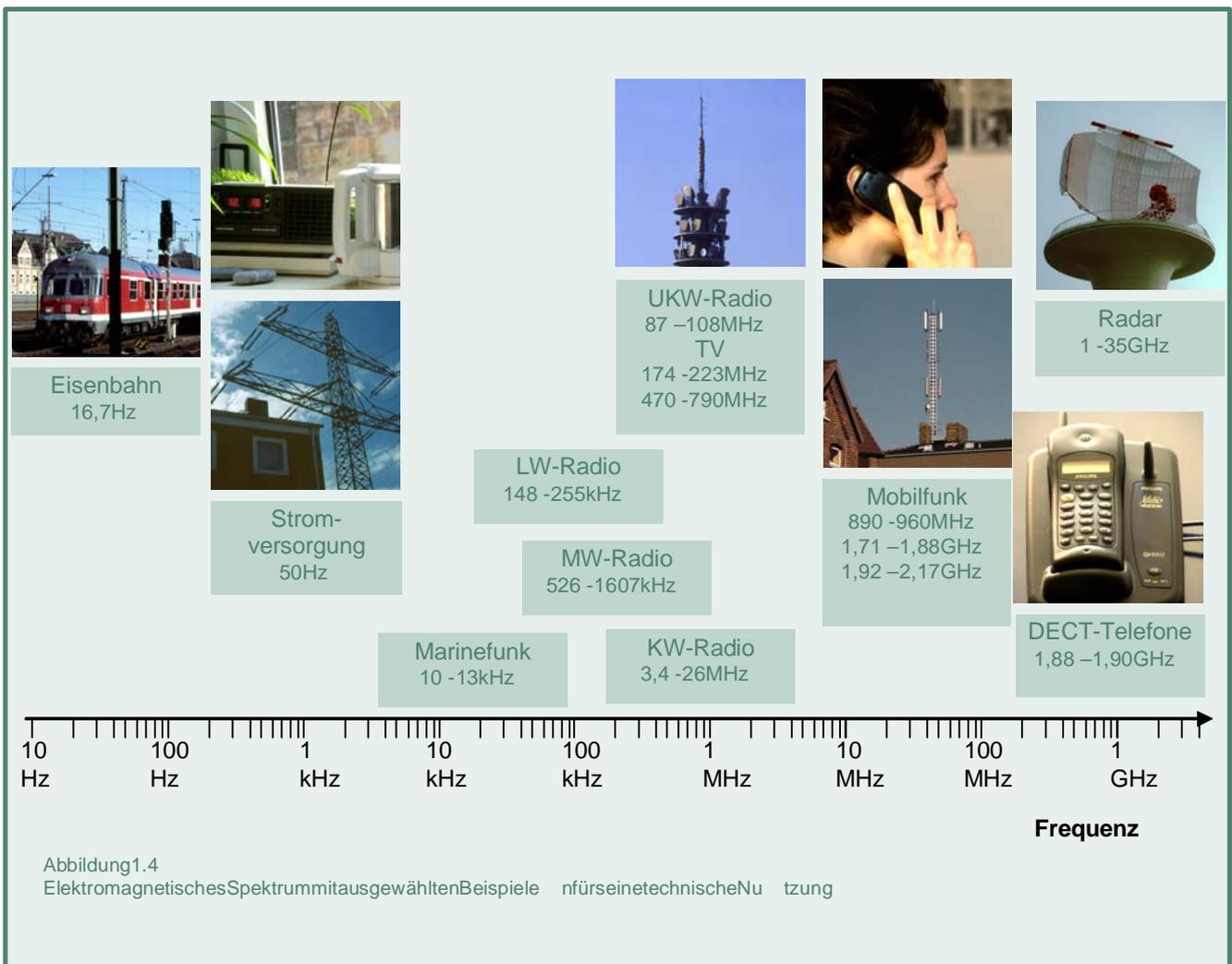


Abbildung 1.4  
Elektromagnetisches Spektrum mit ausgewählten Beispielen für seine technische Nutzung

Das elektromagnetische Spektrum mit einigen beispielhaften Quellen elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder ist in Abbildung 1.4 für den Bereich zwischen 10 Hz und einigen GHz dargestellt.

In Tabelle 1.1 sind die weiteren Unterteilungen des elektromagnetischen Spektrums mit ihren Bezeichnungen und Beispielen aufgeführt.

### 1.4 Messung elektromagnetischer Felder

Frequenz, Stärke und Richtung bzw. Polarisation niederfrequenter elektrischer und magnetischer sowie hochfrequenter elektromagnetischer Felder können mit entsprechenden Messgeräten sehr genau bestimmt werden. Auch Messungen der Zeitstruktur (zeitlich konstant, gleichmäßig schwingend, gepulst usw.) sind mit speziellen Messgeräten möglich und es gibt Geräte, die über viele Stunden und Tage automatisch Messwerte aufnehmen können und damit die Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Immissionen

erlauben. Für Messungen im Nieder- und im Hochfrequenzbereich sind jedoch jeweils eigene Messgeräte erforderlich.

Bei der Messung der elektrischen Feldstärke wird der Effekt ausgenutzt, dass diese Felder zu Verschiebungen der elektrischen Ladungen in den Messsonden führen, die als elektrische Spannung gemessen werden können. Die Messung der Stärke niederfrequenter magnetischer Felder ist unter anderem über die Bestimmung der Stärke der Ströme möglich, die diese in Spulen erzeugen. Abbildung 1.5 zeigt ein Messgerät mit Messsonde zur Messung niederfrequenter Magnetfelder.

Im Hochfrequenzbereich kann die Stärke der Felder ebenfalls anhand der Ladungsverschiebungen bzw. der elektrischen Spannungen am Ausgang der Messantennen bestimmt werden. Für unterschiedliche Frequenzbereiche werden verschiedene Typen von Messantennen eingesetzt. Abbildung 1.6 zeigt Messantennen für die Frequenzbereiche (a) 20 bis 200 MHz und (b) 500 bis 3000 MHz. Zur

Tabelle 1.1  
Frequenzbereich des elektromagnetischen Spektrums

Frequenz	Bezeichnung	Beispiele
<b>Niederfrequenzbereich</b>		
0 Hz	statische Felder	Permanentmagnete, Batterien, Erdmagnetfeld
0 Hz bis 3 Hz	ultraniederfrequente (ULF) Felder	
3 Hz bis 3.000 Hz	extremniederfrequente (ELF) Felder	elektrische Bahnanlagen, Stromversorgung
3 kHz bis 30 kHz	sehrniederfrequente (VLF) Felder	U-Boot-Kommunikation
<b>Hochfrequenzbereich</b>		
30 kHz bis 300 kHz	Langwellen	Radio
300 kHz bis 3.000 kHz	Mittelwellen	Radio, Amateurfunk
3 MHz bis 30 MHz	Kurzwellen	Radio, Amateurfunk, CB -Funk
30 MHz bis 300 MHz	sehrhochfrequente (VHF) Wellen	UKW-Radio, TV, Amateurfunk
300 MHz bis 3.000 MHz	ultrahochfrequente (UHF) Wellen	TV, Amateurfunk, Mobilfunk, Schnurlos-Telefon, Mikrowellenherd
3 GHz bis 30 GHz	superhochfrequente (SHF) Wellen	Radar, Richtfunk
30 GHz bis 300 GHz	extremhochfrequente (EHF) Wellen	Verkehrsradar
0,3 THz bis 400 THz	Infrarot (IR)	Fernbedienung
400 THz bis 750 THz	sichtbares Licht	Sonne, Beleuchtung
750 THz bis 300 000 THz	ultraviolettes Licht (UV)	Sonne, Solarien



Abbildung 1.5  
Messgerät für niederfrequente Felder mit einer isotropen Messsonde, die gleichzeitige Messungen magnetischer Felder aller Richtungen erlaubt

Es wird unterschieden zwischen

- frequenz-integralen Messverfahren, mit denen allein die Stärke des Gesamtfeldes bestimmt werden kann, das sich u.U. aus mehreren Anteilen mit unterschiedlichen Frequenzen zusammensetzt, und
- frequenz-selektiven Verfahren, bei denen Spektrumanalysatoren eingesetzt werden, um die Anteile mit verschiedenen Frequenzen zu trennen und einzeln zu messen. Abbildung 1.7 zeigt die Ergebnisse frequenz-selektiver Messungen im Nieder- und im Hochfrequenzbereich.

Frequenz-selektive Messgeräte sind immer dann erforderlich, wenn das Gesamtfeld möglicherweise ein Frequenzgemisch darstellt, aber Informationen über die Felder notwendig sind, die von bestimmten Quellen ausgehen. So wird es in einem Haus, das an einer elektrifizierten Bahnstrecke steht, Felder mit 50 Hz (Hauselektrik) und mit 16,7 Hz (Bahn) geben. Um den Beitrag der Bahnstrecke zu den Immissionen zu bestimmen, ist eine frequenz-selektive Messung unerlässlich. Im Hochfrequenzbereich gibt es eine Vielzahl von Quellen. Mit einer frequenz-selektiven Messung ist es möglich, festzustellen, wie stark die Felder sind, die von einer Mobilfunkanlage auf dem Nachbardach, dem schnurlosen DECT-Telefon in der eigenen Wohnung und dem drahtlosen Computernetzwerk (WLAN) des Nachbarn herrühren.

Messung hoher Leistungsdichten stehen auch Messsonden zur Verfügung, in denen der Effekt ausgenutzt wird, dass Hochfrequenzfelder zu einer Erwärmung führen, die gemessen und in Werte für die Leistungsdichte umgerechnet wird.



Abbildung 1.6  
Messantenne für hochfrequente Felder  
a) für den Frequenzbereich 20 bis 200 MHz



b) für den Frequenzbereich 500 bis 3000 MHz

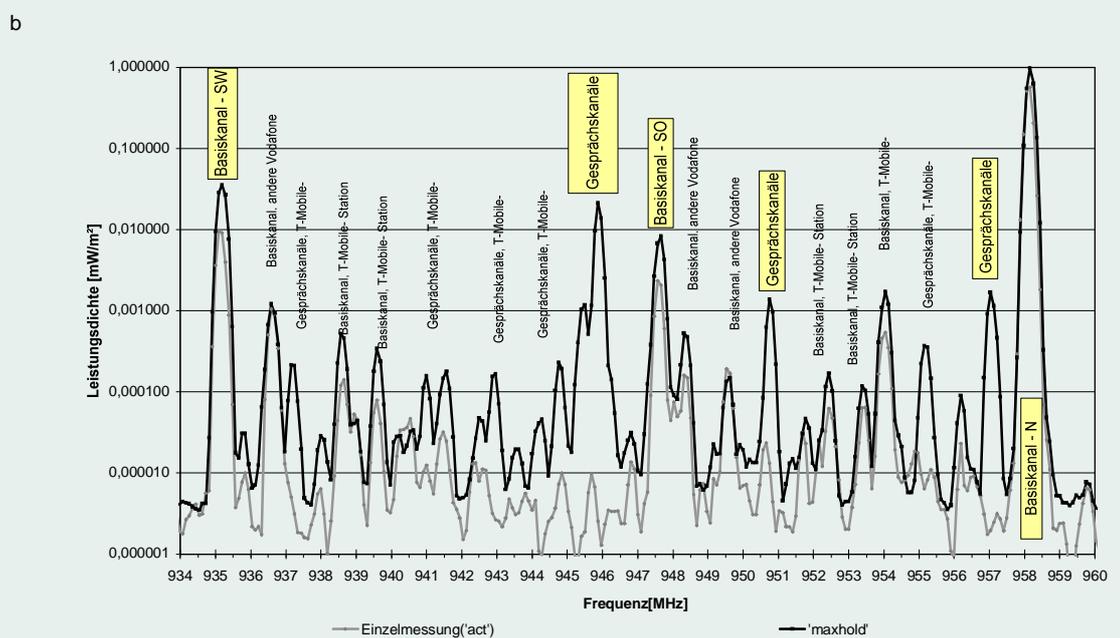
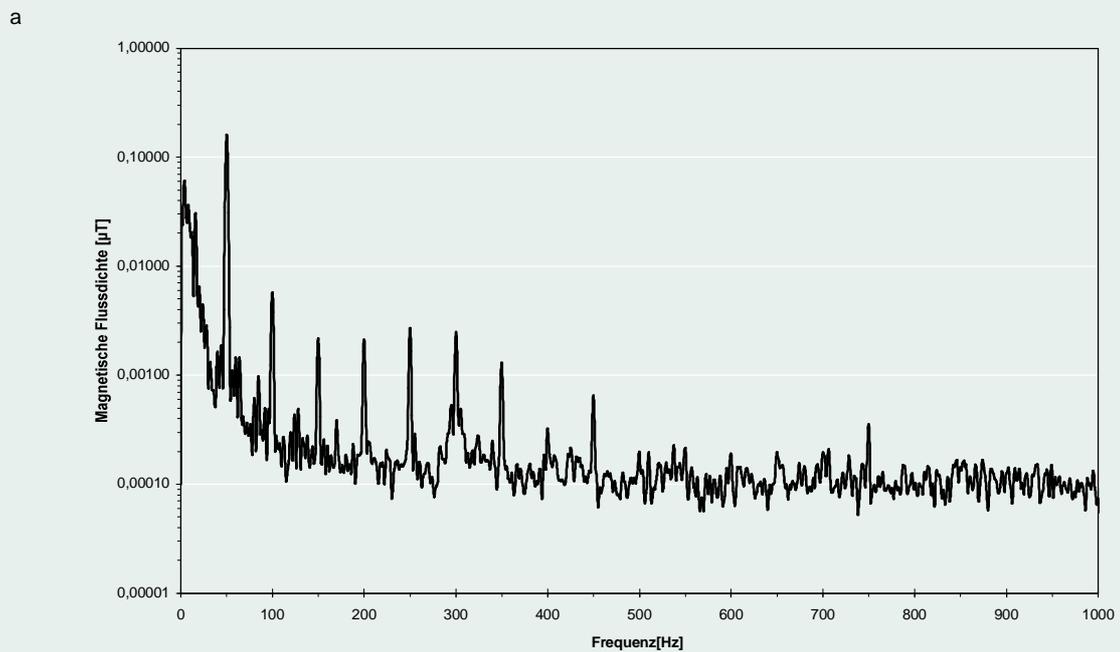


Abbildung 1.7

Ergebnisse frequenz-selektiver Messung

a) Messung des Magnetfeldes in einem Büro über einer Trafostation mit Beiträgen bei 50 Hz und ungeradzahligem Vielfachender Grundfrequenz

b) Messung des elektromagnetischen Feldes in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation (GSM 900).





## 2 Risiken durch elektromagnetische Felder

Die Bewertung möglicher Gesundheits- oder Umweltrisiken, die von einer wissenschaftlichen oder technischen Entwicklung ausgehen, sollte sich nach Möglichkeit auf gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse stützen. Aufgrund der Rasanzen der technischen Entwicklung liegen aber praktisch nie ausreichende und wissenschaftlich abgesicherte Informationen vor, die eine umfassende Risikobewertung erlauben. Mit Ausnahme des Arzneimittelbereichs, wo die Unbedenklichkeit einer Substanz vor der Zulassung durch umfangreiche Tierexperimente und klinische Untersuchungen nachgewiesen werden muss, geht man in fast allen anderen Bereichen, in denen eine neue Technologie eingeführt wird, bei der neue Stoffe, Organismen oder Strahlungsarten zum Einsatz kommen, von einer Unschädlichkeitsvermutung aus. Das heißt, neue Technologien werden angewandt, Stoffe, Organismen oder Strahlung mit bisher nicht bekannten Eigenschaften werden eingesetzt und eine Überprüfung erfolgt erst, wenn es Verdachtsmomente für schädliche Auswirkungen auf Gesundheit oder Umwelt gibt. Zugleich werden durch die Einführung und Anwendung der Technologie aber oft Fakten und wirtschaftliche Sachzwänge geschaffen, die hohe Anforderungen an die Beweiskraft von Argumenten zu ihrer möglicherweise gebotenen Einschränkung zur Folge haben. Die wissenschaftliche Überprüfung möglicher Risiken 'hinkt' der Anwendung jedoch oft um Jahre hinterher. Die politischen Entscheidungen über eine Reglementierung, aber auch wirtschaftliche Entscheidungen, z.B. im Hinblick auf die Absicherung im Schadensfall, müssen deshalb nicht selten vor dem Hintergrund nur teilweise gesicherter Erkenntnisse erfolgen.

Die Bewertung der Risiken, die möglicherweise von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern ausgehen, ist ein Beispiel für die oben beschriebene Problematik des Umgangs mit unvollständigem und unsicherem Wissen. Quellen dieser Felder sind einerseits Technologien, die bereits seit Jahrzehnten, z.B. im Zusammenhang mit der Energieversorgung oder der Informationsübertragung, breit angewandt werden, andererseits aber auch Technologien, wie der Mobilfunk, die erst in den letzten Jahren eine flächendeckende und sehr große Teile der Bevölkerung betreffende Anwendung gefunden haben. Elektromagneti-

sche Emissionen sind bei allen Funkanwendungen notwendige Voraussetzung für den Betrieb und daher beabsichtigt, beim Betrieb von Stromversorgungs- und Verkehrsanlagen erfolgen sie dagegen ungewollt.

Den rasanten Entwicklungen dieser Technologien steht ein nur langsam gewachsener wissenschaftlicher Erkenntnisstand zu möglichen Auswirkungen der Felder auf Umwelt und Gesundheit gegenüber. Während gesundheitsschädliche Wirkungen starker Felder wissenschaftlich eindeutig belegt sind, fehlt ein im strengen wissenschaftlichen Sinn eindeutiger wissenschaftlicher Nachweis solcher Wirkungen für schwächere Felder, denen die Bevölkerung im Alltag ausgesetzt ist (s. Kapitel 2.2, 2.3). Die vorliegenden Befunde sind jedoch als deutliche Hinweise auf mögliche Gefahren und hinreichender Anlass für vorsorgende Maßnahmen zum Gesundheits- und Umweltschutz zu werten.

### 2.1 Wissenschaftliche Risikobewertung

Gesundheitliche Schäden durch eine Noxe gelten dann als nachgewiesen, wenn entsprechende übereinstimmende Ergebnisse aus unabhängig voneinander durchgeführten Untersuchungen vorliegen. Von der Strahlenschutzkommission (SSK) wird in ihrer Stellungnahme zu den Risiken nicht-ionisierender Strahlung vom Juni 2001 zudem gefordert, dass es ein konsistentes Wirkungsmodell gibt, das die Wirkung der Noxe von der biologischen, biochemischen oder biophysikalischen Primärwirkung bis zum funktionellen Schaden beschreibt, wobei die biologischen Effekte auf den einzelnen Wirkungsebenen ebenfalls experimentell bestätigt sein müssen. Diese zusätzliche Forderung ist wissenschaftlich gerechtfertigt, jedoch aus Sicht des Gesundheits- und Umweltschutzes hoch problematisch, da die Bewertung der Evidenz für einen gesundheitsschädlichen Effekt und damit der Dringlichkeit von Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung möglicher Schäden davon abhängig gemacht wird, ob die Wissenschaft in der Lage ist, einen Wirkungsmechanismus zu benennen und zu überprüfen.

Gemessen an den Anforderungen der SSK müssen die toxischen Wirkungen vieler Umweltnoxen als unbewiesen gelten. Das gilt insbesondere für viele Noxen, die nicht akut toxisch sind, die aber im Verdacht stehen, bei chronischen Expositionen zu gesundheitlichen (Spät-) Schäden zu führen, wie beispielsweise viele Stoffe, die als wahrscheinlich

krebsauslösend oder krebsfördernd eingestuft wurden oder die möglicherweise endokrin wirksam sind. Die zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit vor den möglichen Wirkungen dieser Noxen getroffenen gesetzlichen Regelungen stützen sich auf mehr oder weniger gesicherte wissenschaftliche Hinweise.

In Fällen, in denen es wissenschaftliche Hinweise auf ein potentes Risiko gibt, das Risiko jedoch noch nicht voll nachweisbar ist oder wenn nicht messbar ist, in welchem Umfang ein Risiko besteht, bzw. wenn wegen unzureichender oder nicht eindeutiger wissenschaftlicher Daten nicht feststellbar ist, wie sich das Risiko auswirken kann, sollte nach einer Mitteilung der EU-Kommission vom Februar 2000 das Vorsorgeprinzip angewandt werden. Das heißt, es sind ordnungsrechtliche, technische und gegebenenfalls planerische Maßnahmen anzuwenden, um das potentielle Risiko zu vermindern.

Unter dem Gesichtspunkt der Vorsorge ist eine simple Ja-Nein-Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes anhand der Kategorien 'bewiesen' / 'nicht bewiesen' also nicht ausreichend. Bisher konnte sich eine differenziertere Klassifizierung aber noch nicht durchsetzen. Erste Ansätze hierzu gibt es jedoch (s. Tabelle 2.1).

Im Bereich der elektromagnetischen Felder können lediglich die akuten Wirkungen, die im Niederfrequenzbereich auf der Reizwirkung der induzierten elektrischen Ströme und im Hochfrequenzbereich auf der Erzeugung von Wärme beruhen, als im wissenschaftlich strengen Sinne nachgewiesen gelten. Für andere Wirkungen liegen bisher lediglich wissenschaftliche Hinweise vor (s. Kapitel 2.2), die bei einzelnen, auch gesundheitsrelevanten, Effekten aber so stark sind, dass sie Anlass für vorsorgende Maßnahmen zum Gesundheitsschutz sein müssen.

## 2.2 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

### Akute Gesundheitsgefahren durch starke Felder

Im Niederfrequenzbereich und im unteren Hochfrequenzbereich können hohe Feldstärken zur Induktion starker Körperströme führen. Oberhalb bestimmter Werte für die Körperstromdichte kann es dadurch zu Schädigungen des

Organismus kommen, wie sie von Unfällen durch Berühren Spannung führender Gegenstände her bekannt sind. Besonders gefährdet sind Gehirn und Herz. Die eigentliche Ursache der Beeinflussungen des Gehirns und des Herzens sind elektrische Spannungen, die durch die induzierten Ströme an der Membran von Körperzellen erzeugt werden, dort die körpereigenen elektrischen Spannungen 'übersteuern' und zu Reizungen der Zellen führen. Starke niederfrequente Felder können auch optische Täuschungen (Elektrophosphene und Magnetophosphene) auslösen. Die Reizwirkungen der induzierten elektrischen Ströme auf den Organismus sind gut untersucht und die Auslöseschwellen für akute Gesundheitsschäden sind hinreichend bekannt.



Starke Magnetfelder können zu Missbildungen bei Neugeborenen führen.

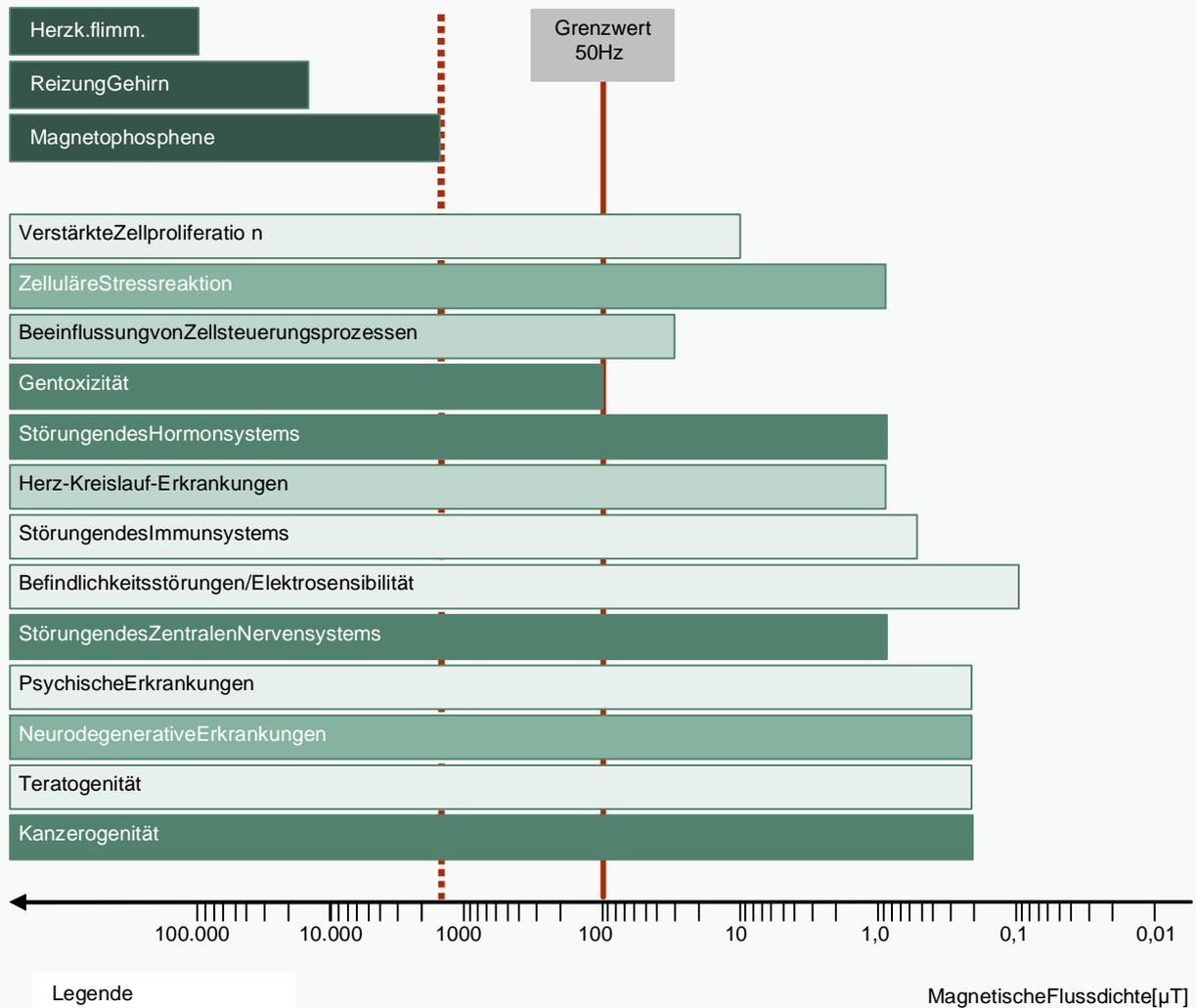
Die in den meisten Ländern gültigen Grenzwerte sollen die Auslösung akuter gesundheitlicher Wirkungen der beschriebenen Art als Folge starker induzierter elektrischer Ströme ausschließen. Allerdings wurden bei der Berechnung der zulässigen Stärken von elektrischen und magnetischen Feldern nur mittlere Stromdichten berücksichtigt, also Stromdichten, die über die jeweiligen Organe gemittelt wurden. Unterschiedliche elektrische Eigenschaften der verschiedenen Gewebearten wurden dabei nur grob berücksichtigt. Neuere Berechnungen, in die auch die kleinräumigen Variationen der elektrischen Eigenschaften biologischer Gewebe eingingen, haben gezeigt, dass die lokalen Stromdichten, die an Zellen wirksam werden, zum Teil erheblich über den mittleren Stromdichten liegen. Es kann also möglicherweise schon zu Reizungen von Zellen bei Feldstärken kommen, die bisher für unproblematisch gehalten wurden.

Tabelle 2.1

Vorschläge für eine differenzierte Klassifizierung wissenschaftlicher Evidenzen für biologische Effekte und gesundheitliche Beeinträchtigung durch elektromagnetische Felder

ECOLOG: ECOLOG-Institut(D)  
 SSK: Strahlenschutzkommission(D)  
 BUWAL: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft(CH)

ECOLOG2000	SSK2001	BUWAL2003
<b>Nachweis</b> Es liegen übereinstimmende Ergebnisse identischer Untersuchungen vor	<b>Wissenschaftlicher Nachweis</b> Reproduzierbare Ergebnisse wissenschaftlicher Studien voneinander unabhängiger Forschungsgruppen zeigen einen Zusammenhang und das wissenschaftliche Gesamtbild stützt das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs	<b>Nachgewiesener Effekt</b> Das Kriterium der ICNIRP ist erfüllt (die Untersuchungen wurden mit gleichem Ergebnis repliziert)
<b>Konsistente Hinweise</b> Es liegen (starke) Hinweise aus unterschiedlichen Untersuchungsansätzen mit gleichem Endpunkt vor	<b>Wissenschaftlich begründeter Verdacht</b> Die Ergebnisse bestätigter wissenschaftlicher Untersuchungen zeigen einen Zusammenhang und die Gesamtheit der wissenschaftlichen Untersuchungen stützt das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs nicht ausreichend	
<b>Starke Hinweise</b> Es liegen übereinstimmende Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen vor		<b>Wahrscheinlicher Effekt</b> Es gibt mehrfache Hinweise für den Effekt
<b>Hinweise</b> Es liegen ähnliche Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen vor	<b>Wissenschaftliche Hinweise</b> Einzelne Untersuchungen weisen auf einen Zusammenhang hin, sie sind jedoch nicht durch unabhängige Untersuchungen bestätigt und werden durch das wissenschaftliche Gesamtbild nicht gestützt	
<b>Schwache Hinweise</b> Es liegen einzelne Untersuchungsergebnisse vor		<b>Möglicher Effekt</b> Es bestehen nur vereinzelte Hinweise für den Effekt



- Legende
- Nachweis
  - KonsistenteHinweise
  - StarkeHinweise
  - Hinweise
  - SchwacheHinweise

Abbildung 2.1 Wissenschaftliche Evidenzen für gesundheitliche Auswirkungen und biologische Effekte durch niederfrequente Magnetfelder sowie Wertebereiche der Magnetischen Flussdichte, in denen diese Wirkungen festgestellt wurden

## Mögliche Gesundheitsrisiken durch schwächere Felder

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse zu gesundheitlichen Auswirkungen und biologischen Effekten durch niederfrequente Magnetfelder. Diese Zusammenstellung basiert auf einer Auswertung der bis Mitte 2005 vorliegenden Forschungsergebnisse durch das ECOLOG-Institut. Die Farbe der Balken in Abbildung 2.1 zeigt die Stärke der wissenschaftlichen Evidenz für die jeweilige Wirkung an. Der rechte Rand der Balken gibt die niedrigste Flussdichte an, bei der der Effekt im Experiment beobachtet wurde oder bei der in epidemio-



Elektromagnetische Expositionen bedeuten für Kinder möglicherweise ein größeres Risiko als für Erwachsene, da deren heranwachsende Organismen sehr empfindlich sind und Kindern lange Expositionszeiten bevorstehen.

logischen Untersuchungen statistisch signifikant erhöhte Risikofaktoren festgestellt wurden. Die Bereiche, in denen die als wissenschaftlich nachgewiesen geltenden Wirkungen starker Felder (Reizungen des Gehirns, Herzkammerflimmern, Magnetophosphene) auftreten, sind zur Orientierung im oberen Teil der Abbildung aufgeführt. Weiterhin ist der derzeit gültige, in der 26. Verordnung zum Bundes-Immissionschutzgesetz (26. BImSchV) festgelegte Grenzwert zum Schutz der Bevölkerung vor 50 Hz-Magnetfeldern (100  $\mu\text{T}$ ) angegeben. Die in den Kästen 2.1 bis 2.5 aufgeführten Beispiele geben einen Einblick in die Fragestellungen und Schwierigkeiten wissenschaftlicher Untersuchungen.

Epidemiologische, das heißt statistische Untersuchungen an Bevölkerungsgruppen, die erhöhten magnetischen Fel-

dern ausgesetzt waren, deuten auf höhere Risiken für bestimmte Erkrankungen und Befindlichkeitsstörungen in den belasteten Bevölkerungsgruppen bereits bei Flussdichten von weniger als 1  $\mu\text{T}$ .

Es gibt aufgrund der Ergebnisse epidemiologischer Studien einen starken Verdacht, dass niederfrequente Magnetfelder zu einem erhöhten Leukämierisiko bei Kindern führen. Alle neueren Studien weisen in dieselbe Richtung. Für

### Kasten 2.1

Beispiele aus der Forschung

#### Niederfrequente Magnetfelder und Leukämieerkrankungen bei Kindern

Unter Federführung einer Forschungsgruppe der Universität Mainz wurde in Niedersachsen und Berlin eine epidemiologische Studie zum Vorkommen von Leukämie bei Kindern in Abhängigkeit von der Stärke der magnetischen Felder im Wohnbereich durchgeführt. Zur Ermittlung der Exposition wurden 24 Stunden-Messungen der magnetischen Flussdichte in den Kinderzimmern und den Wohnzimmern von 176 erkrankten Kindern und von 414 gesunden Kontrollkindern vorgenommen. Kinder, in deren Schlafzimmer der Median-Wert von 0,2  $\mu\text{T}$  überschritten wurde, hatten ein um den Faktor 2,3 erhöhtes Risiko, an Leukämie zu erkranken, als weniger stark exponierte Kinder. Aufgrund der geringen Zahl der untersuchten Kinder war die statistische Unsicherheit des Ergebnisses aber relativ groß. Wurden nur die Nachtwerte der magnetischen Felder berücksichtigt, stieg das Risiko auf das 3,8-fache für alle stärker exponierten Kinder und auf das 7,4-fache für kleine Kinder (jünger als vier Jahre). Diese Ergebnisse erreichten auch statistische Signifikanz. Ein ebenfalls statistisch signifikant um den Faktor 7,1 erhöhtes Risiko hatten kleine Kinder, in deren Schlafzimmer der 24 Stunden-Wert von 0,2  $\mu\text{T}$  überschritten wurde. Insgesamt wurden magnetische Felder von mehr als 0,2  $\mu\text{T}$  in 1,5 Prozent der Wohnungen aus Niedersachsen, in 4,9 Prozent der Wohnungen aus dem Westteil Berlins und in 11,5 Prozent der Wohnungen aus dem Ostteil der Stadt gemessen. Bei drei von insgesamt 17 Wohnungen, in denen die magnetische Flussdichte mehr als 0,2  $\mu\text{T}$  betrug, waren Hochspannungsleitungen die Ursache für die stärkeren Felder. Die Autoren der Studie folgern, dass ihre Ergebnisse die Hypothese eines Zusammenhangs zwischen Magnetfeld-Expositionen und Leukämieerkrankungen von Kindern zu einem gewissen Grad unterstützen.

Michaelis J., Schüz J., Meinert R. u.a. 1998: Combined risk estimates for two German population-based case-control studies on residential magnetic fields and childhood acute leukemia. *Epidemiol.* 9 (1): 92-94

## Kasten 2.2

### Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

#### Einfluss niederfrequenter Magnetfelder auf die Zellvermehrung in Brustgewebe

Eine Untersuchung einer Forschungsgruppe der Tierärztlichen Hochschule Hannover liefert einen weiteren Hinweis darauf, dass Magnetfelder (50 Hz, 100  $\mu$ T) durch Verstärkung der Zellvermehrung kokarzinogen wirken können. In den Versuchen wurden weibliche Ratten für zwei Wochen einem Magnetfeld (MF) ausgesetzt bzw. scheinexponiert. Die Zellvermehrung wurde durch in vivo- und in situ-Markierungen nachgewiesen. Die Magnetfeldexposition erhöhte signifikant die Zahl der teilungsaktiven Epithelzellen in den Brustdrüsen. Der stärkste Effekt wurde in brustständigen Drüsen beobachtet, bei denen in vorangehenden Versuchen auch die deutlichsten Effekte der Magnetfeld-Exposition auf die Krebsentstehung nach der Behandlung mit einem chemischen Kanzerogen festgestellt wurden. Bei Epithelzellen der Haut und in Haarfollikeln war dagegen keine signifikante Zunahme der Zellvermehrung zu beobachten. Messungen des Melatonin-Spiegels, die sowohl in der Zirbeldrüse als auch im Brustgewebe durchgeführt wurden, ergaben keinen Unterschied zwischen den exponierten und scheinexponierten Tieren. Während in der Zirbeldrüse der typische Hell-Dunkel-Rhythmus der Melatonin-Konzentration festgestellt wurde, blieb die Konzentration im Brustgewebe bei beiden Tiergruppen unverändert. Die Autoren heben hervor, dass diese Beobachtung nicht ausschließt, dass Magnetfeldexpositionen über andere Mechanismen als die Absenkung des Melatonin-Spiegels die antikanzerogene Wirkung von Melatonin beeinflussen können.

Fedrowitz M., Westermann J. & Löscher W. 2002: Magnetic field exposure increases cell proliferation but does not affect melatonin levels in the mammary gland of female Sprague Dawley rats. *Cancer Res.* 62 (5): 1356-1363

Magnetfeldexpositionen von mehr als 0,2  $\mu$ T wurden statistisch signifikant erhöhte relative Risiken nachgewiesen (zum Vergleich: der derzeit gültige Grenzwert beträgt 100  $\mu$ T).

In mehreren Studien an Kindern wurden außerdem erhöhte Risikofaktoren für Tumoren des Nervensystems im Zusammenhang mit erhöhten magnetischen Expositionen nachgewiesen, die jedoch nur in einzelnen Untersuchun-

gen statistisch signifikant waren. Einige Studien deuten auch auf ein erhöhtes Risiko für kindliche Lymphome hin. Auch hier waren die Ergebnisse nur in einzelnen Untersuchungen statistisch signifikant.

Bei Erwachsenen gibt es deutliche Hinweise auf ein erhöhtes Erkrankungsrisiko an Leukämie im Zusammenhang mit einer erhöhten Belastung durch niederfrequente Magnetfelder. Für Expositionen über 0,2  $\mu$ T wurden statistisch

## Kasten 2.3

### Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

#### Niederfrequente Magnetfelder und neurodegenerative Erkrankungen

Das Risiko für neurodegenerative Erkrankungen korreliert für einige Krankheiten mit der Dauer der Arbeit in Berufen mit einer erhöhten Exposition gegenüber Magnetfeldern. Das ist das Ergebnis einer amerikanischen Kohorten-Studie, in der die Mortalität aufgrund dieser Erkrankungen mit der Exposition durch magnetische Felder verglichen wurde. Die Exposition wurde durch die Dauer der Tätigkeit in einem Beruf mit erhöhter Exposition sowie einen Index für kumulierte Exposition auf der Basis von Messungen der Magnetfelder festgelegt. Während für die Parkinsonsche Krankheit kein Zusammenhang mit der Magnetfeldexposition gefunden wurde und es für die Alzheimer Krankheit lediglich Hinweise auf eine schwache Korrelation gab, wurde für die Mortalität aufgrund einer Erkrankung an Amyotrophischer Lateralsklerose ein eindeutiger Zusammenhang mit der Dauer der Tätigkeit in einem Beruf mit erhöhten Expositionen durch Magnetfelder festgestellt.

Savitz D.A., Checkoway H. & Loomis D.P. 1998: Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. *Epidemiol.* 9 (4): 398-404

signifikant erhöhte relative Risiken für Leukämie festgestellt. Im Zusammenhang mit erhöhten, beruflich bedingten Expositionen ergaben einige Studien ein erhöhtes Risiko für eine Erkrankung an Tumoren des Nervensystems. Ferner wurden in mehreren Studien erhöhte Risikofaktoren für Brustkrebs sowohl bei Frauen als auch bei Männern nachgewiesen, die jedoch nur in einzelnen Untersuchungen statistisch signifikant waren. Zum Lungenkrebsrisiko liegen nur sehr wenige Untersuchungen vor, bei denen jedoch ebenfalls erhöhte Risikofaktoren festgestellt wurden. Die Erhöhungen waren allerdings nur in einzelnen Untersuchungen statistisch signifikant.

Die epidemiologischen Untersuchungen werden durch Tierexperimente ergänzt, die zum Teil deutliche Hinweise auf eine krebserregende Wirkung niederfrequenter Magnetfelder ergaben.



Die Ergebnisse von Experimenten mit Tieren können nicht direkt auf den Menschen übertragen werden.

Es gibt Hinweise auf eine Zunahme des Risikos für Fehlgeburten bei Magnetfeldexpositionen von mehr als  $0,2 \mu\text{T}$  während der Schwangerschaft. Jedoch ergaben nur einzelne epidemiologische Untersuchungen statistisch signifikante Erhöhungen der Risiken.

Es gibt sehr starke Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für neurodegenerative Erkrankungen infolge Expositionen durch niederfrequente Magnetfelder. Für Expositionen über  $0,2 \mu\text{T}$  wurden in epidemiologischen Untersuchungen statistisch signifikant erhöhte relative Risiken vor allem für eine Erkrankung an Amyotrophischer Lateralsklerose, weniger deutlich auch für die Alzheimer-Krankheit und andere

## Kasten 2.4

### Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

#### Häufigkeit der selbst-berichteten elektromagnetischen Hypersensibilität in Schweden

In einer schwedischen Studie wurde die Häufigkeit des Auftretens von medizinisch unerklärlichen Symptomen, die mit der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern zusammenhängen könnten, in der Gesamtbevölkerung untersucht. Hierzu wurde eine Querschnittsstudie mit 15.000 Männern und Frauen im Bezirk Stockholm durchgeführt. Das Alter der Befragten lag zwischen 19 und 80 Jahren. Die Rücklaufquote der Fragebögen betrug 73 Prozent. Ziel der Untersuchung war es u.a., die Charakteristika der Gruppe, die von solcher Überempfindlichkeit berichtet, in Bezug auf demographische Daten, andere gesundheitliche Beschwerden und Hypersensibilitäten sowie klassische Allergien zu ermitteln. 1,5 Prozent (167 Personen) der Antwortenden berichteten von einer Hypersensibilität gegenüber elektrischen oder magnetischen Feldern. Am häufigsten berichteten Frauen und Personen in der Altersgruppe der 60- bis 69-Jährigen von einer Überempfindlichkeit. Zudem ergab sich ein Zusammenhang zwischen der selbst-berichteten Hypersensibilität und der Häufigkeit selbst-berichteter Allergien und anderer Überempfindlichkeiten, und die Gruppe der Elektrosensiblen gab häufiger an, auch durch andere Umweltfaktoren gestört zu werden. Die Betroffenen nannten alle Symptome, die in dem Fragebogen abgefragt wurden, signifikant häufiger als der Rest der Befragten. Insgesamt traten alle der erhobenen Symptome bei den betroffenen Personen auf. Am häufigsten wurde Müdigkeit genannt, gefolgt von einem Schweregefühl im Kopf und Augenreizungen. Ein spezifisches Profil der Symptome ergab sich für die empfindliche Gruppe im Vergleich zu den anderen Befragten jedoch nicht. Die Ergebnisse sollten zwar mit Vorsicht interpretiert werden, sie lassen aber den Schuss zu, dass es in der Bevölkerung eine weit verbreitete Besorgnis über die durch elektrische oder magnetische Felder hervorgerufenen Gesundheitsrisiken gibt.

Hillert L., Berglind N., Arnetz B.B. & Bellander T. 2002: Prevalence of self-reported hypersensitivity to electric or magnetic fields in a population-based questionnaire survey. Scand. J. Work Environ. Health 28 (1): 33-41

Formen dementer Erkrankungen, nachgewiesen. In einigen epidemiologischen Studien wurden zudem erhöhte Risiken sowohl für psychische Erkrankungen als auch für Selbstmorde in exponierten Bevölkerungsgruppen festgestellt. Diese Ergebnisse sind wegen der geringen Expositionen (ca.  $0,1 \mu\text{T}$ ) sowie der zum Teil sehr hohen Risikofaktoren

## Kasten 2.5

### Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

#### Gentoxische Effekte durch niederfrequente Magnetfelder

Die Studie einer Wiener Forschungsgruppe zeigte deutliche Unterschiede bei der Empfindlichkeit verschiedener Zelltypen gegenüber elektromagnetischen Feldern. Vor dem Hintergrund widersprüchlicher Ergebnisse vorangegangener Arbeiten zu den gentoxischen Wirkungen niederfrequenter Felder, wurden in der vorliegenden Arbeit die Effekte bei Fibroblasten, Melanozyten, Lymphozyten, Monozyten und Muskelzellen von Menschen sowie transformierten Granulosazellen von Ratten verglichen. Die Zellen wurden einem intermittierenden (5 Minuten an, 10 Minuten aus) sinusförmigen 50 Hz Feld mit einer magnetischen Flussdichte von 1 mT ausgesetzt. In jeweils einstündigen Abständen wurde über 24 Stunden die Rate der DNA-Strangbrüche ermittelt. Die Granulosazellen und die Fibroblasten zeigten den stärksten gentoxischen Effekt. Auch die menschlichen Melanozyten zeigten eine gentoxische Reaktion auf die Exposition, der Effekt war hier jedoch nicht so stark wie bei den beiden anderen Zelltypen. Im Gegensatz zu diesen drei Zelltypen konnte bei Lymphozyten, Monozyten und Muskelzellen keine Wirkung festgestellt werden. Da von dem Team vorher bereits gezeigt wurde, dass auch das Alter der Zellspender die Empfindlichkeit der Zellen beeinflusst, wobei ein höheres Alter eine höhere Empfindlichkeit bewirkt, wird in dem Bericht über die Untersuchung hervorgehoben, dass die in der vorliegenden Arbeit beobachteten Unterschiede nicht auf das Alter der Spender zurückgeführt werden können, da die unempfindlichen Muskelzellen vom ältesten Spender (63 Jahre alt) und die empfindlichen Fibroblasten von einem sechsjährigen Jungen stammten. Auch der Status der Zellen bezüglich ihrer Teilungsaktivität scheint die Empfindlichkeit nicht zu beeinflussen, da zum einen sowohl stimulierte als auch nicht stimulierte Lymphozyten unempfindlich waren und zum anderen sowohl die unempfindlichen Muskelzellen wie auch die empfindlichen Fibroblasten teilungsaktiv waren. Auch die Art der Kultivierung (Zellsuspension, bei der die Zellen im Kulturmedium schwimmen, oder Monolayer, bei der sich die Zellen an einer Fläche anheften) beeinflusst die gentoxische Reaktion nicht. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass verschiedene Zelltypen bezüglich der Gentoxizität unterschiedlich auf niederfrequente Felder reagieren und dass empfindliche Zelltypen zudem Differenzen in ihrer Empfindlichkeit zeigen. Diese Ergebnisse heben die Bedeutung der Wahl der Zelltypen bei Untersuchungen zu gentoxischen Effekten niederfrequenter Felder hervor und geben einen Hinweis darauf, dass auf den ersten Blick widersprüchliche Ergebnisse mit Zellkulturen unter Berücksichtigung des verwendeten Zelltyps neu betrachtet werden sollten.

Ivancsits S., Pilger A., Diem E., Jahn O. & Rüdiger H.W. 2005: Cell type-specific genotoxic effects of intermittent extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutat. Res.* 583 (2): 184-188

ernst zu nehmen, wenn auch weitere Untersuchungen zur Absicherung der Ergebnisse notwendig sind.

Experimentelle Untersuchungen am Menschen und am Tier ergaben konsistente Hinweise auf eine Beeinflussung bestimmter kognitiver Funktionen und des Verhaltens sowie Hinweise auf Störungen des neuroendokrinen Systems und Beeinflussungen von Gehirnpotentialen (EEG).

Einigen Untersuchungen zufolge, können niederfrequente Magnetfelder sehr geringer Stärke bei empfindlichen Personen zu Befindlichkeitsstörungen führen. Diese erhöhte Elektrosensibilität geht oft einher mit einer erhöhten Empfindlichkeit gegenüber anderen Umwelteinflüssen.

In einigen Experimenten am Menschen und am Tier wurden Einflüsse auf das Immunsystem, insbesondere eine Beeinträchtigung der Aktivität von T-Lymphozyten beobachtet.

bachtet.

Unklar sind die Ergebnisse zum Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Einzelne epidemiologische Untersuchungen hatten in Verbindung mit klinischen Daten ein erhöhtes Risiko für Akuten Myokardinfarkt und Arrhythmie-Erkrankungen als Folge erhöhter Expositionen durch niederfrequente Magnetfelder mit Stärken deutlich unterhalb der derzeit geltenden Grenzwerte (s. Kapitel 3) ergeben. Neuere Untersuchungen konnten diese Befunde nicht immer bestätigen.

Es liegen konsistente Hinweise aus Untersuchungen am Menschen, an Tieren und Zellen vor, dass Magnetfelder von weniger als 10  $\mu\text{T}$  zu Störungen des Melatonin-Haushalts führen. Diese Befunde sind unter anderem deshalb von Bedeutung, weil sie a) zeigen, dass diese Felder möglicherweise in der Lage sind, die zirkadianen physiolo-

gischen Rhythmen zu stören und b) weil eine verminderte Ausschüttung des Hormons Melatonin beim Menschen die Entstehung unter anderem von Brustkrebs begünstigen kann.

Es liegen zahlreiche wissenschaftliche Hinweise darauf vor, dass niederfrequente Magnetfelder zu Veränderungen am Erbmateriale (Chromosomen-Abberationen, DNA-Strangbrüche), zur vermehrten Produktion von Zell-Stress-Proteinen und zu Beeinträchtigungen bestimmter Zellfunktionen (Gen-Transkription, Zell-Proliferation, -Differenzierung und -Kommunikation) führen können. Es gibt zudem konsistente Hinweise auf erhöhte Aktivitäten des Enzyms Ornithin-decarboxylase (ODC). Alle diese Effekte haben Bedeutung für die Kanzerogenese. Allerdings kann aus der Beobachtung eines Schadens auf der zellulären Ebene nicht direkt auf eine Erhöhung des Krebsrisikos geschlossen werden, da bei solchen Störungen immer körpereigene Reparaturmechanismen wirksam werden. Sehr starke oder chronische Störungen könnten aber zu einer Überforderung dieser Schutzfunktionen führen.

## Fazit

Bisher konnte noch kein vollständiges Modell für die Wirkung schwacher, umweltrelevanter Magnetfelder im Niederfrequenzbereich auf den Organismus von der zellulären Ebene bis zu einer bestimmten Erkrankung formuliert werden. Die Befunde aus einer großen Zahl experimenteller Untersuchungen stützen jedoch die Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen, nach denen niederfrequente Magnetfelder wahrscheinlich keine auslösende aber eine fördernde Wirkung bei der Entwicklung von Krebserkrankungen haben. Da aufgrund zum einen genetischer Dispositionen und zum anderen einer Vielzahl entsprechend wirksamer Umweltfaktoren im menschlichen Organismus permanent entartete Zellen vorhanden sind, ist aber auch eine die Krebsentwicklung 'nur' fördernde Wirkung bedenklich, zumal wenn sie auf eine allgegenwärtige Noxe zurückzuführen ist, wie sie niederfrequente Magnetfelder in unserer technisierten Umwelt heute darstellen.

Neben dem Krebsrisiko verdienen vor allem die Hinweise auf einen möglichen Einfluss niederfrequenter Magnetfelder auf die Entstehung von neurodegenerativen und psychischen Erkrankungen Beachtung und verstärkte wissenschaftliche Aufmerksamkeit.

Die Allgemeinbevölkerung ist in ihrem Wohnumfeld nicht selten Magnetfeldern ausgesetzt, bei denen aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Befunde von einem erhöhten Gesundheitsrisiko auszugehen ist. An vielen Industriearbeitsplätzen werden die kritischen Werte deutlich überschritten. Die Vielzahl der wissenschaftlichen Hinweise auf Wirkungen weit unterhalb der derzeit gültigen Grenzwerte lassen daher eine deutliche Absenkung der Grenzwerte und weitere Anstrengungen zur Verminderung der Expositionen der Bevölkerung geraten erscheinen (s. Kapitel 3, 4).

## 2.3 Hochfrequente elektromagnetische Felder

### Akute Gesundheitsgefahren durch starke Felder

Die Bestrahlung von biologischem Gewebe mit hochfrequenten Feldern (Radio- bis Infrarotbereich) führt unter anderem zur Erwärmung. Die Stärke der Erwärmung hängt einerseits von Frequenz und Intensität der Strahlung, andererseits von der Art des Gewebes, seiner Lage im Körper und der Durchblutung ab. Besonders empfindlich sind Organe mit einem hohen Wassergehalt und einer schlechten Durchblutung, denn an der Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärmeenergie sind vor allem Wassermoleküle beteiligt und eine schlechte Durchblutung steht einer schnellen Abführung der erzeugten Wärme entgegen. Es kann daher in intensiven Hochfrequenzfeldern zu einer Überhitzung und Schädigung solcher Organe kommen. Besonders empfindlich ist das Auge. Die Einwirkung hochfrequenter Felder hoher Intensität kann zu einer Trübung der stark wasserhaltigen und schlecht durchbluteten Augenlinse führen (Grauer Star). In anderen Organen ist die Entstehung von 'Hitzeinseln' (hot spots) möglich, die lokale Schädigungen des Gewebes verursachen können. Solche lokalen Überhitzungen können z.B. im Kopfbereich bei der Benutzung leistungsstarker Sprechfunkgeräte auftreten.

Gepulste Hochfrequenzstrahlung hoher Intensität, wie sie z.B. von Radaranlagen abgegeben wird, kann im Kopfbereich zu lokalen Aufheizungen und thermoelastischen Wellen führen, die unter Umständen als 'Ticken' wahrgenommen werden können (so genanntes Mikrowellen- oder Radar-'Hören').

Die thermischen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder und die aus ihnen resultierenden akuten gesundheitlichen Schädigungen sind wissenschaftlich sehr gut untersucht und eindeutig belegt. Lange Zeit wurde und noch heute wird vielfach unterstellt (auch von wissenschaftlicher Seite), dass sich die Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme allein auf thermische Effekte beschränken und dass Felder, deren Intensität zu niedrig ist, um im menschlichen Körper messbare Temperaturerhöhungen von mehr als 0,1°C zu bewirken, ungefährlich sind. Es wird sogar behauptet, dass hochfrequente Felder mit Intensitäten unterhalb der Schwellen für thermische Effekte biologisch nicht wirksam sein können. Diese Auffassung ist in Anbetracht der vorliegenden wissenschaftlichen Befunde als überholt anzusehen (s.u).

Die Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor hochfrequenten elektromagnetischen Feldern sind sowohl in Deutschland als auch in den meisten westeuropäischen Ländern und Nordamerika so ausgelegt, dass akute Schäden durch Überhitzung des gesamten Körpers ausgeschlossen sind. Lokal stärkere Erwärmungen sind jedoch möglich. Auch im Hochfrequenzbereich ist zu beachten, dass die Grenzwerte nur auf numerischen Simulationen mit sehr begrenzter räumlicher Auflösung beruhen, die die Gewebeeigenschaften nur grob abbilden, bzw. dass die Ergebnisse von Messungen an so genannten 'Phantomen', das heißt Nachbildungen des menschlichen Körpers durch synthetische Materialien, zugrunde gelegt wurden.

### Mögliche Gesundheitsrisiken durch schwächere Felder

Die Frage nach gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter Felder subthermischer Intensität wird zurzeit vor allem im Zusammenhang mit der stark zunehmenden Verbreitung des Mobilfunks gestellt. Beim Mobilfunk sind zwei Expositionssituationen zu unterscheiden: einerseits die relativ hohen Expositionen der Mobilfunkteilnehmer durch das Handy im Kopfbereich und andererseits die Belastungen der Allgemeinbevölkerung durch die Mobilfunkbasisstationen. Benutzer von Handys sind zwar beim Telefonieren selbst einer wesentlich höheren elektromagnetischen Leistungsdichte ausgesetzt als Personen, die sich außerhalb des durch die gesetzlichen Grenzwerte vorgegebenen Sicherheitsabstandes von Mobilfunkbasisstationen

aufhalten, jedoch sind von den Abstrahlungen der Basisstationen wesentlich größere Flächen und damit zumindest in Ballungsgebieten wesentlich mehr Menschen betroffen. Hinzu kommt, dass die Basisstationen zu Dauerexpositionen führen, da sie täglich 24 Stunden lang Strahlung emittieren.

Der Aufbau der Mobilfunknetze hat in vielen Ländern zu öffentlichen Kontroversen über diese Technik bzw. darüber geführt, welche Maßnahmen notwendig sind, um die Bevölkerung vor negativen Auswirkungen der Mobilfunkstrahlung zu schützen. Von zahlreichen Regierungen wurden wissenschaftliche Kommissionen eingesetzt oder es bildeten sich wissenschaftliche Gremien unabhängig von einem Regierungsauftrag, um den wissenschaftlichen Erkenntnisstand im Hinblick auf mögliche Risiken durch die Strahlung von Mobiltelefonen und Mobilfunkbasisstationen zu bewerten.

Alle wissenschaftlichen Gremien sind sich einig, dass Risiken durch thermische Effekte wissenschaftlich eindeutig belegt sind. Die hierfür notwendigen relativ hohen Intensitäten werden in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen außerhalb des Sicherheitsbereichs nicht erreicht. Die Expositionen bei der Benutzung von Mobiltelefonen hängen von vielen Faktoren ab. Hier sind thermische Effekte, das heißt messbare Erwärmungen des bestrahlten Gewebes (Gehirn, Ohr und seine Nervenstränge, Haut) möglich.

Hinsichtlich der Bewertung der Risiken durch Hochfrequenzstrahlung mit geringeren Intensitäten, die zu keinem messbaren thermischen Effekt führen, variieren die Einschätzungen der verschiedenen Kommissionen bei einigen biologischen Effekten erheblich, wie die Übersicht in Tabelle 2.2 zeigt. Einigkeit besteht zwar insofern, dass keine Kommission die vorliegenden wissenschaftlichen Befunde als einen Beweis für nicht-thermische biologische Effekte wertet, aber die Stärke der wissenschaftlichen Hinweise, dass auch Felder mit subthermischen Intensitäten gesundheitsschädliche Wirkungen haben können, wird oft unterschiedlich bewertet. Auffallend an der Übersicht in Tabelle 2.2 ist,

- a) dass die Bewertungsbasis bei einigen wissenschaftlichen Kommissionen sehr dünn ist, weil nur wenige Effekte berücksichtigt wurden, wie die vielen Felder mit dem Eintrag 'o' zeigen, und



- b) dass es viele Zellen mit einem '±'-Eintrag gibt, der darauf hinweist, dass die jeweilige Kommission zu keiner klaren Aussage hinsichtlich der Aussagekraft der vorliegenden Untersuchungsergebnisse und möglicher Risiken durch den jeweiligen Effekt gekommen ist.

Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse zu gesundheitlichen Auswirkungen und biologischen Effekten durch hochfrequente elektromagnetische Felder auf der Basis einer Auswertung der bis Mitte 2005 vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten durch das ECOLOG-Institut. Bei der Klassifizierung der Evidenzen wurde die gleiche Systematik wie bei den niederfrequenten Feldern angewandt (s. Tabelle 2.1). Aus der

Abbildung wird deutlich, dass gesundheitsrelevante biologische Wirkungen auch bei Leistungsdichten beobachtet wurden, bei denen keine oder nur schwache thermische Wirkungen zu erwarten sind. Die Beispiele in den Kästen 2.6 bis 2.8 sollen wiederum einen Einblick in die Fragestellungen und Schwierigkeiten wissenschaftlicher Untersuchungen geben.

Da bisher nur wenige epidemiologische Studien zum Zusammenhang zwischen Mobilfunkexpositionen und Krebserkrankungen durchgeführt wurden, ist eine definitive Aussage zu möglichen Krebsrisiken im Zusammenhang mit Expositionen durch Mobilfunkbasisstationen nicht möglich. Die bisher ausgewerteten Ergebnisse der von der Internationalen Agentur für Krebsforschung koordinierten interna-

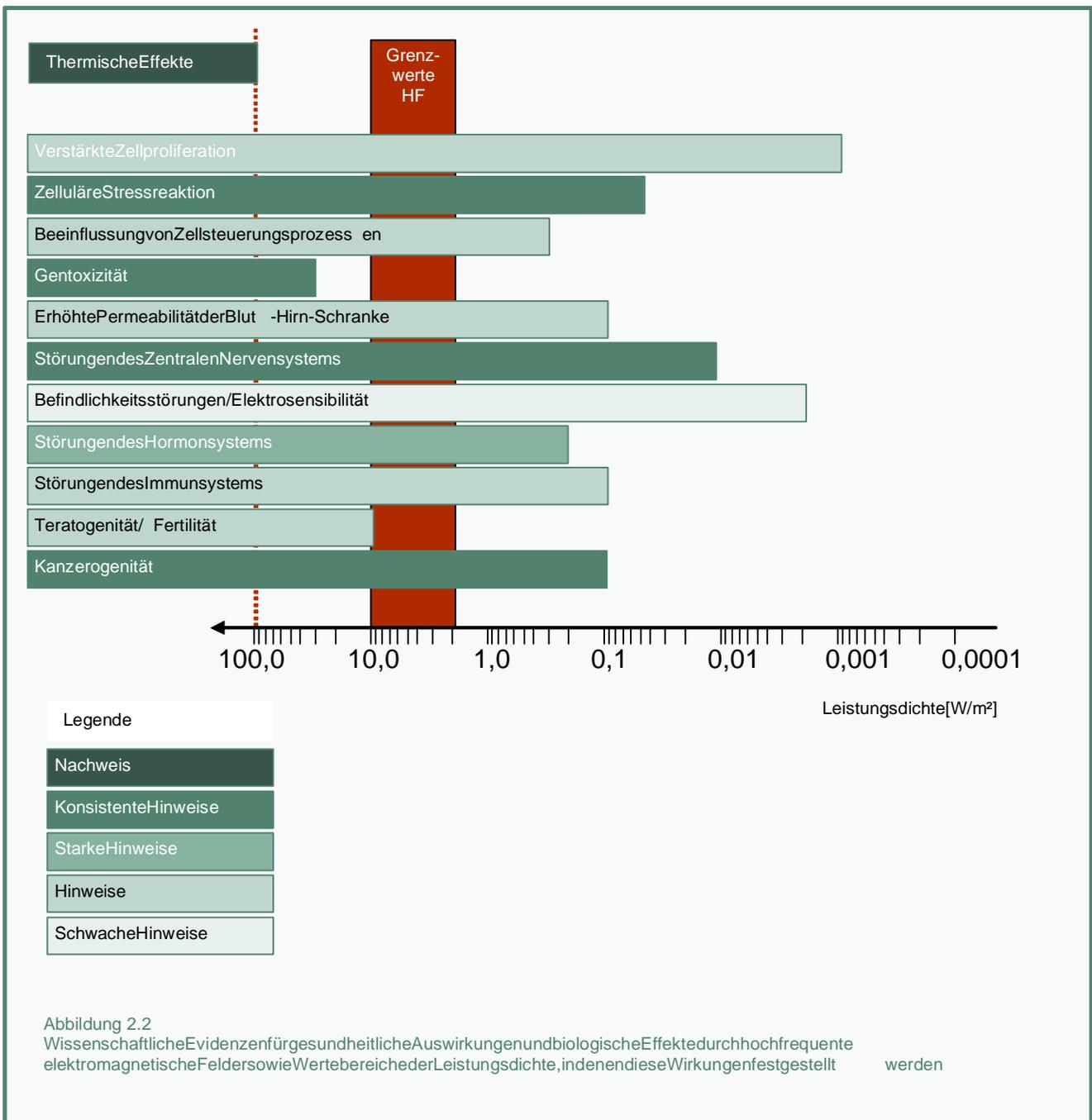
Tabelle 2.2  
Bewertung der wissenschaftlichen Evidenzen biologischer Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder durch internationale wissenschaftliche Kommissionen

Land - Institution Jahr	GB - IEGMP2000	NL - HC N2001	GB - AGNIR2001	EU - CSTEE2001	F - DGS2001	CAN - RSC2001	D - SSK2001	USA - USGAO2001	F - ART2002	NL - HCN2002	S - SSI2002	F - AFSE2003	GB - AGNIR2003	CH - BUWAL2003	S - SSI2003	NL - HCN2004	INT - ICNIRP2004	GB - NRPB2004	GB - NRPB2004	S - SSI2004
Thermische Wirkung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Krebs, Epidemiologie	-	-	o	-	±	±	-	±	±	-	±	±	±	+	±	±	±	±	+	±
Krebs, Experiment	±	o	o	±	±	±	+	±	±	o	o	±	±	o	±	±	o	o	o	-
Befindlichkeitsstörungen	o	o	o	±	±	o	±	o	o	o	o	±	±	++	o	-	±	±	+	±
Neurodegenerative Erkrankungen	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Zentrales Nervensystem	++	+	o	+	++	+	++	+	+	++	o	++	+	++	o	o	o	+	+	±
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	-	o	o	±	±	o	+	o	o	o	o	±	±	±	o	o	o	o	o	o
Blut-Hirn-Schranke	-	o	o	±	±	±	+	o	o	o	o	+	+	o	+	±	o	±	o	o
Fortpflanzung	-	o	o	o	±	o	o	o	-	o	o	-	±	±	o	o	±	-	o	o
Immunsystem	-	o	o	±	-	o	+	o	-	o	o	±	o	±	o	o	o	o	o	o
Hormonsystem	o	o	o	-	+	±	-	o	o	o	o	o	o	±	o	o	o	o	o	o
Genotoxizität	±	-	o	-	±	±	±	±	o	o	o	±	±	±	±	o	o	o	o	o
Zell-Steuerung	±	±	±	±	+	+	+	o	o	o	o	±	±	o	o	o	o	o	o	o
Stressproteine	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	±	+	o	+	o	o	o	o	o

- Wirkung nachgewiesen
- ++ Wirkung wahrscheinlich/sehr starke Hinweise auf eine Wirkung
- + Wirkung möglich/Hinweise auf eine Wirkung
- ± Wirkung nicht zu beurteilen/wissenschaftliche Befunde widersprüchlich / nicht überzeugend
- Wirkung unwahrscheinlich/keine Hinweise auf eine Wirkung
- o Wirkung bei der Bewertung nicht berücksichtigt

tionalen epidemiologischen Interphone-Studie zum Gehirntumorrisiko bei der Nutzung von Mobiltelefonen und die Ergebnisse einiger anderer Forschungsgruppen deuten auf ein erhöhtes Risiko für bestimmte Hirntumoren bei Personen, die mehr als zehn Jahre ein Mobiltelefon benutzt haben. Die aktuellen Befunde bestätigen die Ergebnisse von Untersuchungen, die bereits früher in Schweden durchgeführt wurden und einen Zusammenhang zwischen der Seite des Kopfes, an der das Mobiltelefon überwiegend be-

nutzt wird, und der Seite, auf der ein Gehirntumor diagnostiziert wurde, ergaben. Gesamtbewertungen wissenschaftlicher Gremien, die die neueren Ergebnisse berücksichtigen, liegen bisher nicht vor und fehlen daher auch in Tabelle 2.2. Personen mit Expositionszeiten von mehr als zehn Jahren gibt es in nennenswerter Zahl nur in den nordskandinavischen Ländern, wo der Mobilfunk schon vergleichsweise früh von einem größeren Teil der Bevölkerung genutzt wurde. Bei epidemiologischen Untersuchun-





In einigen epidemiologischen Untersuchungen wurde für Personen, die über mehr als zehn Jahre häufig ein Mobiltelefon genutzt hatten, ein erhöhtes Hirntumorrisiko festgestellt.

gen, die in anderen Ländern heute durchgeführt werden, ist davon auszugehen, dass sie ein mögliches Krebsrisiko nicht in seiner ganzen Höhe erfassen. Da die modernen digitalen 'Jedermann'-Mobilfunksysteme erst seit weniger als zehn Jahren in Gebrauch sind, die mittleren Latenzzeiten bei Krebserkrankungen jedoch deutlich länger sind, dürften sich in den Untersuchungen tendenziell eher zu niedrige Risikofaktoren ergeben.

Aus den aufgeführten Gründen wird es auch noch einige Jahre dauern, bis aussagekräftigere Ergebnisse vorliegen. Zur Risikoabschätzung kann man jedoch zusätzlich auch Studien heranziehen, bei denen die Häufigkeit von Erkrankungen in Bevölkerungsgruppen untersucht wurde, die hochfrequenter Strahlung aus anderen Quellen ausgesetzt waren. Besondere Bedeutung im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf den Mobilfunk kommt dabei Quellen zu, die niederfrequent modulierte, insbesondere gepulste Strahlung abgeben, wie sie auch beim digitalen Mobilfunk verwendet wird. Dies gilt vor allem für Radaranlagen und -geräte. Zum Krebsrisiko durch berufliche Radarexposition liegen einige Studien vor, die ebenfalls auf ein erhöhtes Tumorrisiko stärker exponierter Personen hindeuten. Allerdings ist die Aussagekraft dieser Studien schwer zu beurteilen, da die Expositionen oft nur grob geschätzt werden konnten und die Betroffenen an ihren Arbeitsplätzen vielfach auch anderen kanzerogenen Noxen ausgesetzt waren. Aus ähnlichen Gründen sind auch die Ergebnisse von Untersuchungen zum Krebsrisiko der Anwohner von Rund-

funk- und Fernsehsendern schwierig zu interpretieren. Solche Untersuchungen wurden unter anderem in Australien, Großbritannien, Italien und den USA durchgeführt. In einzelnen Untersuchungen ergab sich eine deutliche Zunahme des Krebsrisikos mit abnehmendem Abstand des Wohnorts von den Sendeanlagen, während in anderen Untersuchungen keine Korrelation von Expositionshöhe

## Kasten 2.6

### Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

#### Hochfrequente elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen und Gehirntumoren

Ein schwedisches Forschungsteam hat neue Ergebnisse einer epidemiologischen Fall-Kontroll-Studie veröffentlicht, die die Ergebnisse früherer Studien in diesem Land zu einem erhöhten Hirntumorrisiko bei Personen mit langjähriger Nutzung von Mobiltelefonen stützen. In der Studie wurde das Risiko für Erkrankungen an gutartigen Tumoren des Gehirns bei Nutzern sowohl von analogen als auch von digitalen Mobiltelefonen und schnurlosen Telefonen bestimmt. In die Untersuchung wurden 413 Fälle und 692 Kontrollen einbezogen. Für Meningeome (gutartige Tumoren des Gehirns und des Rückenmarks, die von den Deckzellen der Spinnwebhaut ausgehen) ergab sich für die Nutzer von analogen Mobiltelefonen ein Odds Ratio-Wert (als Maß für das Erkrankungsrisiko) von  $OR = 1,7$  mit einem 95 %-Konfidenzintervall (CI) von 0,97 bis 3,0. Da das Konfidenzintervall die 1 enthält, ist das Ergebnis statistisch nicht signifikant. Für Personen mit einer Latenzzeit von mehr als zehn Jahren wurde ein höherer, statistisch signifikanter Wert von  $OR = 2,1$  (CI: 1,1 bis 4,3) ermittelt. Auch für die Nutzer von digitalen Mobiltelefonen und schnurlosen Telefonen wurde eine gewisse Höhe des Erkrankungsrisikos festgestellt. Deutlich höhere Risikofaktoren ergaben sich für das Auftreten von Akustikusneurinomen:  $OR = 4,2$  (CI: 1,8 bis 10),  $OR = 8,4$  (CI: 1,6 bis 45) für Personen mit Latenzzeiten von mehr als 15 Jahren. Der für langzeitexponierte Personen ermittelte Wert ist sehr hoch, die Größe des Konfidenzintervalls signalisiert aber, dass sich die Studie in diesem Fall nur auf wenige Fälle stützen kann, nichtsdestotrotz ist die Risikoerhöhung statistisch signifikant. Während für Akustikusneurinome im Zusammenhang mit der Nutzung digitaler Mobiltelefone ebenfalls ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko ermittelt wurde ( $OR = 2,0$ , CI: 1,05 bis 3,8), war die Erhöhung des Risikos bei Nutzung von schnurlosen Telefonen statistisch nicht signifikant.

Hardell L., Carlberg M. & Hansson Mild K. 2005: Case-control study on cellular and cordless telephones and the risk for acoustic neuroma and meningioma in patients diagnosed 2000-2003. *Neuroepidemiol.* 25 (3): 120-128

(abgeschätzt aus dem Abstand) und Tumorrisiko festgestellt werden konnte. Der Schwachpunkt dieser Studien sind wiederum Defizite bei der Ermittlung der tatsächlichen Expositionen.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse von wissenschaftlichen Studien zum Krebsrisiko im Zusammenhang mit Hochfrequenz-Expositionen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Aus epidemiologischen Untersuchungen an verschiedenen Hochfrequenz-Sendeanlagen liegen Hinweise auf erhöhte

#### Kasten 2.7

##### Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

#### **Nutzung von Mobiltelefonen und kognitive Leistung**

In der Doppelt-Blind-Studie einer französischen Forschungsgruppe wurden die Effekte der täglichen Nutzung eines GSM 900-Handys auf kognitive Funktionen untersucht. Hierzu wurden 55 Personen in zwei Gruppen eingeteilt. Eine Gruppe mit eingeschaltetem Handy und eine mit ausgeschaltetem Handy. Die Personen waren bezüglich Alter, Geschlecht und Intelligenzquotient in beiden Gruppen gleich verteilt. Das Experiment dauerte 45 Tage und wurde in drei Phasen, die Basis-, Expositions- und Erholungsphase unterteilt. Die Phasen dauerten 2, 27 und 13 Tage. Während der Erholungsphase waren alle Testpersonen schein-exponiert. Während der Expositionsphase war das Handy an fünf Tagen pro Woche zwei Stunden pro Tag eingeschaltet. Es wurden 22 verschiedene neuropsychologische Tests durchgeführt, die in die Kategorien Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeit, Gedächtnisleistung und ausführende Funktionen fallen. Die Tests wurden jeweils 13 Stunden nach der Exposition am 2., 15., 29. und 43. Tag durchgeführt. Der Testzeitpunkt war so gewählt, dass zwischen der letzten Exposition und den Tests eine Schlafphase lag. Die Ergebnisse zeigen, dass die tägliche Nutzung des Handys nach einer 13-stündigen Erholungsphase keinen Effekt auf die kognitive Leistung hat. Die Autoren heben hervor, dass ihre Ergebnisse im Widerspruch zu denen ähnlicher Studien stehen. Sie gehen davon aus, dass die im vorliegenden Versuch zwischen der Exposition und der Testphase liegende Erholungszeit für diesen Unterschied verantwortlich ist. Sie weisen darauf hin, dass die Untersuchung keine Aussage über die kognitiven Effekte länger dauernder Expositionen oder Nutzungszeiten zulasse.

Besset A., Espa F., Daubilliers Y., Billiard M. & de Seze R. 2005: No effect on cognitive function from daily mobile phone use. *Bioelectromagnetics* 26 (2): 102-108

Raten sowohl für alle Krebserkrankungen zusammen genommen als auch für einzelne Krebsarten (Leukämie, Gehirntumoren) bei Anwohnern bzw. Beschäftigten der Anlagen vor. Auch auf die Entwicklung anderer Tumoren haben hochfrequente elektromagnetische Felder möglicherweise einen fördernden Einfluss, zumindest gibt es hierzu Hinweise aus epidemiologischen Untersuchungen. Diese sind wegen der geringen Zahl solcher Untersuchungen bisher aber überwiegend als 'schwach' einzustufen. Jedoch gibt es auch erste Hinweise aus Tierexperimenten, die auf eine kanzerogene Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder deuten. Die sehr unterschiedlichen Expositionsmerkmale und methodischen Ansätze in den epidemiologischen Untersuchungen erlauben es nicht, die Ergebnisse in einer Meta-Analyse zusammenzufassen. Zugleich ist die Tatsache, dass in der Mehrzahl der aufgeführten Untersuchungen trotz unterschiedlicher Studiendesigns Hinweise auf erhöhte Risiken für einige Krebsformen gefunden wurden, aber als ein ernst zu nehmender Hinweis auf eine kanzerogene Wirkung hochfrequenter Felder mit Intensitäten im subthermischen Bereich zu werten. Deutlicher als für Sendeanlagen sind die wissenschaftlichen Hinweise, dass die häufige Nutzung von Mobiltelefonen über viele Jahre bei bestimmten Tumorformen des Kopfes zu einem erhöhten Risiko führt.

In den meisten wissenschaftlichen Studien zu unmittelbar gesundheitsschädigenden Wirkungen von Hochfrequenz-Strahlung wurden Krebserkrankungen untersucht. Es liegen aber auch zahlreiche Untersuchungen zu anderen gesundheitlichen Endpunkten und zu biologischen Effekten vor, die bei der Entwicklung von Gesundheitsstörungen eine Rolle spielen könnten:

Es ist lange bekannt, dass Hochfrequenz-Strahlung mit thermisch wirksamen Intensitäten zu Störungen der Embryonalentwicklung und zu männlicher Infertilität führen kann. Die Ergebnisse von epidemiologischen Untersuchungen an beruflich exponierten Frauen und Männern sowie von experimentellen Untersuchungen an Tieren ergaben Hinweise, dass auch hochfrequente Felder mit subthermischen Intensitäten möglicherweise eine teratogene Wirkung haben und sich negativ auf die Fertilität auswirken könnten.

In Untersuchungen an freiwilligen Probanden wurde eine erhöhte Ausschüttung bestimmter Stresshormone unter der Einwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder



Experimente an Zellkulturen helfen, zu verstehen, welche Wirkungen elektromagnetische Felder auf zelluläre Prozesse haben.

festgestellt. Ähnliche Ergebnisse liegen auch aus Experimenten an Versuchstieren vor. Aus letzteren Untersuchungen ergaben sich auch Hinweise auf Beeinträchtigungen des Immunsystems.

Die Ergebnisse der Laborexperimente an Menschen und Tieren zu den Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung auf das Zentrale Nervensystem werden von der Mehrzahl der wissenschaftlichen Kommissionen als vergleichsweise aussagekräftig bewertet (s. Tabelle 2.2). In Experimenten am Menschen und an verschiedenen Tieren wurden Auswirkungen niederfrequent modulierter Hochfrequenzfelder auf das Nervensystem nachgewiesen. Diese reichen von Einflüssen auf die Wirksamkeit bestimmter Neurotransmitter über Veränderungen der Gehirnpotentiale (EEG), vor allem in der Schlafphase, bis zu Beeinflussungen kognitiver Funktionen und des Verhaltens bei Mensch und Tier. Die vorliegenden Ergebnisse sind als konsistente Hinweise auf Einflüsse hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Zentrale Nervensystem zu werten. Einzelne Kommissionen halten auch eine erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Schadstoffe als Folge von Hochfrequenzexpositionen für möglich (s. Tabelle 2.2).

Ob die beobachteten Beeinflussungen des Zentralen Nervensystems ursächlich für die Befindlichkeitsstörungen verantwortlich sind, unter denen empfindliche Personen nach eigenen Angaben leiden, wenn sie geringen Intensitäten hochfrequenter Strahlung ausgesetzt sind, oder ob

Kopfschmerzen, Schlaflosigkeit, Hautbrennen und weitere (eher unspezifische) Symptome auf andere physiologische Wirkungen zurückzuführen sind, kann anhand der wenigen und zum Teil widersprüchlichen wissenschaftlichen Befunde derzeit nicht beantwortet werden. Aber es scheint so zu sein, dass die betroffenen, elektrosensiblen Personen auch sehr empfindlich gegenüber anderen Umwelteinflüssen sind.

In Untersuchungen an Zellkulturen und Experimenten mit Versuchstieren wurden Veränderungen am Erbgut, wie Einzel- und Doppelstrangbrüche sowie Schäden an den

## Kasten 2.8

Beispiele wissenschaftlicher Arbeiten

### Gentoxische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder

Zur Untersuchung der gentoxischen Wirkung von 2450 MHz Feldern mit Leistungsdichten von 50 bis 100 W/m<sup>2</sup> wurden erwachsene männliche Wistar Ratten 2, 8, 15 oder 30 Tage lang täglich zwei Stunden exponiert und direkt nach der letzten Exposition getötet. Indikator für die gentoxische Wirkung war das Vorhandensein von Mikronuklei in polychromatischen Erythrozyten (PCEs) im peripheren Blut. Polychromatische Erythrozyten sind unreife rote Blutzellen, die durch saure und basische Farbstoffe angefärbt werden können. Thermische Effekte wurden durch Messung der Körpertemperatur während der Bestrahlung ausgeschlossen. Im zeitlichen Verlauf ergaben sich Unterschiede zwischen den Kontrollen und den exponierten Tieren. So zeigte sich zu Beginn des Experiments bei den exponierten Tieren eine starke Zunahme an unreifen Erythrozyten im peripheren Blut. Dies ist ein Hinweis auf eine Beeinträchtigung der Proliferation und Reifung der kernhaltigen erythropoetischen Zellen (Vorläuferzellen der roten Blutzellen) durch die Exposition und bedeutet, dass die Bestrahlung die Erythropoese im Knochenmark hemmt. Im weiteren Verlauf des Experiments verringerte sich dieser Unterschied zwischen den exponierten und scheinexponierten Tieren. Die Häufigkeit von Mikronuklei pro 1.000 PCEs im peripheren Blut war bei den exponierten Tieren nach acht Tagen signifikant erhöht, glich sich danach aber wieder den Werten der scheinexponierten Tiere an. Beide Beobachtungen sprechen dafür, dass in den exponierten Ratten sowohl bei der Erythropoese als auch bei der gentoxischen Wirkung ein Anpassungsmechanismus aufgetreten ist, der die Expositionseffekte ausgleicht.

Trosic I., Busljeta I., Kasuba V. & Rozzgaj R. 2002: Micronucleus induction after whole-body microwave irradiation of rats. *Mutat. Res.* 521 (1-2): 73-79

Chromosomen, festgestellt. Hierbei kann es sich um direkte molekulare Wirkungen handeln, das heißt, die hochfrequente Strahlung führt zu Mehrfachanregungen der Moleküle und anschließendem Bruch von schwachen molekularen Bindungen. Dies erscheint nach neuesten Untersuchungen zu Anregungsvorgängen in Makromolekülen denkbar. Es kann aber auch sein, dass die Schäden am Erbgut durch andere Noxen entstanden sind, und dass die hochfrequente Strahlung 'nur' zu einer Hemmung der natürlichen zelleigenen Reparaturmechanismen führt. In Tabelle 2.2 fehlen Stellungnahmen, die die Ergebnisse der neuesten Untersuchungen einbeziehen.

In *in vitro*-Experimenten wurden Einflüsse niederfrequent gepulster Hochfrequenz-Felder auf die Zellkommunikation und die Steuerung zellulärer Prozesse beobachtet, wie sie auch bei niederfrequenten Magnetfeldern auftreten, und es wurden Auswirkungen auf Gen-Expression, -Transkription und -Translation festgestellt. Auch gibt es Hinweise auf eine fördernde Wirkung auf die Zell-Proliferation und Beeinträchtigungen der Zell-Differenzierung. Die Aktivität des Enzyms ODC wird einigen Experimenten zufolge nicht nur durch bekannte chemische Tumorpromotoren gesteigert. Es wurde in mehreren Experimenten gezeigt, dass diese Wirkung auch durch niederfrequent amplitudenmodulierte Hochfrequenzfelder hervorgerufen werden kann.

## Fazit

Im Vergleich zum Niederfrequenzbereich ist die Zahl der epidemiologischen Untersuchungen im Hochfrequenzbereich klein. Da sehr unterschiedliche Expositionssituationen mit verschiedenen Trägerfrequenzen und Modulationsarten untersucht wurden, ist eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Studien selten gegeben. Dennoch sind die Ergebnisse insgesamt als ernst zu nehmende Hinweise auf ein erhöhtes Krebsrisiko (insbesondere Leukämie und Gehirntumoren) als Folge elektromagnetischer Hochfrequenz-Expositionen zu werten. Eine verlässliche Aussage über das Gesundheitsrisiko der Nutzer von Mobiltelefonen lässt sich derzeit noch nicht machen, allerdings deuten erste Untersuchungen auf einen Zusammenhang zwischen dem häufigen Gebrauch von Handys über viele Jahre und der Ausbildung von bestimmten Gehirntumoren. Auf der experimentellen Seite gibt es etliche Untersuchungen, bei denen Effekte auf der zellulären Ebene oder patho-physiologische Wirkungen nachgewiesen wurden, die

unter anderem im Hinblick auf die Entstehung von Krebs bedeutsam sein könnten. Viele dieser Effekte wurden bereits für Intensitäten nachgewiesen, die deutlich unter der Schwelle für thermische Effekte und den derzeit geltenden Grenzwerten lagen.

Angesichts der in einigen Bereichen vorliegenden wissenschaftlichen Befunde einerseits und der nach wie vor erheblichen Unsicherheiten bei der Bewertung der Gesundheitsrisiken durch nicht-thermische Hochfrequenz-Intensitäten andererseits sind vor dem Hintergrund der bereits hohen Hochfrequenz-Belastungen der Bevölkerung und der absehbaren technologischen Entwicklungen, die zu einer erheblichen Zunahme der Zahl von Hochfrequenz-Quellen führen wird, entschiedene Maßnahmen zum vorsorgenden Gesundheitsschutz durch Minimierung der Expositionen notwendig. (s. Kapitel 3, 4).

# Schutz vor elektromagnetischen Feldern

# 3





## 3 Schutz vor elektromagnetischen Feldern

### 3.1 Grenz- und Vorsorgewerte

Die Frage, welche Gefahren für Gesundheit und Umwelt von technologischen elektromagnetischen Feldern tatsächlich ausgehen, konnte wissenschaftlich bisher nur für relativ starke Felder eindeutig geklärt werden. Die negativen gesundheitlichen Auswirkungen starker Felder (s. Kapitel 2.2, 2.3) wurden bei der Festlegung der gesetzlichen Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung in der 26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV) berücksichtigt. In der 26. BImSchV wurden jedoch nur Grenzwerte für die Frequenzen 16,7 und 50 Hz sowie für den Frequenzbereich 10 bis 300 MHz festgelegt. Für die anderen Frequenzbereiche, in denen durchaus starke Expositionen der Bevölkerung möglich sind, gibt es bisher keine Regelungen. Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) hat in ihrer Stellungnahme vom Juni 2001 deshalb der Bundesregierung empfohlen:

- den gesamten Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 300 GHz in die Grenzwertsetzung auf der Basis einer EU-Ratsempfehlung aus dem Jahr 1998 einzubeziehen;
- Grenzwerte für alle technischen Anlagen und Geräte einzuführen, die elektromagnetische Felder erzeugen.

Bisher ist dies jedoch noch nicht geschehen.

Aber auch in den geregelten Frequenzbereichen tragen die Grenzwerte den wissenschaftlichen Hinweisen auf gesundheitsschädigende Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder mit Feldstärken unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte (s. Kapitel 2.2, 2.3) nicht Rechnung.

In Fällen, in denen es wissenschaftliche Hinweise auf ein potentiell Risiko gibt, das Risiko jedoch noch nicht voll nachweisbar ist, wenn nicht messbar ist, in welchem Umfang ein Risiko besteht, oder wenn wegen unzureichender oder nicht eindeutiger wissenschaftlicher Daten nicht feststellbar ist, wie sich das Risiko auswirken kann, sollte nach einer Mitteilung der EU-Kommission vom Februar 2000 [COM 2000 (1)] das Vorsorgeprinzip angewandt werden.

Das heißt, es sind ordnungsrechtliche, technische und gegebenenfalls planerische Maßnahmen anzuwenden, um das potentielle Risiko zu vermindern.

Ein wichtiger Schritt zu einem verbesserten Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern wäre die Absenkung der gesetzlichen Grenzwerte bzw. die Einführung von Vorsorgewerten. Die Behörden der Schweiz haben bereits entsprechend gehandelt und zusätzlich zu den Sicherheitsgrenzwerten, die überall gelten und mit den deutschen Grenzwerten übereinstimmen, Vorsorge orientierte Anlagegrenzwerte eingeführt, diese sind von Anlagen einzuhalten, die sich in der Nähe empfindlicher Bereiche, wie Wohngebiete, Schulen, Kindertagesstätten und Krankenhäuser, befinden (s. Tabelle 3.1).

In Deutschland gibt es in einzelnen Bundesländern informelle Planungswerte für den Niederfrequenzbereich, die eingehalten werden sollen, wenn neue Anlagen in der Nähe empfindlicher Bereiche (Wohngebiete, Schulen, Kindergärten, Krankenhäuser) errichtet werden oder wenn empfindliche Bebauung in der Nähe bestehender Anlagen geplant wird. Auch etliche Kommunen orientieren sich an deutlich niedrigeren Vorsorgewerten. Da Grenzwerte bundesweit einheitlich festgelegt werden, sind die Planungs- und Vorsorgewerte nicht rechtsverbindlich, aber Vorsorge bewusste Stadt- und Gemeindeverwaltungen wenden sie an, um z.B. die Eignung von Standorten für Mobilfunk- und andere Hochfrequenzanlagen zu beurteilen oder um den Mindestabstand von Wohngebieten, Schulen und Kindergärten zu emittierenden Anlagen festzulegen. Viele Städte und Gemeinden orientieren sich an den vom ECOLOG-Institut empfohlenen Werten, die ebenfalls in Tabelle 3.1 aufgeführt sind. Diese Werte beziehen sich auf die Gesamtmissionen außerhalb von Gebäuden im jewei-



WarnungsvormagnetischemFeld

ligen Frequenzbereich und dienen der Begrenzung von Dauerexpositionen in empfindlichen Bereichen.

### 3.2 Maßnahmen zur Begrenzung elektromagnetischer Immissionen

Angesichts der wissenschaftlichen Unsicherheit in Bezug auf die Frage, ob es Schwellenwerte für die biologische Wirksamkeit elektromagnetischer Felder gibt und wo diese liegen, sind Vorsorgewerte lediglich als Mindeststandards anzusehen. Ziel eines Vorsorge orientierten Immissionsschutzes muss es sein, technisch bedingte elektromagnetische Expositionen so gering wie möglich zu halten. Einige Länder, wie beispielsweise Neuseeland und Schweden, haben deshalb das Minimierungsgebot für elektromagnetische Felder in ihrem Immissionsschutzrecht verankert. Auch die SSK hat sich in der bereits zitierten Stellungnahme für eine Minimierung der Expositionen der Bevölkerung ausgesprochen:

- "Die SSK empfiehlt, bei der Entwicklung von Geräten und bei der Errichtung von Anlagen die Minimierung von Expositionen zum Qualitätskriterium zu machen. Sie weist darauf hin, dass - entgegen der öffentlichen Besorgnis, die vor allem ortsfeste Anlagen betrifft - die Immission insbesondere durch die elektromagnetischen Felder aus Geräten, z.B. aus Haushaltsgeräten oder bei Endgeräten der mobilen Telekommunikation, unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes zu betrachten sind, weil es hier am

ehesten zu einer hohen Exposition eines Nutzers kommen kann."

- "Die SSK empfiehlt, Maßnahmen zu ergreifen, um Expositionen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Rahmen der technischen und der wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten zu minimieren. Das gilt insbesondere für Bereiche, in denen sich Personen regelmäßig über längere Zeit aufhalten. Die Maßnahmen sollten sich an dem Stand der Technik orientieren."

Um elektromagnetische Immissionen zu begrenzen spricht sich die SSK zudem dafür aus:

- die Immissionen durch einzelne Verursacher an Orten, die der Öffentlichkeit zugänglich sind, deutlich unterhalb der Grenzwerte für die Gesamtexposition zu halten
- die Grenzwerte nicht völlig auszuschöpfen, um einen Spielraum für die Nutzung neuer Technologien auch in Zukunft zu behalten
- bei der Festlegung von Sicherheitsabständen für Sendefunkanlagen alle Hintergrundfelder mit einzubeziehen;
- für alle Geräte und Anlagen, die relevante Expositionen verursachen können, entsprechende Produktinformationen zur Verfügung zu stellen
- relevante Immissionen durch elektrische, magnetische

Tabelle 3.1

Sicherheitsgrenzwerte in Deutschland gemäß 26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV) und in der Schweiz gemäß Verordnung über den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung (NISV) sowie Vorsorgeorientierte Schweizer Anlagegrenzwerte gemäß NISV und Vorsorgeempfehlung des ECOLOG -Instituts

Anwendung	Frequenz	Sicherheitsgrenzwerte		Anlagegrenzwerte	Vorsorgewerte
		D 26. BImSchV	CH NISV	CH NISV	ECOLOG
Eisenbahn	16,7 Hz	300 µT	300 µT	1,0 µT	0,1 µT
Stromversorgung	50 Hz	100 µT	100 µT	1,0 µT	0,1 µT
Rundfunk (LW, MW)	0,15 – 1,6 MHz	-	87 – 34 V/m je nach Frequenz	8,5 V/m	2,0 V/m
Rundfunk (KW, UKW, TV)	3,4 – 790 MHz	27,5 – 38,6 V/m je nach Frequenz	27,5 – 38,6 V/m je nach Frequenz	3,0 V/m	2,0 V/m
Mobilfunk	900 – 2100 MHz	41,3 – 61,0 V/m je nach Frequenz	41,3 – 61,0 V/m je nach Frequenz	4,0 – 6,0 V/m je nach Frequenz	2,0 V/m

und elektromagnetische Felder in regelmäßigen Zeitabständen zu überprüfen.

In Bezug auf die Kennzeichnung von Geräten und die Offenlegung von Expositionsdaten formuliert die SSK klare Forderungen. Sie fordert:

- "... geeignete einheitliche Kennzeichnungen, welche die Exposition durch Geräte angeben, z.B. in welchem Ausmaß Basisgrenzwerte bzw. Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung ausgeschöpft werden;
- ... rechtzeitig vor der Einführung neuer Technologien (z.B. neuer Telekommunikationseinrichtungen, Personenidentifizierungsanlagen) die für eine gesundheitliche Bewertung notwendigen Daten offen zu legen."

Ferner betont die SSK die Notwendigkeit, auch das Mittel der Produktnormung zu nutzen, um Expositionen zu verringern:

- Die SSK bestätigt die Notwendigkeit von Produktnormen zur Begrenzung von elektromagnetischen Expositionen bei bestimmungsgemäßem Gebrauch von Geräten.
- Die SSK stellt mit Sorge fest, dass die Produktnormung auf europäischer Ebene zunehmend die Schutzüberlegungen der EU-Ratsempfehlung und der Internationalen Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) unterläuft. Dazu zählt z.B. das völlige Ausschöpfen des Expositionsspielraumes bereits durch ein einziges Produkt, die Nichtberücksichtigung von (erheblichen) Messunsicherheiten und die Expositionsabschätzung auf der Basis unrealistisch günstiger Bedingungen. Da sich die europäische Produktnormung der nationalen Regelkompetenz entzieht, empfiehlt die SSK, sich nachdrücklich für die Einhaltung der EU-Ratsempfehlung auch durch EU-Normungsgremien einzusetzen.

Die SSK setzt sich ferner für verstärkte Anstrengungen in der Forschung ein, um die Kenntnisse über gesundheitliche Beeinträchtigungen bei elektromagnetischen Expositionen zu verbessern.

In ihre Stellungnahme zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern im Zusammenhang mit neuen Technologien vom April 2003 bekräftigt die SSK mit

Blick auf die folgenden Punkte noch einmal ihre Empfehlungen aus dem Jahr 2001:

- die verstärkte Anwendung drahtloser Kommunikationssysteme, die sowohl einher geht mit einer intensiveren Nutzung bisheriger als auch mit der Verwendung weiterer Frequenzbänder und der Umwidmung bisheriger Frequenzbänder für neue Technologien, verbunden mit der Verwendung neuartiger Modulationssysteme und Signalstrukturen
- die Zunahme der gleichzeitigen Anwendung mehrerer Quellen
- die vermehrte Anwendung mobiler Quellen.



Warnung vor elektromagnetischem Feld

Die SSK stellt nochmals fest, dass

- die aktuelle Normung es zulässt, dass einzelne Geräte so ausgelegt werden dürfen, dass sie für sich allein die Immissionsgrenzwerte vollständig ausschöpfen und
- es immer mehr Anwendungen gibt, für die derzeit keine gesetzlichen Grenzwerte zum Schutz von Personen vorhanden sind.

Die SSK weist darauf hin, dass vielfach Feld- und Emissionscharakteristika nicht erhoben werden können, da

- selbst bereits in der Einführung befindliche neue Technologien in vielen technischen Details noch nicht ausreichend definiert sind
- alle möglichen Anwendungsbereiche von neuen Technologien anfangs noch nicht vollständig absehbar sind
- in einigen Fällen seitens der Hersteller der Problematik

der Emission elektromagnetischer Felder zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet wurde

- in einigen Fällen von Herstellern Emissionsdaten zurückgehalten werden.

Ergänzend zu den bereits genannten Empfehlungen weist die SSK darauf hin,

- dass insbesondere bei der Einführung neuer Technologien die rechtzeitige Risikokommunikation unverzichtbar ist, und empfiehlt, vor und begleitend zur Einführung neuer Technologien die Öffentlichkeit über die Emissionen elektromagnetischer Felder und mögliche gesundheitliche Auswirkungen zu informieren.



Warnungsvor elektromagnetischem Feld

Die SSK empfiehlt,

- die Hersteller in geeigneter Weise darauf aufmerksam zu machen, dass die Bewertung der Emission elektromagnetischer Felder ihrer Geräte Bestandteil der Risikobewertung sein muss. Dabei sind sowohl der bestimmungsgemäße Gebrauch als auch die zu erwartende Präsenz weiterer Geräte zu betrachten.

Die SSK fordert,

- vor einer Genehmigung zur Einführung großflächiger Anwendungen ... mögliche gesundheitliche Beeinträchtigungen durch verursachte elektromagnetische Felder als Bewertungskriterium mit heranzuziehen.

Die Empfehlungen und Forderungen der Strahlenschutzkommission sind im Sinne der Vorsorge richtig, haben bisher jedoch keinerlei praktische Relevanz. Weder bei der Konstruktion von Geräten und Anlagen noch bei der Situierung

z.B. von Mobilfunksendeanlagen ist ein Bemühen der Hersteller und Betreiber emittierender Anlagen zu erkennen, Lösungen zu wählen, die zu einer Minimierung der Expositionen der Bevölkerung beitragen. Auch andere Empfehlungen der Strahlenschutzkommission, z.B. zur Kennzeichnung von Geräten und Anlagen in Bezug auf die von ihnen verursachten Immissionen, werden ignoriert. Die Jury Umweltzeichen hat beispielsweise ein Label ('Blauer Engel') für strahlungsarme Handys geschaffen, die Hersteller von Mobiltelefonen weigern sich jedoch standhaft, ihre Geräte entsprechend zertifizieren zu lassen.

Ein 'gut gemeinter' Appell einer Strahlenschutzkommission reicht offensichtlich nicht aus, um die Akteure zu einem Vorsorge orientierten Handeln zu bewegen. Deshalb ist eine Novellierung der 26. BImSchV dringend erforderlich, in der das Minimierungsgebot festgeschrieben und geregelt wird, wie seine Einhaltung zu überprüfen ist. Über eine Vorsorge orientierte Überarbeitung der 26. BImSchV hinaus sollten weitere Maßnahmen zur Verminderung der elektromagnetischen Expositionen und zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung vor möglichen negativen gesundheitlichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder umgesetzt werden:

- Überarbeitung der Vorschriften zum Arbeitsschutz mit dem Ziel, auch im beruflichen Bereich die elektromagnetischen Expositionen so weit wie möglich zu senken
- Integration der Zielsetzung 'Minimierung elektromagnetischer Expositionen' in alle hierfür relevanten beruflichen Ausbildungsgänge
- Verpflichtung der Hersteller von Geräten, Maschinen und Anlagen zur Kennzeichnung ihrer Produkte in Bezug auf die von diesen verursachten Expositionen bzw. zur Entwicklung und Anwendung eines Systems zur verbindlichen und einheitlichen Expositionsklassifizierung von Geräten, Maschinen und Anlagen (vergleichbar den Energieeffizienzklassen für Haushaltsgeräte)
- Verbesserung der Möglichkeiten der Kommunen, Einfluss auf die Planung und Errichtung emittierender Anlagen zu nehmen, um möglichst geringe Expositionen ihrer Bürger sicher zu stellen
- Verbesserung der Überwachung nicht nur der von Großanlagen verursachten Immissionen, sondern auch



der Gesamtmissionen, zu denen kleine Geräte (Mobilfunk, WLAN, DECT, Bluetooth usw.) mittlerweile erheblich beitragen

- Verpflichtung der Normungsgremien, bei der Festlegung technischer Normen die tatsächlichen Expositionssituationen mit Beiträgen zu den Expositionen aus vielen Quellen zu berücksichtigen, statt die geltenden Grenzwerte durch einzelne Geräte, Maschinen oder Anlagen auszuschöpfen
- Verbesserung der Aufklärung der Bevölkerung und der Arbeitnehmer über die Risiken durch elektromagnetische Felder und die eigenen Möglichkeiten zur Vermeidung und Verminderung von Belastungen.

Die rechtlichen Spielräume von Städten und Gemeinden zum vorsorgenden Umwelt- und Gesundheitsschutz waren nie groß und wurden in den letzten Jahren weiter eingeschränkt, vor allem zu Gunsten des Ausbaus der Mobilfunknetze. Die Praxis zeigt jedoch, dass die Kommunen oft ihre Vorstellungen auf dem Wege von Verhandlungen mit den Unternehmen, die emittierende Anlagen planen, durchsetzen können, denn den Unternehmen ist in der Regel auch daran gelegen, Standortplanungen im Einvernehmen mit den Kommunen vorzunehmen. Kommunalpolitik und -verwaltung tun gut daran, ihre Bürger rechtzeitig in solche Planungen einzubeziehen.

### 3.3 Persönlicher Schutz vor elektromagnetischen Feldern

Änderungen von Gesetzen und Vorschriften dauern lange – selbst wenn der politische Wille dazu da ist – und Unternehmen reagieren selten auf frühe Warnungen, sondern meist erst, wenn Schäden offensichtlich und Maßnahmen zur Schadensbegrenzung unvermeidlich sind. Angesichts der rasanten Zunahme der Zahl der Quellen elektromagnetischer Felder und der damit wachsenden Expositionen großer Teile der Bevölkerung, wäre es geradezu fahrlässig, auf politische und unternehmerische Einsicht zu setzen. Vielmehr müssen alle Möglichkeiten, die jede und jeder Einzelne im Alltagshandeln hat, genutzt werden, um die persönlichen Expositionen und die der Menschen in der Umgebung zu minimieren. Wer sich gut informiert und überlegt verhält, kann technisch bedingte elektromagnetische Expositionen heutzutage zwar kaum noch ganz vermeiden, aber sehr stark reduzieren, denn oft rühren diese

überwiegend von Geräten, Maschinen und Anlagen in der eigenen Wohnung her (s. Kapitel 4). Im Folgenden werden einige allgemeine Tipps zum Schutz vor elektromagnetischen Feldern gegeben. Weitere Hinweise auf Maßnahmen zum Schutz vor elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern bestimmter Quellen werden jeweils nach der Beschreibung dieser Quellen und den von ihnen verursachten Expositionen im Kapitel 4 gegeben.

#### Verzicht auf problematische Geräte

Auf Geräte, die zu relativ hohen Dauerbelastungen durch magnetische Felder führen können, z.B. Niederspannungshalogenlampen, elektrische Nachtspeicherheizungen, schnurlose DECT-Telefone, Funk-Babyphone und Funknetzwerke mit permanent sendenden Access Points (s. Kapitel 4.4, 4.9, 4.10), sollte verzichtet werden.

#### Informierte Entscheidungen

Wer eine neue Wohnung sucht, sollte sich über Belastungen, insbesondere durch Stromversorgungs- und Funkseideanlagen in der Nachbarschaft, informieren. Etliche Städte und Gemeinden haben Mobilfunk-Kataster eingerichtet, die meist über das Internet zugänglich sind und Informationen zu den Standorten von Mobilfunksendeanlagen, manchmal auch von anderen Funkseideanlagen, bieten. Einige Informationen werden auch von der Bundesnetzagentur bereitgestellt.

Auch vor der Installation neuer elektrischer Anlagen und dem Kauf von elektrischen Geräten sollten Informationen zu den Feldern eingeholt werden, die von diesen im Betrieb ausgehen. Hersteller und Handel sind leider oft nicht bereit oder in der Lage, diese Informationen zu liefern. Es ist aber sinnvoll und notwendig, durch Nachfragen zu zeigen, dass für bewusste Verbraucher niedrige Immissionen ein Kaufargument darstellen. Verlässliche Informationen gibt es in vielen Fällen bei den Verbraucherverbänden und in einschlägigen Verbraucherzeitschriften. Auch das Bundesamt für Strahlenschutz informiert über die Belastungen durch Mobiltelefone.

#### Ausschalten nicht benötigter Geräte

Elektrische Geräte sollten vollständig ausgeschaltet werden, wenn sie nicht in Benutzung sind. Auch im Standby-Betrieb fließt ein elektrischer Strom, der ein Magnetfeld

verursacht. Geräte, wie beispielsweise Computer, Fernsehapparate und HiFi-Anlagen, bei denen auch nach Betätigung des Ausschalters ein Reststrom durch die Transformatoren fließt, sollten vom durch Ziehen des Netzsteckers oder Verwendung einer abschaltbaren Steckerleiste Netz getrennt werden.



Verbot für Personen mit Herzschrittmacher

### Abstand halten

Von Geräten, die nicht abgeschaltet werden können, wie Kühlschrank, Gefriertruhe, Radiowecker, oder Geräte, bei denen der Standby-Betrieb nicht vermieden werden kann, weil sonst z.B. die Programmierung verloren geht, sollte ein Schutzabstand von mindestens 1,5 Meter eingehalten werden. Auf einen möglichst großen Schutzabstand sollte auch bei Hausleitungen, Sicherungskästen, Zuleitungen von elektrischen Geräten im Dauerbetrieb (s. Kapitel 4.4), schnurlosen Telefonen (s. Kapitel 4.9) und WLAN-Access Points (s. Kapitel 4.10) geachtet werden. Diese Empfehlung gilt vor allem für Kinderzimmer, Schlafstätten und andere Daueraufenthaltsbereiche.

### Sorgfältige Planung von Installationen

Bei Neubauten sollte schon bei der Installationsplanung darauf geachtet werden, dass Stromleitungen, über die dauernd hohe Ströme geführt werden, einen hinreichenden Abstand von den Daueraufenthaltsbereichen im Haus haben. Auch Funknetzwerke für Computer (WLAN, s. Kapitel 4.10) müssen, wenn sie nicht zu vermeiden sind, sehr sorgfältig geplant werden.

#### Kasten 3.1

### Abschirmung hochfrequenter elektromagnetischer Felder

Wenn hochfrequente elektromagnetische Wellen auf die Oberfläche einer Wand auftreffen, wird die Welle vollständig oder teilweise reflektiert. Von dem Teil der Welle, der in das Wandmaterial eindringt, wird wiederum ein Teil absorbiert und ein Teil durchgelassen. Wie groß der reflektierte, der absorbierte und der durchgelassene Anteil der Welle sind, hängt unter anderem von der Frequenz der Welle, dem Winkel, unter dem sie auf die Oberfläche trifft, sowie den Eigenschaften des Wandmaterials und der Oberfläche ab.

Abbildung 3.1 zeigt, dass das Abschirmvermögen von Materialien, die im Hausbau eingesetzt werden, sehr unterschiedlich ist. Fenster mit konventioneller Verglasung haben praktisch überhaupt keine Abschirmwirkung. Das Abschirmvermögen von Wärmeschutzverglasung ist dagegen höher als das der meisten massiven Baumaterialien.

Materialien mit hohem elektrischem Leitvermögen, wie Metalle und Graphit, lassen praktisch keine hochfrequenten Felder durch. Diesen Effekt nutzen die Anbieter von speziellen Abschirmmaterialien aus. Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz wurden verschiedene Abschirmmaterialien, unter anderem Putze, Tapeten und Gardinstoffe getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine wirkungsvolle Abschirmung möglich ist (s. Abbildung 3.2). Es werden aber auch Materialien angeboten, die viel kosten, aber nur wenig bewirken.

Eine perfekte Abschirmung lässt sich erreichen, wenn Räume mit Metallblechen oder -folien ausgekleidet werden. Da Bleche und Folien aber auch als Dampfsperren wirken, ist eine solche Abschirmung für das Wohnklima nicht günstig. Dieser negative Effekt lässt sich vermeiden, wenn statt Blechen und Folien engmaschige Metallnetze verwendet werden, die ähnlich gute Abschirmwirkung haben.



Zutritt für Unbefugte verboten

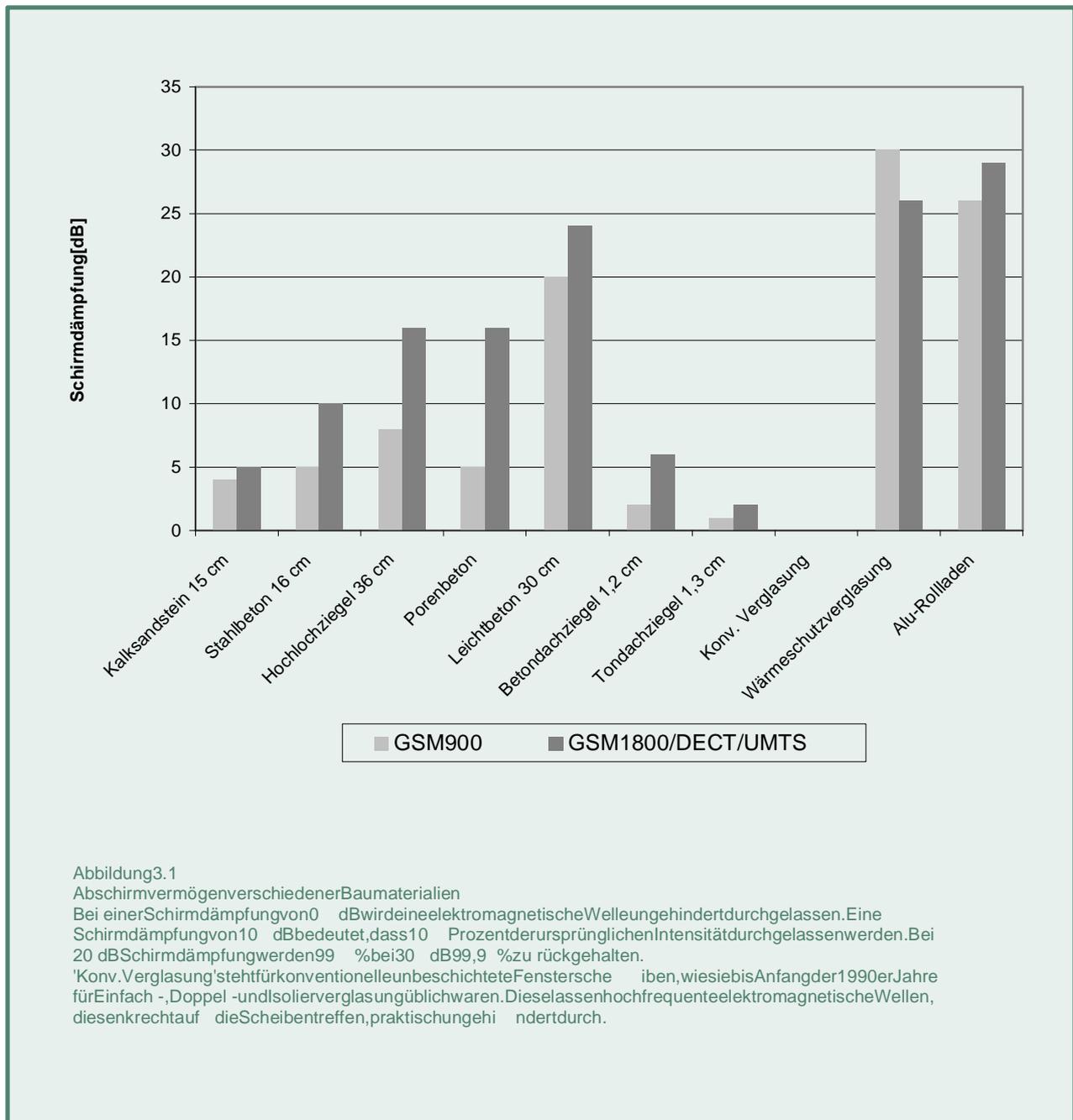
## Abschirmung

Niederfrequente Magnetfelder können nur mit sehr großem Aufwand abgeschirmt werden. Bei elektrischen Feldern ist das einfacher. Hier reichen metallische Folien oder engmaschige Metallnetze, die aber fachgerecht geerdet werden müssen, weil sie sonst nur die Felder 'verschleppen'. Außerdem ist darauf zu achten, dass durch die Anbringung von Folien nicht 'die Atmung' der Wände behindert wird. Für hochfrequente elektromagnetische Felder wird eine

ganze Reihe von Materialien angeboten, mit denen diese bei fachgerechter Anbringung abgeschirmt werden können (s. Kasten 3.1).

## Messung

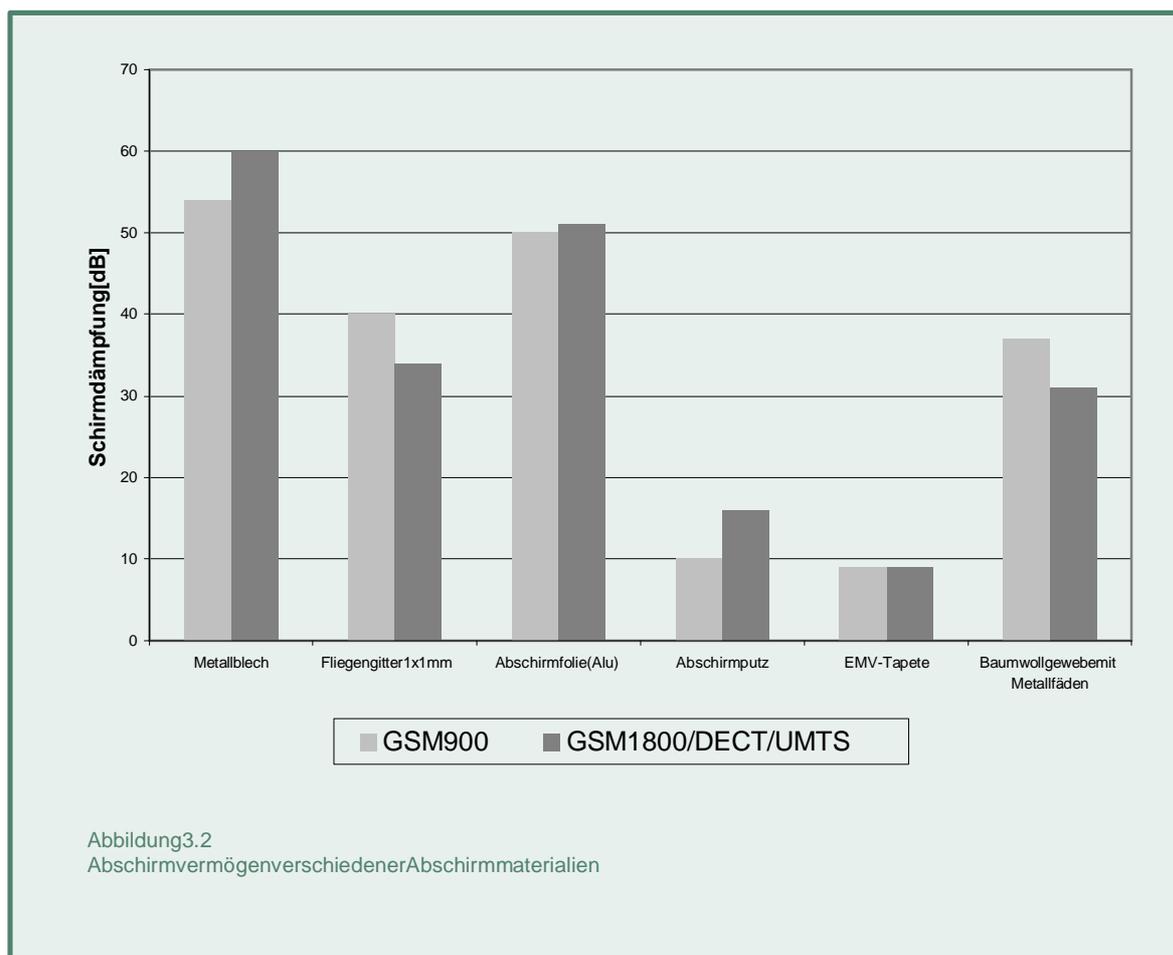
Die tatsächlichen Belastungen durch elektrische und magnetische Felder können mit Hilfe entsprechender Messgeräte mit relativ geringem Aufwand ermittelt werden. Zumindest vor größeren Umbau- oder Abschirmmaßnahmen



ist eine Messung sinnvoll. Solche Messungen sollten von entsprechend geschultem Personal mit kalibrierten Messgeräten durchgeführt werden. Im Handel sind zwar auch etliche Billiggeräte erhältlich, die von Laien bedient werden können, viele dieser Geräte sind jedoch für aussagekräftige Messungen völlig ungeeignet.

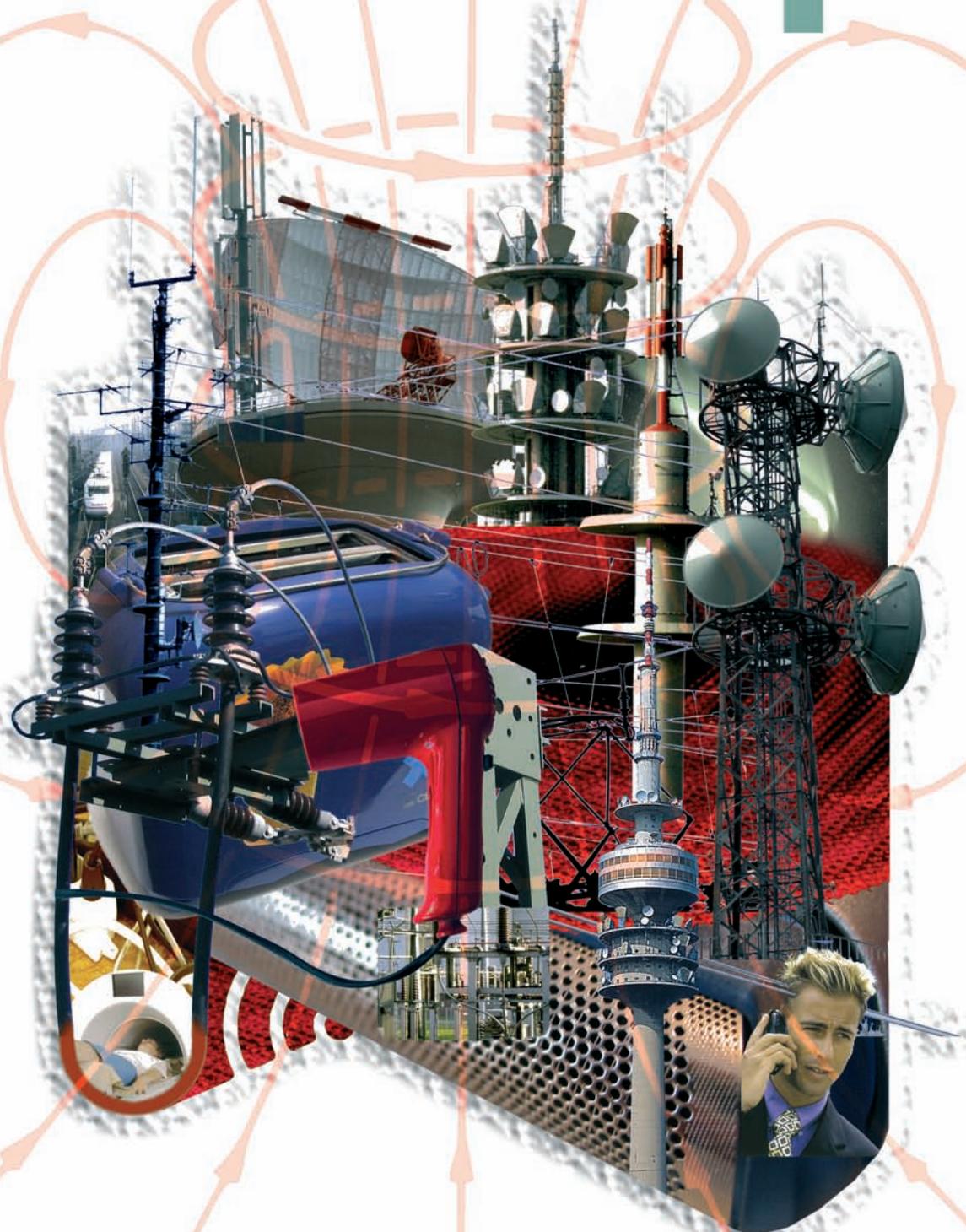
## Beratung

Beratungen zur Verminderung von Belastungen durch elektrische und magnetische Felder werden ebenso wie Messungen von etlichen wissenschaftlichen Instituten, Baubiologen und anderen angeboten. Nicht alle dieser Angebote sind seriös. Am besten ist es, sich bei einer Verbraucherzentrale vor Ort über vertrauenswürdige Anbieter zu informieren.



# Quellen elektromagnetischer Felder

# 4





## 4 Quellen elektromagnetischer Felder

Der Mensch ist schon seit jeher elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern ausgesetzt. Mit der Elektrifizierung fast aller Lebens- und Arbeitsbereiche und dem zunehmenden Einsatz elektromagnetischer Felder insbesondere für die Informationsübertragung, aber auch für viele andere Zwecke, haben die von Geräten, Maschinen und Anlagen verursachten Immissionen so stark zugenommen, dass es nur noch wenige Gebiete auf der Erde gibt, in denen sie nicht um ein Vielfaches stärker sind als die natürlichen Felder.

### 4.1 Übersicht

In Tabelle 4.1 sind die Hauptquellen elektrischer und magnetischer Felder im Niederfrequenzbereich aufgeführt. In der Tabelle findet sich neben Angaben zu den Frequenzen und den Quellen der Felder auch eine kurze Beschreibung der Merkmale der von ihnen verursachten Expositionen mit Informationen zur Gruppe der von diesen Feldern Betroffenen, zum Einwirkungsbereich und zur Expositionsdauer. Wenn Quellen oder Felder besondere Merkmale aufweisen, wird darauf hingewiesen. Nähere Erläuterungen zu einzelnen Quellen niederfrequenter Felder finden sich in den folgenden Unterkapiteln.

Die Stärke der natürlicherweise vorhandenen elektrischen und magnetischen Wechselfelder, die vor allem durch die



Hochspannungsfreileitungen verursachen großflächige Immissionen im Niederfrequenzbereich.

weltweite Gewitteraktivität erzeugt werden, ist im Niederfrequenzbereich um mehrere Größenordnungen geringer als die der technisch verursachten Felder. Bei Magnetfeldern von 50 Hz ist die durchschnittliche, technisch bedingte Feldstärke in Ballungsgebieten im Mittel um mehr als einen Faktor 100.000 größer als der natürliche Untergrund.

Die flächenmäßig bedeutendsten elektrischen und magnetischen Immissionen rühren von Stromversorgungsanlagen, elektrischen Maschinen und Geräten her, die alle 50 Hz-Feldern emittieren. In geringerem Maße treten Magnetfelder insbesondere bei ungeradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz auf. Durch Schalt- und Entladungsvorgänge kann es zudem zur Entstehung von zeitlich schnell veränderlichen Feldstärkespitzen (Transienten) und Frequenzgemischen kommen. Eine zweite Quelle großflächiger Immissionen sind Bahn- und Bahnstromanlagen. Diese verursachen hauptsächlich Felder von 16,7 Hz. Neben den großflächig auftretenden 50 und 16,7 Hz-Feldern können örtlich begrenzt auch Felder anderer Frequenzen, z.B. verursacht durch elektrische Maschinen, Warensicherungsanlagen oder Computer, von Bedeutung sein.

Unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Immissionsschutzes sind vor allem Stromversorgungsanlagen, insbesondere Hoch- und Mittelspannungsfreileitungen, sowie elektrische Bahnanlagen einschließlich ihrer Versorgungsleitungen problematisch, wenn sie zu großflächigen Dauerimmissionen in Wohngebieten führen. Weitere Quellen für Dauerexpositionen sind elektrische Hausanschluss- und Versorgungsleitungen, Transformatorstationen in Häusern, Dachständerleitungen sowie elektrische Nachtspeicherheizungen, die relativ hohe Expositionen in Teilbereichen der betroffenen Häuser verursachen können. Sehr hohen Feldstärken sind die Beschäftigten an vielen industriellen Anlagen und Maschinen, wie Umspannstationen und Elektroschweißgeräte, ausgesetzt. Viele handgehaltene elektrische (Klein-) Geräte (Haushaltsgeräte, elektrische Werkzeuge, Geräte zur Körperpflege) sind aufgrund ihrer leichten Bauweise von starken magnetischen Streufeldern umgeben, die aber nur während der Nutzungszeit zu erhöhten Expositionen führen.

Die Hauptquellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Neben den Angaben zu Frequenzen und Quellen der Felder sind auch Merkmale der Expositionen angegeben (vgl. Erläuterungen zu Tabelle 4.1). Nähere Erläuterungen zu einzelnen Quel-

Tabelle 4.1

Quellenniederfrequente elektrische und magnetische Felder

Frequenz	Quelle	Merkmale der Exposition
<b>Natürliche Felder</b>		
0 Hz	Natürliches Erdmagnetfeld	Stärkes des Magnetfeldes abhängig von der geographischen Breite und dem geologischen Untergrund zeitliche Variation durch die Erdrotation Störungen durch den Sonnenwind
0 Hz	Elektrostatisches Schönwetterfeld	Stärke des elektrischen Feldes abhängig von der Jahreszeit und der Wetterlage Störungen durch Gewitter
0 Hz bis 30 kHz	natürliche Atmospheric / natürliche Schumann - Resonanzen in der Erdatmosphäre	Schwache Felder Stärke des elektrischen Feldes abhängig von der weltweiten Gewitteraktivität
<b>Technogene Felder</b>		
0 Hz	viele Stadt-, Straßen- und U-Bahnen, Magnet-schwebebahn	(kein wirklichen Gleichfelder, da gleichgerichteter Wechselstrom) mittlere Dauerexposition des Personals und der Fahrgäste in den Bahnen großflächigen niedrige bis mittlere Dauerexposition der Bevölkerung entlang der Bahnstrecken
0 Hz	Anlagen und Maschinen in der Industrie (Elektrolyseanlagen, Lichtbogen- und Plasma - Schmelzöfen, Hochleistungs - Gleichstrom-motoren, Hubmagnete)	(kein wirklichen Gleichfelder, da gleichgerichteter Wechselstrom) Sehr hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich
0 Hz	Anlagen und Geräte in Forschungseinrichtungen (Teilchenbeschleuniger, Kernfusion, magnetische Energiespeicher)	Sehr hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich
0 Hz	Anlagen und Geräte in medizinischen Einrichtungen (Magnetresonanz - Tomographie)	Hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Sehr hohe Kurzzeitexposition der Patienten
16,7 Hz	Eisenbahn (rollendes Material, Kraftwerke, Umspannanlagen, Versorgungsleitungen, Einspeiseleitungen, Oberleitungen, Schienen)	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen großflächigen niedrige bis mittlere Dauerexposition der Bevölkerung entlang der Bahnstrecken starke Variation der Magnetfelder in Abhängigkeit vom Betrieb auf der jeweiligen Strecke
50 Hz	Stromversorgungsanlagen (Kraftwerke, Umspannanlagen, Transformatoren, Freileitungen und Kabel auf der Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene)	Hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Großflächige Dauerexposition der Bevölkerung entlang von Hochspannungstrassen und in der Umgebung von Transformatoren Auf den unteren Spannungsebenen z. T. starke Schwankungen der Magnetfelder durch zeitliche Lastschwankungen
50 Hz	elektrische Anlagen, Maschinen und Geräte im Haushalt	Mittlere Dauerexposition der Bewohner Hohe Kurzzeitexpositionen möglich
50 Hz bis 3 MHz	elektrische Anlagen und Maschinen in der Industrie	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich
50 Hz bis 1 GHz	elektrische Anlagen, Maschinen und Geräte an Büroarbeitsplätzen	Niedrige bis mittlere Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen
16 Hz bis 12,5 kHz	Anlagen für Diebstahlsicherung (Einzelhandel, Bibliotheken) und Zugangskontrolle (Ausweis- und Fahrkartenkontrolle, Metalldetektoren)	Hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Hohe Kurzzeitexpositionen beim Passieren der Anlagen möglich



Mobilfunkanlagen stellen bezogen auf die Fläche die Hauptquelle hochfrequenter elektromagnetischer Felder dar.

len hochfrequenter Felder finden sich in den folgenden Unterkapiteln.

In Deutschland sind weit mehr als 100.000 Anlagen in Betrieb, die hochfrequente elektromagnetische Felder zur Übertragung von Daten und Informationen abstrahlen oder solche Felder zur Überwachung und Ortung einsetzen:

- Radio- und Fernsehsender
- Schiffs- und Flugfunkanlagen
- Mobil-, Behörden- und Betriebsfunkanlagen
- Amateurfunksender
- Richtfunkstrecken
- Satellitenfunk- und Navigationsanlagen
- Luftraumüberwachungs-, Flughafen-, See-, Wasserstraßenüberwachungs-, Schiffs-, Verkehrs-, Wetter- und militärische Radaranlagen.

Die Zahl der Anlagen wird künftig deutlich zunehmen, weil unter anderem die Mobilfunknetze, Funknetze zur Datenübertragung zwischen Computern (WLAN), Erfassungssysteme zur Erhebung der Autobahnmaut, weiter ausgebaut werden bzw. immer weitere Verbreitung finden. Zudem werden in großem Umfang neue Technologien eingeführt, die Funkwellen verwenden und deren Emissionen zu einem weiteren Anstieg der Hochfrequenzexposition der Bevölkerung führen werden:

- Abstandsradar in Kraftfahrzeugen

- Funkbaken zur Verkehrslenkung
- elektronische Kennzeichnungen von Personen, Waren usw. (RFID)
- Anlagen und Geräte zur System- und Prozessüberwachung und -steuerung in Wohnungen und an Arbeitsstätten
- Sensoren zur Fernüberwachung des Gesundheitsstatus von Patienten usw.

Die elektromagnetischen Belastungen durch diese Anlagen sind sehr unterschiedlich. Leistungsstarke Radio- und Fernsehsender führen in ihrer Umgebung zu relativ hohen Expositionen. Von diesen Sendern gibt es allerdings nur relativ wenige in Deutschland. Mobilfunkanlagen stellen vergleichsweise schwache Sender dar, sie sind jedoch sehr zahlreich und stehen überall im Land auch mitten in Wohngebieten. Einig Richtfunkstrecken erzeugen zwar unmittelbar im Strahl relativ hohe Felder, der Strahl ist jedoch so gut gebündelt und muss allein schon aus betrieblichen Gründen einen so großen Abstand zu Häusern und anderen Objekten einhalten, dass die Belastungen für die Umgebung in der Regel sehr gering sind. Zudem hängt die Belastung auch stark vom Abstand zur Sendeanlage ab: Die elektrische Feldstärke nimmt linear mit dem Abstand ab, das heißt bei einer Verzehnfachung des Abstands geht sie auf ein Zehntel des Ausgangswerts zurück. Die Intensität bzw. Leistungsdichte hängt sogar quadratisch vom Abstand ab: Bei einer Verzehnfachung des Abstands wird sie auf ein Hundertstel des Ausgangswerts reduziert.



Leistungsstarke Radio- und Fernsehsender können lokal zu hohen Immissionen führen.

Sehr hohe Hochfrequenzexpositionen treten vor allem bei industriellen Anlagen, wie Induktionsöfen und Plastikschweißanlagen, auf. Die Hauptbetroffenen sind die an den Anlagen Beschäftigten. Das gilt auch für Radaranlagen, insbesondere solchen an Wasserstraßen und auf Wasserfahrzeugen, die beim Personal in Schleusenanlagen und auf den Fahrzeugen zu hohen Expositionen führen können. Die zunehmende Verbreitung funkgestützter Warensicherungs- und Logistiksysteme wird auch beim im Handel beschäftigten Personal zu höheren Expositionen führen.

Aus Sicht des Immissionsschutzes verdienen Anlagen und Geräte eine besondere Beachtung, die zu sehr hohen Expositionen oder Dauerexpositionen der Bevölkerung bzw. von Beschäftigten führen können.

Dauerexpositionen großer Bevölkerungsgruppen werden vor allem durch Mobilfunkanlagen in der Nachbarschaft, Basisstationen schnurloser DECT-Telefone in der eigenen oder einer Nachbarwohnung, Radio- und Fernsehsender sowie durch Anlagen für andere Funkdienste verursacht. Absehbare technologische Entwicklungen werden dazu führen, dass immer mehr Sender körpfernah betrieben werden (z.B. Mobilfunk, WLAN, Bluetooth). Die Sendeleistungen sind bei diesen Technologien zwar gering, aber der geringe Abstand zum Körper und vor allem die Vielzahl der Quellen können zu erhöhten Expositionen führen.

Tabelle 4.2  
Quellenhochfrequenter elektromagnetischer Felder

Frequenz	Quellen	Merkmale der Exposition
<b>Natürliche Felder</b>		
30 kHz bis 300 GHz	Strahlung der Sonne	Geringe Intensität
30 kHz bis 300 GHz	Wärmestrahlung der Erde	Geringe Intensität
30 kHz bis 300 GHz	Wärmestrahlung von Organismen	Geringe Intensität
<b>Technogene Felder</b>		
148,5 bis 255 kHz	Radiosender, Langwelle	Wenig sehr starke Sender Hohe großflächige Dauerexpositionen der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
526,5 kHz bis 1,61 MHz	Radiosender, Mittelwelle	Wenig sehr starke Sender Hohe großflächige Dauerexpositionen der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
3,4 bis 26 MHz	Radiosender, Kurzwelle	Wenig sehr starke Sender Hohe großflächige Dauerexpositionen der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
13 bis 41 MHz	Hochfrequenzschweißgeräte in der Industrie	Sehr hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich
27 MHz	Geräte für Kurzwellen - Diathermie	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Hohe Kurzzeitexpositionen der Patienten
42 MHz	Magnetresonanztomographie	Mittlere bis hohe Expositionen an Arbeitsplätzen möglich Hohe Kurzzeitexpositionen der Patienten
47 bis 68 MHz	Fernsehsender, Band I	Hohe großflächige Dauerexpositionen der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
bis 100 MHz	Induktionsöfen in der Industrie	Sehr hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich
87,5 bis 108 MHz	Radiosender, Ultrakurzwelle	Hohe großflächige Dauerexpositionen der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
200 kHz bis 162 MHz	See- und Binnenwasserfunk	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Mittlere Dauerexpositionen der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich

Tabelle 4.2  
Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder (Fortsetzung)

Frequenz	Quellen	Merkmale der Exposition
<b>Technogene Felder</b>		
174 bis 223 MHz	Fernsehsender, Band III (VHF)	Hohe großflächige Dauerexposition in der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
34 bis 470 MHz	Behördenfunk, Betriebsfunk, (mehrere Frequenzfenster)	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Mittlere Dauerexposition in der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
434 MHz	Dezimeterwellen-Diathermie	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Hohe Kurzzeitexposition der Patienten
467 bis 468 MHz	Zugfunk	Mittlere Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich
470 bis 790 MHz	Fernsehsender, Band IV/V (UHF)	Hohe großflächige Dauerexposition in der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
864 bis 887 MHz	Schnurlose Telefone CT2, CT1+	Mittlere Kurzzeitexposition
380 bis 920 MHz	Bündelfunk TETRA	Mittlere Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich
890 bis 960 MHz	GSM-Mobilfunk D - Netze	Hohe Kurzzeitexposition beim Telefonieren Niedrige bis mittlere Dauerexposition in der Bevölkerung Umgebung von Basisstationen
955 bis 974 MHz	GSM-R-Mobilfunk (DB)	Hohe Kurzzeitexposition beim Telefonieren Niedrige bis mittlere Dauerexposition in der Bevölkerung Umgebung von Basisstationen
1,25 bis 1,35 GHz	Radar, Luftraumüberwachung	Hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich Mittlere bis hohe Dauerexposition in der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
200 kHz bis 1,8 GHz	Flugfunk (mehrere Frequenzfenster)	Niedrige bis mittlere Dauerexposition in der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
1,71 bis 1,88 GHz	GSM-Mobilfunk E - Netze	Hohe Kurzzeitexposition beim Telefonieren Niedrige bis mittlere Dauerexposition in der Bevölkerung Umgebung von Basisstationen
1,88 bis 1,90 GHz	Schnurlose Telefone (DECT)	Mittlere Dauerexposition in der Umgebung der Basisstationen möglich
1,92 bis 2,17 GHz	Mobilfunk UMTS	Hohe Kurzzeitexposition beim Telefonieren Niedrige bis mittlere Dauerexposition in der Bevölkerung Umgebung von Basisstationen
3,5 bis 1300 MHz	Amateurfunk (mehrere Frequenzfenster)	Höhere Expositionen in der Senderumgebung möglich
2,45 GHz	Mikrowellenkochgeräte	Hohe Expositionen durch die Leckstrahlung bei defekten Dichtungen möglich
2,45 GHz	Mikrowellenenergie in Industrie, Landwirtschaft und Gesundheitswesen	Sehr hohe Expositionen an Arbeitsplätzen möglich
2,45 GHz	Mikrowellen-Diathermie	Mittlere bis hohe Dauerexpositionen an Arbeitsplätzen möglich Hohe Kurzzeitexposition der Patienten
2,45 GHz	Bluetooth	Niedrige Dauerexpositionen möglich
2,40 bis 2,48 GHz	Wireless LAN	Mittlere Dauerexpositionen möglich
2,81 bis 2,89 GHz	Radar, Flughafen, zivil	Hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich Mittlere bis hohe Dauerexposition in der Bevölkerung in der Senderumgebung möglich
bis 4 GHz	Computer (Taktfrequenz)	Mittlere Dauerexpositionen möglich
5,15 bis 5,73 GHz	Wireless LAN, Hiperlan	Mittlere Dauerexpositionen möglich

Tabelle 4.2

Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder (Fortsetzung)

Frequenz	Quellen	Merkmale der Exposition
<b>Technogene Felder</b>		
3,02 bis 9,44 GHz	Radar, Schiffe (mehrere Frequenzfenster)	Hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich Mittlere bis hohe Dauerexposition der Bevölkerung entlang von Wasserstraßen und in der Umgebung von Häfen möglich
35 kHz bis 10 GHz	Diebstahlsicherungsanlagen (mehrere Frequenzfenster)	Hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich Hohe Kurzzeitexpositionen beim Passieren der Anlagen möglich
1 bis 12 GHz	Radar, Militär (mehrere Frequenzfenster)	Sehr hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich
8,83 bis 35,2 GHz	Radar, Wasserstraßenüberwachung	hohe Exposition im Hauptstrahl möglich Mittlere bis hohe Dauerexposition der Bevölkerung in Senderumgebung
4 bis 30 GHz	Satellitenfunk	Niedrige Expositionen
0,4 bis 40 GHz	Richtfunk (oberhalb 15 GHz nur für kurze Distanzen)	Niedrige Expositionen
9 kHz bis 246 GHz	industrielle, medizinische und wissenschaftliche Anwendungen (mehrere Frequenzfenster)	Sehr hohe Dauerexposition an Arbeitsplätzen möglich

## 4.2 Natürliche Quellen

### Erdmagnetfeld

Der äußere Erdkern, der aus über 5.000 °C heißen, flüssigen Eisenlegierungen besteht, wirkt wie ein riesiger Dynamo und erzeugt ein statisches Magnetfeld, das Erdmagnetfeld. In der Umgebung der magnetischen Pole, die in der Nähe der geographischen Pole liegen, erreicht dieses Feld eine Stärke von 62  $\mu\text{T}$ , in mittleren Breiten sind es rund 50  $\mu\text{T}$  und am Äquator 31  $\mu\text{T}$ .



Polarlichter entstehen vor allem im Bereich der Polarkreise, wenn elektrisch geladene Teilchen aus dem Sonnenwind durch das Erdmagnetfeld in die Erdatmosphäre gelenkt werden.

Eisenhaltige Gesteine im Untergrund können zu starken lokalen Anomalien des Erdmagnetfeldes führen. Außerdem schwankt das Erdmagnetfeld aufgrund des Einflusses des Sonnenwindes tageszeitlich. Während so genannter geomagnetischer Stürme, die durch den Sonnenwind ausgelöst werden, sind Schwankungen um bis zu 2  $\mu\text{T}$  möglich. Während solcher Stürme treten vor allem in der Zone zwischen 60 und 70 Grad nördlicher und südlicher Breite Polarlichter auf. Bei starken Sonnenstürmen sind Polarlichter gelegentlich auch in Mitteleuropa zu beobachten.

### Elektrisches Schönwetterfeld

Hochenergetische kosmische Strahlung sowie ultraviolette und Röntgen-Strahlung von der Sonne erzeugen in den Schichten der Erdatmosphäre oberhalb von 80 km Höhe geladene Teilchen (Ionen) und die aus mehreren Schichten bestehende Ionosphäre. Zwischen der Ionosphäre und der Erdoberfläche besteht eine elektrische Spannung von bis zu 300.000 Volt, weil die zu jeder Zeit weltweit stattfindenden 1.000 bis 2.000 Gewitter dazu führen, dass die Ionosphäre gegenüber der Erdoberfläche positiv aufgeladen wird. Die elektrische Spannung zwischen Ionosphäre und Erdoberfläche ist die Ursache für ein statisches elektrisches Feld, das so genannte Schönwetterfeld der Erde, das am Erdboden zu einer elektrischen Feldstärke von rund 130 V/m führt. Im Winter kann die Feldstärke auf mehr als das Doppelte ansteigen. In polnahen Gebieten sind während Sonnenstürmen Feldstärken von bis zu 10.000 V/m

möglich. Die Variationen der Feldstärke können im Laufe eines Tages mehr als 40 Prozent betragen. Auch das Wetter beeinflusst die Stärke des Schönwetterfeldes.

## Gewitter

Unter Gewitterwolken können elektrostatische Felder mit Feldstärken von mehr als 20.000 V/m auftreten. Die Ursache dieser Felder sind Verschiebungen elektrischer Ladungen innerhalb der Gewitterwolken. Deshalb entstehen nicht nur zwischen Erde und Gewitterwolken, sondern auch innerhalb von Wolken und zwischen Wolken elektrische Felder. Wenn die elektrische Feldstärke zu hoch wird und die Durchschlagsfestigkeit der Luft übersteigt, das ist bei rund 1.000.000 V/m der Fall, kommt es zwischen den verschieden geladenen Zonen zu einer Entladung: Ein Blitz entsteht. In mittleren Breiten überwiegen so genannte Erdblitze, also Entladungen zwischen Gewitterwolken und Erdboden. In den Tropen treten dagegen sehr viel häufiger Wolkenblitze in einer Wolke oder zwischen verschiedenen Wolken auf, weil die Wolkengrenze in den Tropen höher liegt, so dass es wahrscheinlicher ist, dass sich in oder zwischen den Wolken die notwendige Feldstärke aufbaut.

## Atmosphärische Wechselfelder (Atmosferics)

Blitze erzeugen elektromagnetische Wellen, so genannte Atmosferics oder Sferics, unterschiedlicher Frequenzen, die sich vom Blitzort ausbreiten. Dabei werden sie in der Atmosphäre, abhängig von ihrer Frequenz, unterschiedlich



BlitzentstehenaufgrundstarkererlektrischerFelderinnerhalb vonGewitterwolkenoderzwischenGewitterwolkenundErdoberfläche.

stark geschwächt. Zugleich werden sie zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre hin und her reflektiert. Wellen mit bestimmten Frequenzen im Bereich zwischen 5 und 40 Hz kommen nach einem Umlauf um die Erde wieder in dem selben Schwingungszustand an ihrem Entstehungsort an, mit dem sie gestartet sind. Diese Wellen werden aufgrund ihrer passenden Frequenz verstärkt. Wellen mit benachbarten, nicht passenden Frequenzen löschen sich dagegen aus. Die sich verstärkenden Schwingungen werden Schumann-Resonanzen genannt. Ihre Frequenzen liegen bei 8, 14, 20, 26 und 32 Hz. Die Intensität der Sferics hängt von der Stärke der Gewitteraktivität ab und schwankt deshalb tages- und jahreszeitlich. Aufziehende Warm- oder Kaltfronten führen zu charakteristischen Veränderungen der Sferics-Aktivitäten.

## Temperaturstrahlung

Jeder Körper, der eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt hat, gibt elektromagnetische Strahlung ab. Von der Temperatur des Körpers hängt es ab, bei welchen Frequenzen diese Abstrahlung hauptsächlich erfolgt. Auch die Erde sendet elektromagnetische Felder aus. Bei der mittleren Temperatur der Erde von 15 °C liegt das Maximum der Abstrahlung im Infrarot-Bereich. Aber es werden auch niedrigere und höhere Frequenzen abgestrahlt. Nimmt man den ganzen Hochfrequenzbereich zusammen, so trägt dieser mit 0,0006 bis 0,0008 W/m<sup>2</sup> zur elektromagnetischen Hintergrundstrahlung bei. Die Beiträge von technischen Quellen, wie Radio- und Fernsehsender, Mobilfunk- und Radaranlagen, liegen in der Regel weit darüber.

## Menschen und Tiere in natürlichen Feldern

Die natürlichen elektromagnetischen Felder auf der Erde haben in vielfältiger Weise Einfluss auf das pflanzliche und tierische Leben. Viele Vögel nutzen z.B. neben der Sonne und den Sternen das Erdmagnetfeld zur Orientierung. Auch bei Säugetieren, wie Pferden und Walen, wurde festgestellt, dass Magnetfelder ihr Orientierungsvermögen beeinflussen. Bei anderen Tieren, z.B. Austern und Schnecken, wurde eine Synchronisation der Tagesrhythmen durch die regelmäßigen Schwankungen der Stärke des Erdmagnetfeldes nachgewiesen. Versuche am Menschen deuten darauf hin, dass auch bei ihm bestimmte physiologische und psychologische Parameter durch die Schwankungen des Erdmagnetfeldes gesteuert werden. Viele Tiere reagieren auf geomagnetische Störungen in Zeiten starker



Zugvögel nutzen bei ihren Wanderungen auch das Erdmagnetfeld zur Orientierung .

Sonnenstürme. Etlichen Untersuchungen zufolge haben Veränderungen des elektrischen Schönwetterfeldes und/oder der Intensität der Atmosferics bei Wetteränderungen Auswirkungen auf verschiedene physiologische Funktionen und das menschliche Wohlbefinden.

### 4.3 Stromversorgungsanlagen

#### Verbundnetz

Die elektrischen Versorgungsnetze sind neben elektrischen Maschinen und Geräten die Hauptquelle niederfrequenter elektrischer und magnetischer 50 Hz-Felder. Elektrische Versorgungsnetze bestehen aus drei Hauptkomponenten: den Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie, den Leitungen und Anlagen zur Übertragung von elektrischem Strom und den Leitungen und Anlagen zur Verteilung an die Verbraucher. Die erste Komponente soll hier nicht weiter betrachtet werden, da elektrische und magnetische Felder im Bereich der elektrischen Energieerzeugung in der Regel nur unter Arbeitsschutzgesichtspunkten von Bedeutung sind. Die Belastungen auf der Verbrauchsseite durch elektrische Leitungen sowie durch elektrische Maschinen und Geräte in Wohnungen wird an anderer Stelle diskutiert (s. Kapitel 4.4).

Die Standorte von Kraftwerken richten sich zum einen nach den Lastschwerpunkten, zum anderen aber auch nach dem Primärenergieangebot. Letzteres gilt insbesondere für Braunkohle-, Wasser- und Windkraftwerke. Oft ist

auch der Zugang zu anderen Betriebsmitteln (z.B. Kühlwasser) ausschlaggebend. Für den Transport der elektrischen Energie zwischen den Kraftwerksstandorten und den Bedarfsschwerpunkten sind elektrische Leitungen notwendig. Von den Standorten großer Kraftwerke wird die elektrische Energie überwiegend durch die 400 kV-Leitungen der Höchstspannungsebene transportiert. Es gibt auch noch einige ältere 220 kV-Leitungen. Die Zusammenschaltung der Übertragungsleitungen zu einem Verbundsystem dient dem Ausgleich von Angebot und Nachfrage und ist Voraussetzung einer gesicherten Versorgung mit elektrischer Energie auch im Falle erhöhten regionalen Bedarfs oder von Störungen an einzelnen Kraftwerken oder Übertragungsleitungen.

Kleinere Kraftwerke werden über 110 kV-Hochspannungsleitungen, seltener durch 60 kV-Leitungen an das Verbundnetz angeschlossen. Leitungen dieser Spannungsebene dienen auf der Verbrauchsseite außerdem dem Anschluss von großen Ortschaften und Industriebetrieben.

Die Leitungen der Mittelspannungsnetze mit Nennspannungen von zumeist 10 oder 20 kV, gelegentlich auch 30 oder 6 kV, können Energie aus mittleren Blockheizkraftwerken und Windkraftanlagen aufnehmen. Die Mittelspannungsnetze dienen auch der Regionalverteilung von elektrischer Energie. Aus ihnen werden Siedlungen, Ortsteile von größeren Gemeinden und größere Abnehmer in Industrie, Handel und Gewerbe sowie in der Landwirtschaft versorgt.

Die örtliche Verteilung elektrischer Energie erfolgt durch Niederspannungsnetze. Sie versorgen die Verbrauchergruppen Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft. Die üblichen Spannungen sind 240 und 400 V. Die Niederspannungsnetze können nur in begrenztem Umfang Energie aus Erzeugungsanlagen (kleine Wasserkraftwerke, kleine Windkraftanlagen) aufnehmen.

Die Leitungen der verschiedenen Spannungsebenen dienen der Übertragung elektrischer Leistung. Die Leistung ist das Produkt von Strom und Spannung. Eine bestimmte Leistung kann sowohl durch eine hohe Spannung in Verbindung mit einem kleinen Strom, als auch durch eine kleine Spannung und einen großen Strom übertragen werden. Da die elektrischen (ohmschen) Verluste bei der Übertragung durch Leitungen möglichst gering sein sollen, sie aber mit wachsendem Strom steigen, erfolgt die Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen durch hohe Span-

nungen (Hochspannung) und relativ kleine Ströme. Für den Betrieb von Maschinen und Geräten sind hohe Spannungen jedoch ungeeignet, deshalb muss die Spannung, bevor die elektrische Energie Verbrauchern zugeführt wird, wieder herabgesetzt werden. Dies geschieht durch die Transformatoren in Umspannwerken oder Transformatorstationen, durch die verschiedenen Spannungsebenen der Übertragungsnetze verknüpft sind.

Bezogen auf die betroffene Fläche stellen die elektrischen Leitungssysteme die Hauptexpositionsquellen dar, wobei es erhebliche Unterschiede zwischen Freileitungen und Erdkabeln gibt. Die Felder, die von Umspannwerken und Transformatorstationen ausgehen, führen lediglich in räumlich eng begrenzten Bereichen zu erhöhten Expositionen.



Oft werden auf einer Trasse Stromversorgungsleitungen verschiedener Spannungsebenen geführt.

Die Leitungen der öffentlichen Stromversorgung bestehen auf den Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsebenen generell und auf der Niederspannungsebene bei den Hausanschlussleitungen überwiegend aus drei Leitungen (Phasen). Wäre es möglich, die drei Phasenleitungen ohne Abstand in einer Leitung zusammenzufassen, und wären Ströme und Spannungen auf den drei Phasenleitungen exakt gleich groß (Phasenbalance), so würden sich die von den einzelnen Phasenleitungen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder gegenseitig kompensieren. Unter realen Bedingungen ist dies allenfalls näherungsweise zu erreichen, da eine elektrische Isolation zwischen den Pha-

senleitern notwendig ist und diese gewisse Mindestabstände erfordert. Im Falle von Erdkabeln können die Abstände mit geeigneten Isolationsmaterialien sehr gering gehalten werden. Bei elektrischen Freileitungen, wo Luft das isolierende Medium darstellt, sind dagegen große Abstände erforderlich, die durch die Durchschlagsfestigkeit der Luft bei den jeweiligen Spannungen vorgegeben sind. Aufgrund der großen Abstände zwischen den Leiterseilen ist die Kompensationswirkung auch bei Phasenbalance gering. Bei Erdkabeln führt der geringe Abstand der Phasenleiter dagegen zu einer guten Kompensation der Magnetfelder (s. Abbildung 4.1). Deren Reichweite ist daher sehr viel geringer als bei entsprechenden Freileitungen.

## Höchst- und Hochspannungsleitungen

Die Leitungen der Spannungsebenen 110 bis 400 kV sind in Deutschland überwiegend als Freileitungen auf Stahlgerüstmasten ausgeführt. Lediglich auf der 110 kV-Ebene gibt es einen nennenswerten Anteil an Erdkabel vor allem in Belastungsschwerpunkten, z.B. Stadtgebieten mit enger Bebauung und hoher Lastdichte. Die Gründe für den geringen Anteil von Erdkabeln liegen zum einen in den - zumindest auf der Höchstspannungsebene - deutlich höheren Kosten für Erdkabel im Vergleich zu denen für Freileitungen. Zum anderen gibt es physikalische und betriebliche Gründe: Die Übertragungsfähigkeit von Kabeln ist für hohe Spannungen stark vermindert und der Aufwand beim Auffinden und Reparieren von Defekten ist höher als bei Freileitungen. Dafür bieten Erdkabel einen besseren Schutz vor Witterungseinflüssen (Sturm, Schnee/Eis), ihre Felder haben eine geringere Reichweite und sie beeinträchtigen das Landschaftsbild nicht.

Die Stärke der von elektrischen Freileitungssystemen ausgehenden elektrischen Felder hängt zunächst von der Spannungsebene ab, wird aber auch von weiteren Faktoren beeinflusst, die insbesondere die räumliche Verteilung und damit die Reichweite der Felder bestimmen. Auch die Stärke der magnetischen Felder ist nicht allein eine Funktion der Stromstärke, sondern hängt ebenfalls von weiteren Parametern ab. Hierzu gehören:

**Masthöhe, Masttyp:** Zwischen den Leiterseilen und zwischen diesen und dem Erdboden, Gebäuden, Verkehrsweegen usw. sind aus Gründen der elektrischen Sicherheit bestimmte Mindestabstände einzuhalten. Diese Mindestabstände müssen bei der Festlegung der Masthöhe und der

Aufhängung der Leiterseile berücksichtigt werden. Die Auswahl der Masttypen folgte in der Vergangenheit vielfach regionalen 'Traditionen'. Besondere Anforderungen werden an Masten mit Sonderfunktionen gestellt, z.B. bei Winkeltrag- und Winkelmasten, Abspann- und Winkelabspannmasten, Endmasten, sowie im Zusammenhang mit der Parallelführung von Leitungen auf getrenntem oder gemeinsamem Gestänge und mit Leitungskreuzungen.

**Anzahl der aufgelegten Systeme:** Oft werden Leitungen verschiedener Systeme, auch unterschiedlicher Spannungsebenen, gemeinsam auf einem Gestänge geführt, wobei das System mit der niedrigsten Spannung in der geringsten Höhe aufgehängt wird.

**Phasenfolge in den einzelnen Systemen:** Die drei Phasenleitungen eines Systems können in unterschiedlicher Folge angeordnet werden, was Auswirkungen auf die Feldverteilung hat.

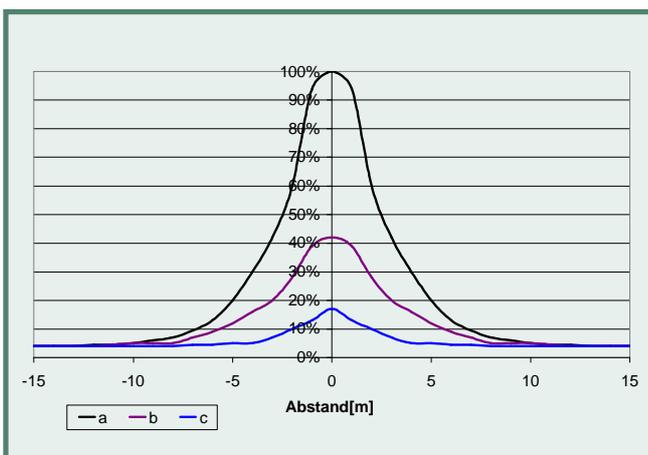


Abbildung 4.1  
 Kompensationswirkung bei einer dreiphasigen Stromleitung für verschiedene Anordnungen der Leiter  
 a) Einebenen Anordnung mit 40 cm Leiterabstand  
 b) Einebenen Anordnung mit 16 cm Leiterabstand  
 c) Dreiecksanordnung

**Phasensymmetrie:** Durch nichtlinear wirkende Netzkomponenten, Geräte und Maschinen kann es zu Verschiebungen in der Phasenlage der Ströme kommen.

**Durchhang der Leiterseile:** Der Durchhang der Leiterseile ist zum einen konstruktionsbedingt (Mastabstand, Material der Leiterseile usw.), zum anderen hängt er von

der Temperatur der Leiterseile ab. Wenn diese witterungsbedingt und/oder aufgrund hoher Stromlast hoch ist, ist der Durchhang größer als bei niedrigen Temperaturen.

**Erdseilbelegung:** Erd- und Blitzschutzseile werden oberhalb der Leitungssysteme geführt. Sie beeinflussen die Feldverteilung.

**Stromsymmetrie:** Im Gegensatz zur Spannung, die von Seiten der Netzbetreiber relativ leicht kontrolliert werden kann, ist die Kontrolle des Stromes und seiner symmetrischen Verteilung auf die Phasen nur mit erheblichem Aufwand möglich, da er durch die aktuelle Nachfrage nach elektrischer Energie zu jeder gegebenen Zeit bestimmt wird. Insbesondere auf den Nieder- und Mittelspannungsleitungen sind große Asymmetrien der Stromverteilung auf die Phasen möglich.

**Ausschwingwinkel der Leiterseile:** Bei starkem Wind können die Leiterseile in Schwingung geraten.

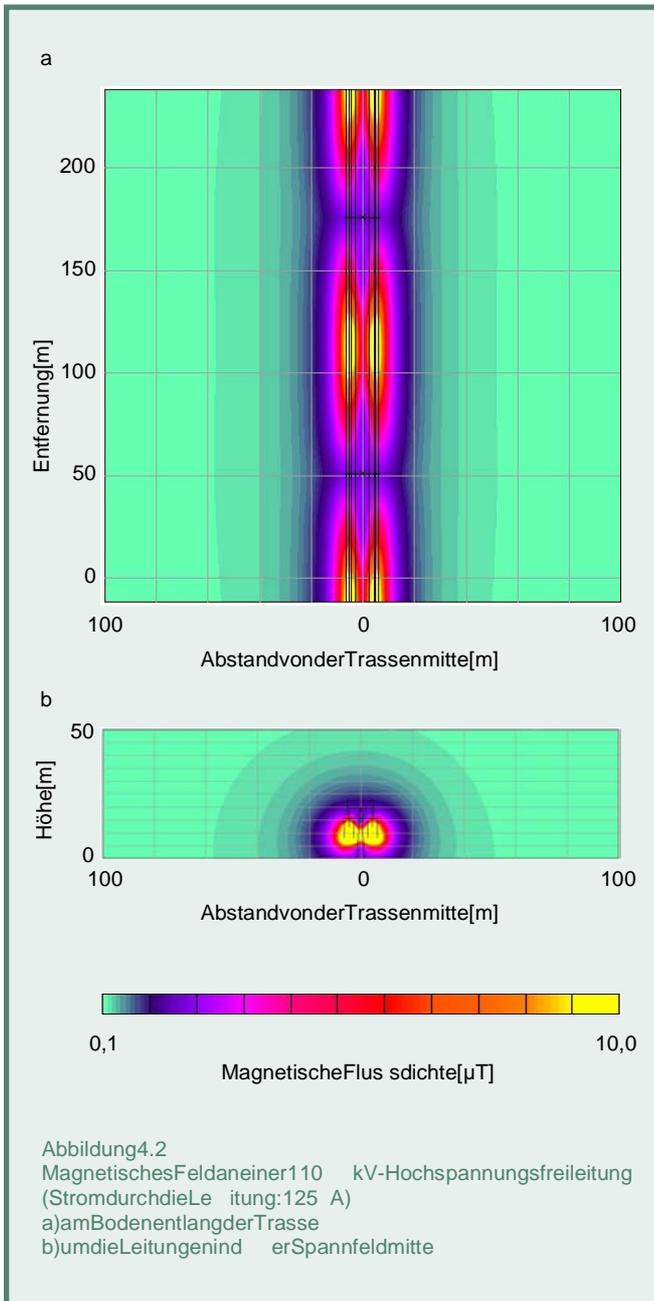
Die Immissionen an einem Ort hängen schließlich nicht zuletzt davon ab, wie groß sein Abstand von den Leiterseilen (horizontal und vertikal) ist und ob er sich dichter an einem Mast oder am Ort des größten Durchhangs der Leiterseile befindet.

In Abbildungen 4.2 sind beispielhaft für eine 110 kV-Hochspannungsfreileitung Verteilungen des magnetischen Feldes in der Umgebung dargestellt. Die berechneten Feldverteilungen dienen hier lediglich der Illustration. Im Fall einer konkreten Leitung müssen die räumlichen Verteilungen der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte anhand der technischen Parameter dieser Leitung berechnet werden.

## Mittelspannungsleitungen

Auf der Mittelspannungsebene beträgt der Verkabelungsgrad in Deutschland über 80 Prozent. Als Abspannstützpunkte für Freileitungen kommen Stahlgitter-, Beton- oder Holzmasten zum Einsatz.

Auf den Leitungen der Mittelspannungsebene sind die Amplitudenasymmetrien durch unterschiedliche Lasten auf den einzelnen Phasen zwar oft größer als auf den Leitungen der höheren Spannungsebenen, doch sind sie in der Regel immer noch relativ gering.



## Niederspannungsleitungen

In Ballungsgebieten sind die Anschlussleitungen der Niederspannungsebene überwiegend als Erdkabel ausgeführt. In ländlichen Gebieten werden diese Leitungen zum Teil noch über Masten oder Dachständer geführt. Insbesondere Leitungen auf Dachständern können in den Obergeschossen der Gebäude zu relativ starken Magnetfeldern führen.

Der Hausanschluss bzw. der Sicherungskasten, von dem die Leitungen innerhalb des Gebäudes abgehen, liegt bei

Erdkabelanschlüssen in der Regel im Keller oder im Erdgeschoss. Bei Anschlüssen über Freileitungen (Masten, Dachständer) zumeist in den oberen Stockwerken. In Gebäuden für Wohn- und Gewerbezwecke treten, abgesehen von den Bereichen in unmittelbarer Nähe zu einzelnen Geräten und Maschinen, die stärksten magnetischen Felder in der Umgebung des Hausanschlusses und der zu- bzw. abführenden Leitungen auf.

Auf den Anschlussleitungen der Niederspannungsebene können große Amplitudenasymmetrien auftreten.

## Umspannwerke und Transformatorstationen

Transformatoren dienen dazu, elektrische Leistung von einer Spannungsebene auf die andere zu übertragen. Die Transformatoren zur Übertragung der Leistung von der Mittel- auf die Niederspannungsebene befinden sich in der Regel in dem zu versorgenden Gebiet, um Leistungsverluste durch lange Niederspannungsleitungen zu vermeiden. Sie sind entweder in eigenen Gebäuden, Beton- oder Stahlcontainern untergebracht oder sind in Gebäude eingebaut, die Gewerbe- oder (seltener) Wohnzwecken dienen.

Die zu übertragende Leistung ist durch das Produkt aus Strom und Spannung gegeben. Bei der Transformation bleibt diese Leistung (bis auf geringe Verluste) erhalten. Wenn sich die Spannung ändert, muss sich also auch der Strom entsprechend ändern, damit das Produkt konstant ist. An jedem Transformator gibt es eine Hochspannungs-/Niederstrom- und eine Nieder- bzw. Unterspannungs-/Hochstrom-Seite (die Bezeichnungen sind hier nur relativ zu verstehen). Da die Stärke des Magnetfeldes einer Stromleitung proportional zur Stärke des fließenden Stroms ist, muss auf der Hochstrom-Seite mit starken Magnetfeldern gerechnet werden. Die elektrischen Felder sind naturgemäß auf der Hochspannungsseite stärker. Bei Transformatoren, die in Kessel oder Zellen aus elektrisch leitfähigem Material eingeschlossen sind, wirken diese als Faradaysche Käfige und schirmen das elektrische Feld fast vollständig ab.

Im Hinblick auf die Verminderung der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch magnetische Felder verdienen Transformatorstationen, die in Gebäude integriert sind, in denen sich auf Dauer Menschen aufhalten, besondere Beachtung. Hierzu gehören Wohnhäuser, öffentliche Gebäude (Schulen, Kindertagesstätten usw.) sowie gewerblich ge-

nutzte Gebäude, wenn sich die Transformatoren in der Nähe von Räumen mit Dauerarbeitsplätzen befinden. In Einzelfällen haben sich auch Transformatorstationen, die zwar in eigenen Gebäuden, aber in unmittelbarer Nähe von Gebäuden mit empfindlichen Nutzungen untergebracht sind, als problematisch erwiesen. Dabei können entweder die Transformatoren selbst, die Ableitungen oder die Sammelschienen die Hauptemittenden sein.

Die Stärke des durch den Strom auf der Niederspannungsseite erzeugten Magnetfeldes ist proportional zum Strom, die räumliche Verteilung hängt aber zusätzlich von der Transformatorgeometrie und der Leitungsführung in der Umgebung des Transformators ab. Mit zunehmendem Abstand von der Transformatoranlage nehmen die direkt



In Umspannwerken erfolgt die Transformation von der Höchstspannungsebene des überregionalen Stromverbundes auf die Mittelspannung für die regionale Verteilung elektrischer Energie.

durch den Transformator erzeugten Magnetfelder in der Regel schnell ab. Die von den Sammel- und Verteilerschienen ausgehenden und nur langsam abnehmenden Felder sind daher oft stärker.

Transformatoren, die mit Leistungen an der oberen Grenze ihres Auslegungsbereichs betrieben werden, können wegen der Nichtlinearität der Magnetisierung hohe Oberwellenanteile auf den Leitungen (und damit höherfrequente Magnetfelder) erzeugen. Elektromagnetische Felder mit Frequenzen bis in den MHz-Bereich können bei Teilentladungsvorgängen (Glimmen) im und am Transformator entstehen. Verteilungstransformatoren sind bei Betriebs-

spannung aber meist teilentladungsfrei, so dass hochfrequente elektromagnetische Felder bei Transformatoren nur untergeordnete Bedeutung haben.

Eine systematische Übersicht über die Magnetfeldbelastungen in der Umgebung von Transformatoranlagen liegt bisher nicht vor. Es gibt allenfalls vereinzelte Daten bei einigen Stromversorgungsunternehmen und Herstellern von Transformatoren. Da schon im Versorgungsbereich eines einzelnen Stromversorgers in der Regel viele verschiedene Transformatortypen mit unterschiedlichen Leiteranordnungen im Einsatz sind, reichen die vorliegenden Daten nicht aus, um generelle Aussagen zur Belastungssituation in der Umgebung von Transformatorstationen zu machen.

Die Übertragung elektrischer Leistung zwischen den verschiedenen Spannungsgruppen der Höchst- und Hochspannungs- sowie der Mittelspannungsebene erfolgt in Umspannwerken. Diese befinden sich zumeist außerhalb oder am Rande von Ortschaften oder in Gewerbegebieten. Messungen elektrischer und magnetischer Felder in der Umgebung von Umspannwerken haben gezeigt, dass diese in der Regel nur im Bereich der zu- und abführenden Leitungen erhöht sind.

### Risiken durch die Felder von Stromversorgungsanlagen

Die Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen deuten auf eine Zunahme des Risikos für bestimmte Krebserkrankungen durch die niederfrequenten Magnetfelder von Stromversorgungsanlagen (s. Kapitel 2.2). Bei Kindern wurde in mehreren Studien eine Zunahme der Leukämierate für magnetische Flussdichten von mehr als  $0,3 \mu\text{T}$  festgestellt. Die Befunde aus einer großen Zahl experimenteller Untersuchungen stützen die Ergebnisse der epidemiologischen Untersuchungen. Niederfrequente Magnetfelder haben den experimentellen Untersuchungen zufolge wahrscheinlich keine auslösende aber eine fördernde Wirkung bei der Entwicklung von Krebserkrankungen.

Neben dem Krebsrisiko verdienen vor allem die Hinweise auf einen möglichen Einfluss niederfrequenter Magnetfelder auf die Entstehung von neurodegenerativen und psychischen Erkrankungen Beachtung und verstärkte wissenschaftliche Aufmerksamkeit. In Laboruntersuchungen an Tieren und Zellkulturen wurden zudem Hinweise gefunden, dass diese Felder gentoxisch wirken.



Hochspannungsfreileitungen können zu hohen magnetischen Dauereexpositionen führen.

Bisher konnte noch kein vollständiges Modell für die Wirkung schwacher, umweltrelevanter Magnetfelder im Niederfrequenzbereich auf den Organismus von der zellulären Ebene bis zu einer bestimmten Erkrankung formuliert werden.

Eine ausführlichere Darstellung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu den biologischen Wirkungen niederfrequenter Magnetfelder findet sich im Kapitel 2.2.

## Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch Stromversorgungsanlagen

Aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Befunde sollten die Expositionen der Bevölkerung durch niederfrequente Magnetfelder so gering wie möglich gehalten werden und aus Vorsorgegründen  $0,1 \mu\text{T}$  nicht überschreiten.

Die einfachsten und kostengünstigsten Maßnahmen zur Minderung der Belastungen durch elektrische und magnetische Felder von Stromversorgungs- und Bahnanlagen sind in der Regel planerische Maßnahmen, die auf die Einhaltung hinreichender Schutzabstände zwischen emittierenden Anlagen und empfindlichen Nutzungen, wie Wohnungen, Schulen und Kindergärten, sowohl bei der Anlagenplanung als auch bei der Ausweisung von Flächen für empfindliche Nutzungen in der Nähe bestehender Anlagen abzielen. Voraussetzung für die Festlegung von Schutzabständen sind Vorsorgegrenzwerte oder Planungsrichtwerte, die den Anforderungen eines vorsorgenden Gesundheitsschutzes gerecht werden (s. Kapitel 3.1).

Die Verpflichtung zur Einhaltung von Schutzabständen kann zu erheblichen Beschränkungen bei der Flächennutzung führen. Wo diese nicht vertretbar sind oder wenn es um die Minderung der Belastungen durch Altanlagen, z.B. in bestehenden Wohngebieten, geht, eine Verlegung der Anlage aber nicht in Frage kommt, können konstruktive und betriebliche Maßnahmen zur Minderung der Immissionen herangezogen werden. Bei elektrischen Übertragungsleitungen ist insbesondere der Ersatz von Freileitungen durch Erdkabel eine wirksame Maßnahme. Es gibt auch Möglichkeiten, die Felder bzw. ihre Reichweite durch die Optimierung der Leitungs-, System- und Phasenkonfigurationen von Freileitungen zu vermindern. Soweit Praxiserfahrungen vorliegen, zeigen sie, dass diese Maßnahmen zwar im Einzelfall sinnvoll sein können, dass der Minderungseffekt aber geringer ist als bei der Verkabelung - wenn die Größe der Fläche, auf der eine Minderung der elektrischen und magnetischen Felder erreicht wird, als Bewertungskriterium dient. Abschirmmaßnahmen durch Kompensationsseile können bei Freileitungen einen Beitrag vor allem zur Verminderung der elektrischen Felder leisten, ebenso wie immissionsseitige Abschirmungen durch Gebäude und Bepflanzungen.

Bei kompakten Quellen, wie z.B. Transformatorenstationen, kann durch Abschirmungen aus geeigneten Materialien (z.B. mehrere Schichten von Platten aus Aluminium und Transformatorenstahl) eine starke Schwächung auch der niederfrequenten Magnetfelder erreicht werden. Vor der Anbringung von Abschirmungen sollten allerdings alle Möglichkeiten genutzt werden, um die magnetischen Felder durch eine geeignete Leitungsführung insbesondere im Bereich der Sammelschienen zu vermindern, da diese Maßnahmen in der Regel weniger aufwändig sind. Die effektivste Maßnahme zur Verminderung der elektrischen und magnetischen Immissionen ist auch bei Transformatoranlagen die Einhaltung hinreichender Schutzabstände. Es sollte generell vermieden werden, Transformatoren in Gebäuden unterzubringen, in denen sich dauerhaft Menschen aufhalten. In Gebäuden, in denen sich bereits Transformatoren befinden, sollten die angrenzenden Räume nur als Lager oder für ähnliche Zwecke genutzt werden.

Anwohner von Freileitungen oder Transformatorenstationen haben kaum Möglichkeiten, die Belastung durch die von der Anlage ausgehenden Magnetfelder zu vermindern. Eine Abschirmung durch entsprechende Materialien ist

praktisch nicht zu realisieren. Eine aktive Kompensation der von außen kommenden Felder ist zwar im Prinzip möglich und die Machbarkeit wurde in einzelnen Modellprojekten gezeigt, aber der Aufwand ist sehr hoch. Um das betreffende Gebäude müssen nämlich Spulen so gelegt und der Strom durch die Spulen so gesteuert werden, dass das entstehende Magnetfeld dem von der Anlage ausgehenden Feld entgegengerichtet ist und es aufhebt. Das ist aber nur möglich, solange das von der Anlage ausgehende Magnetfeld räumlich einigermaßen homogen ist und zeitlich nicht zu stark schwankt.

Die Abschirmung der von elektrischen Versorgungsanlagen ausgehenden elektrischen Felder ist dagegen technisch relativ einfach machbar. Aber selbst bei Häusern, die in der Nähe von Hochspannungsleitungen stehen, sind zusätzlich Abschirmmaßnahmen zum Schutz vor elektrischen Feldern unnötig, weil die meisten gängigen Baumaterialien bereits eine stark abschirmende Wirkung haben. Auch Bäume und Büsche können elektrische Felder abschirmen. Wenn in Ausnahmefällen eine zusätzliche Abschirmung eines Innenraumes notwendig sein sollte, kann dies durch das Aufbringen von metallischen Folien, Metallnetzen oder speziell hierfür vorgesehenen elektrisch leitfähigen Tapeten auf die Wände erreicht werden. Allerdings müssen die Abschirmmaterialien fachgerecht geerdet werden und dürfen zur Erhaltung eines guten Wohnklimas den Wasserdampfaustausch zwischen Innenraum und Wänden nicht behindern. Der Erfolg von Abschirmmaßnahmen sollte immer durch Messungen überprüft werden.

## 4.4 Elektrische Installationen und Elektrogeräte in Wohnungen

### Elektrische Installationen

Die Versorgung von Häusern und Wohnungen mit elektrischer Energie erfolgt mit niedrigen Spannungen (240/400 V). Die Leitungen zu den Häusern sind meist als Kabel im Untergrund verlegt, werden aber auch über Masten oder Dachständer geführt. In der Umgebung von Hausanschluss und Sicherungskasten treten oft starke Magnetfelder auf, da hier alle elektrischen Ströme 'zusammenfließen'. Die Stärke der Magnetfelder um die elektrischen Leitungen innerhalb von Häusern und Wohnungen hängt davon ab, wie viele Stromverbraucher an diese Leitung angeschlossen sind und welche elektrische



Um die Hauptversorgungsleitung und den Stromzähler entstehen oft relativ stark magnetische Felder, da dort alle Ströme der Wohnung zusammenfließen.

Leistung diese aufnehmen. Auch die Bauart der Kabel hat einen Einfluss auf die Stärke und Reichweite der Magnetfelder: Bei gleicher Stromstärke sind die Felder um Unterputzflachkabel stärker als die um Rundkabel.

Kritisch sind vor allem Leitungen, die sich in der Nähe von Kinderzimmern, Schlafplätzen oder anderen Daueraufenthaltsbereichen in der Wohnung befinden und über die Geräte im Dauerbetrieb, wie Kühlschränke und Heizungen, versorgt werden.

Messungen in Wohnungen in Einfamilienhausgebieten ergaben Magnetische Flussdichten von 0,01 bis 0,03  $\mu\text{T}$ , wenn keine große Stromversorgungsanlage in der Nähe war, der Anschluss der Häuser an das Stromversorgungsnetz über Erdkabel erfolgte und alle Geräte im Haus selbst ausgeschaltet wurden. Die Quelle dieser Hintergrundfelder sind vor allem die Stromversorgungsleitungen in der Umgebung. In Mehrfamilienhäusern in dichter bebauten Gebieten sind die Hintergrundfelder in der Regel stärker, da die Leitungsdichte höher ist und weil mehr Elektrogeräte in Nachbarwohnungen zu den Immissionen beitragen. Die Messwerte erreichen hier nicht selten Werte von mehr als 0,05  $\mu\text{T}$ .

### Elektrogeräte

In vielen Haushalten sind mehr als zwei Dutzend Elektrogeräte täglich im Betrieb. Sie alle erzeugen elektrische Felder. Dazu reicht es, dass der Stecker in der Steckdose steckt. Werden sie angeschaltet und fließt ein Strom, ent-

stehen zusätzlich Magnetfelder. Deren Stärke und damit die Reichweite hängen zum einen von ihrem Stromverbrauch und zum anderen von der Bauart des jeweiligen Gerätes ab. Vergleichsmessungen an netzbetriebenen Radioweckern ergaben z.B., dass die Stärke des Magnetfeldes in 1 m Abstand bei einigen Geräten  $0,5 \mu\text{T}$ , bei anderen nur  $0,05 \mu\text{T}$  betrug. Starke Magnetfelder erzeugen insbesondere (s. Tabelle 4.3)

- Geräte, die Wärme erzeugen und daher einen hohen Stromverbrauch haben, wie Haarfön, Küchenherd oder Bügeleisen
- in der Hand gehaltene Geräte mit Motoren, wie Mixer, Bohrmaschine oder Rasierapparat, weil diese Geräte aus Gewichtsgründen leichte Motoren haben, die sehr starke Streufelder erzeugen
- Transformatoren z.B. für Niederspannungs-Halogenleuchten oder in Geräten, wie Radiowecker und Fernsehgerät
- unter der Zimmerdecke oder an Wänden gespannte Leitungen von Niederspannungs-Halogenleuchten.

Die Stärke von Magnetfeldern, die von Motoren, Magnetspulen und Transformatoren erzeugt werden, ist in geringem Abstand zum Gerät (einige Zentimeter) hoch, nimmt aber in der Regel schnell mit dem Abstand ab. Problematisch sind daher nur Geräte, die direkt am Körper betrieben werden, wie Rasierapparat und Haarfön.



Kleine Elektrogeräte verursachen im Betrieb oft sehr starke Magnetfelder.

Die Felder, die von den Leitungen von Niederspannungs-Halogenleuchten ausgehen, können dagegen eine große Reichweite haben. Je weiter der Abstand zwischen den Leitungen ist, umso weiter reichen die Felder. Alle Niederspannungs-Halogenleuchten erzeugen vergleichsweise starke Magnetfelder, da diese über einen Transformator mit einer niedrigen Spannung von 12 V aber vergleichsweise hohen elektrischen Strömen betrieben werden und die Stärke der Magnetfelder von der Stärke der Ströme abhängt.

Heimwerkergeräte verursachen oft sehr starke Magnetfelder, da hier zwei Dinge zusammenkommen: eine hohe Leistungsaufnahme, das heißt ein hoher Strom, und vergleichsweise leichte Motoren mit starken Streufeldern.

Besondere Beachtung verdienen Geräte und Installationen, deren Magnetfelder nicht nur stark sind, sondern denen Personen auch über lange Zeiten ausgesetzt sind, wie z.B. der bereits erwähnte Radiowecker am Bett, elektrische Fußboden-, Wand- und Nachtspeicherheizungen, Heizlüfter, Heizdecken und -kissen. Da die niederfrequenten Magnetfelder praktisch alle gängigen Baumaterialien durchdringen, kann eine Reduzierung der Belastungen nur durch einen hinreichenden Abstand erreicht werden.

## Mikrowellenherde

Im Mikrowellenherd wird die für solche Anwendungen freigegebene Frequenz von 2,45 GHz benutzt. Die Leistung häuslicher Mikrowellenherde liegt bei 300 bis 1.300 W. Der unerwünschte Austritt von Mikrowellenstrahlung aus dem Garraum soll durch metallische Dichtungen an den Türen und Metallnetze in den Scheiben sowie mehrfache Sicherheitsschalter verhindert werden. Messungen der Leckstrahlung von Mikrowellenherden durch das Bundesamt für Strahlenschutz haben gezeigt, dass die zulässigen Werte bei neuen und intakten Geräten in der Regel nicht überschritten werden. Bei älteren Geräten wurden in anderen Untersuchungen allerdings Werte bis  $170 \text{ W/m}^2$  gemessen. Oft sind verschmutzte Türdichtungen die Ursache einer erhöhten Leckstrahlung. Kleine Spalte, die aufgrund von Schmutz zwischen Korpus und Tür entstehen, wirken wie Schlitzantennen und erlauben den Austritt der Mikrowellenstrahlung. Wenn sich die Augen in der Nähe dieser Schlitze befinden, besteht ein gewisses Risiko für deren Schädigung aufgrund von Überhitzung (s. Kapitel 2.3). Deshalb gilt auch für die Mikrowelle: Abstand halten. Außerdem ist

Tabelle 4.3

Typische Stärken niederfrequenten magnetischen Felder von Elektrogeräten im Haushalt

Abstand	Magnetfeld [ $\mu\text{T}$ ]		
	3cm	30cm	1,0m
<b>Beleuchtung</b>			
Glühlampe 60 W		0,002	
Leuchtstofflampe		0,5 – 2,0	0,02 – 0,25
Energiesparlampe 15 W <sup>1</sup>		0,1	0,01
Niederspannungs-Halogenbeleuchtung <sup>2</sup>		bis 3,0	bis 0,3
<b>Heizung</b>			
Elektrische Fußbodenheizung		0,1 – 8,0	0,04 – 2,50
Nachtspeicherheizung (Ladevorgang)		3,0	0,3
Heizlüfter		0,2 – 20	0,05 – 3,00
<b>Wohnzimmer/Arbeitszimmer</b>			
Hifi-Anlage		0,04 – 3,0	0,02 – 0,30
Fernsehgerät		0,04 – 2,0	0,01 – 0,15
Radio (tragbar)	15 - 60	1,0	0,01
Computer/Bildschirm <sup>3</sup>		0,2 – 1,0	
<b>Küche/Haushaltsgeräte</b>			
Elektroherd		0,2 – 8,0	0,01 – 0,04
Mikrowellenkochgerät <sup>3</sup>		4,0 bis 8,0	0,25 – 0,60
Kaffeemaschine		0,1 – 0,2	0,01 – 0,02
Toaster		0,06 – 1,0	0,01 – 0,02
Kühlschrank		0,01 – 0,3	0,01 – 0,04
Geschirrspülmaschine		0,6 – 3,0	0,07 – 0,30
Dunstabzugshaube		0,5 – 2,0	0,05 – 0,20
Handmixer	60 - 700	0,6 – 10	0,02 – 0,25
Waschmaschine, Wäschetrockner		0,15 – 3,0	0,01 – 0,15
Staubsauger		2,0 – 20	0,15 – 2,00
Bügeleisen	8 – 30	0,12 – 0,3	0,01 – 0,03
<b>Schlafzimmer</b>			
Radiowecker		0,2 – 2,0	0,05 – 0,50
Heizdecke	bis 30		
<b>Badezimmer</b>			
Fön	6 - 2000	0,01 – 7,0	0,01 – 0,30
Elektrorasierer	15 - 5000	0,08 – 10	0,01 – 0,30

<sup>1</sup> mit elektronischem Vorschaltgerät<sup>2</sup> mit Zuleitungen, die unter der Decke montiert sind; die Stärke des Feldes hängt vom Abstand der Zuleitungen ab<sup>3</sup> es entstehen auch hochfrequente Felder

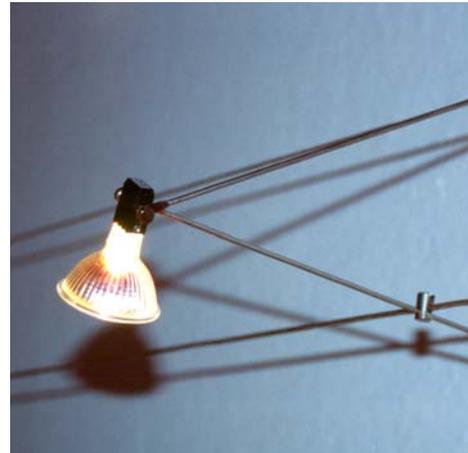
auf Sauberkeit insbesondere der Türdichtungen zu achten, und bei Geräten, die schon längere Zeit in Betrieb sind, sollte regelmäßig eine Überprüfung der Höhe der Leckstrahlung erfolgen.

Die Erwärmung von Speisen im Mikrowellenherd unterscheidet sich grundsätzlich von der klassischen Erwärmung. Während beim Kochen im Topf die Wärme überwiegend durch Wärmeleitung von der Kochplatte bzw. der Flamme über den Topf in das Gargut gelangt, wird im Mikrowellenherd der Effekt ausgenutzt, dass Mikrowellenstrahlung Wassermoleküle in Schwingung versetzen kann. Weil die Moleküle in ihre Umgebung eingebettet sind, erzeugt dieser Schwingungsvorgang Wärme. Lebensmittel, die keinerlei Wasser enthalten, können daher im Mikrowellenherd nicht erwärmt werden.

Hat ein Garstück bezüglich des Wassergehalts keine homogene Konsistenz, z.B. ein Bratenstück, das von Sehnen oder Fett durchzogen ist, kann dies zu einer ungleichmäßigen Erwärmung führen. Während stark wasserhaltige Partien richtig erwärmt werden, absorbieren fetthaltigere Bereiche wenig Mikrowellenstrahlung und bleiben relativ kühl. Bei fetthaltigem Fleisch kann es daher passieren, dass Salmonellen, Listerien und andere gesundheitsgefährdende Organismen im Mikrowellenherd nicht abgetötet werden. Um die Gefahr von Salmonellen- und Listerienvergiftungen zu reduzieren ist nämlich eine Erwärmung der Lebensmittel auf mehr als 70 °C für mehr als zehn Minuten erforderlich.

Die andere Art der Erwärmung im Mikrowellenherd hat zwar den positiven Effekt, dass einige hitzeempfindliche Vitamine weniger stark zerstört werden, die Mikrowellenbestrahlung führt aber in manchen Lebensmitteln zu spezifischen Veränderungen, die bei konventioneller Erwärmung nicht oder nicht so stark auftreten.

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass auch Mikrowellenbestrahlungen zu Vitamin- und Nährstoffverlusten führen, und dass die Werbesprüche von der "schonenden Nahrungszubereitung" im Mikrowellenherd allgemein sicher nicht richtig sind. Aus den vorliegenden Befunden kann aber nicht geschlossen werden, dass die mikrowellenzubereitete Nahrung schädlicher ist als konventionell Gekochtes, Gebackenes und Gebratenes. Auch bei den konventionellen Zubereitungsmethoden kommt es zur Zerstörung von Inhaltsstoffen und zur Bildung gesundheitsschäd-



Niederspannungshalogenlampen werden mit niedrigen Spannungen und vergleichsweise hohen Strömen betrieben. Letzteres kann zu vergleichsweise starken Magnetfeldern führen.

licher Verbindungen - man denke nur an ein scharf gebratenes Stück Fleisch und dessen Gehalt an kanzerogenen Stoffen.

## Funkschalter

Seit geraumer Zeit gibt es kabellose Funkschalter, die z.B. die Raumbeleuchtung durch ein Funksignal ein- und ausschalten. Sie ersetzen den konventionellen Stromschalter und machen so die Installation eines Stromkabels vom Schalter zum Verbraucher überflüssig. Die Energie für das Funksignal wird z.B. in einem piezoelektrischen Kristall erzeugt, der mechanischen Druck in elektrische Energie umwandelt. Die Reichweite eines Funkschalters mit einer Sendeleistung von 10 mW beträgt in Gebäuden ca. 30 m.

Das ECOLOG-Institut hat exemplarisch die Abstrahlungen eines solchen Schalters mit einer Sendefrequenz von 868,3 MHz untersucht. Die gemessene Leistungsdichte sinkt von maximal 150  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  direkt vor dem Schalter (10 cm Abstand) auf unter 1  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  bei mehr als vier Meter Abstand. Im von 50 cm zum Schalter, in dem sich normalerweise die Person befindet, die ihn betätigt, liegt sie bei etwa 20  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  und ab etwas mehr als 1 m Abstand unter 10  $\mu\text{W}/\text{m}^2$ . Damit ist die extrem kurzzeitige Exposition, die nur während des Schaltvorganges auftritt, für die Benutzer etwa um den Faktor 50 niedriger als die Empfehlung des ECOLOG-Instituts für die maximale Innenraum-Dauerbelastung von 1.000  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  (= 0,001  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Auch wenn diese 'Belastung' gering ist, wäre es - im Sinne einer Minimierung der Expositionen durch hochfrequente

Felder - nicht besser, sie durch die Benutzung von konventionellen Schaltern ganz zu vermeiden? Aber auch konventionelle Schalter erzeugen während des Schaltvorganges Hochfrequenzstrahlung (HF) in einem breiten Frequenzbereich von einigen Kilohertz bis in den Bereich des sichtbaren Lichts hinein. Die emittierte Intensität kann zwischen verschiedenen Schaltern und von Schaltvorgang zu Schaltvorgang sehr stark variieren. Das ECOLOG-Institut hat stichprobenhaft einige Schalter getestet. Im engen Fre-



Ältere Mikrowellenherde können eine erhöhte Leckstrahlung aufweisen.

quenzbereich des Funkschalters wurden dabei in einem Meter Abstand Leistungsflussdichten von bis zu  $0,5 \mu\text{W}/\text{m}^2$  gemessen. Dies ist deutlich niedriger als die Exposition durch den Funkschalter. Bei den Emissionen durch konventionelle Schalter ist aber zu beachten, dass diese sehr breitbandig erfolgen. Wenn die Beiträge aller Frequenzen berücksichtigt werden, ergibt sich für einen konventionellen Schalter in einem Meter Abstand eine Gesamtleistungsdichte von rund  $1.500 \mu\text{W}/\text{m}^2$ . Dies ist 100mal höher als der Wert für den Funkschalter. Wegen der extrem kurzzeitigen Exposition ist aber auch bei konventionellen Schaltern nicht mit Gesundheitsproblemen durch den Schaltimpuls zu rechnen.

### Babyfone

Viele Eltern benutzen aus Sorge um ihre Säuglinge oder Kleinkinder so genannte Babyfone, um die Kinder akustisch zu überwachen. Ein Mikrofon im Kinderzimmer nimmt die Laute des Kindes auf und das Sendegerät überträgt sie zu einem Empfänger mit Lautsprecher in einem anderen

Raum. Die Verbindung zwischen Sendegerät und Empfangsgerät erfolgt entweder über ein eigenes Kabel, das Hausstromnetz oder per Funk.

Funkbetriebene Babyfone strahlen Felder mit Frequenzen von 27,8 bzw. 40,7 MHz ab. Die Sendeleistung beträgt für die niedrigere Frequenz bis zu 100 mW, bei der höheren Frequenz werden maximal 10 mW abgestrahlt. Bei beiden Frequenzen beträgt die Reichweite maximal 400 m. Geräte, die dauernd auf Sendung sind, geben permanent Strahlung ab. Die von dauernd sendenden Babyfonen verursachten Expositionen sind in der Regel deutlich höher, als die von Geräten, die nur senden, wenn ein Geräusch vorhanden ist.

Wenn die Geräte, unabhängig davon ob die Übertragung per Funk oder Leitung erfolgt, nicht mit Batterien bzw. Akkus, sondern über das Hausstromnetz versorgt werden, entstehen in ihrer Umgebung niederfrequente Magnetfelder, die bei einzelnen Gerätetypen auch relativ stark sein können.

Da die Hersteller von Babyfonen keine Angaben zu den Expositionen machen, die ihre Geräte verursachen, sollten Eltern, die auf diese Geräte nicht verzichten wollen oder können, sie sicherheitshalber nicht dichter als 2 m zum Bett des Kindes aufstellen.

### Risiken durch die Felder von Installationen und Geräten im Haushalt

Die Felder, die von elektrischen Installationen und Geräten in der eigenen Wohnung ausgehen, sind oft stärker als die Felder externer Quellen, wie Stromversorgungs-, Bahn- oder Mobilfunkanlagen. Einige Quellen im Haushalt können zudem zu Dauerexpositionen führen. Diese sind besonders bedenklich, weil aufgrund der Ergebnisse epidemiologischer und experimenteller Untersuchungen der Verdacht besteht, dass Langzeitexpositionen das Risiko für bestimmte Krebserkrankungen erhöhen. Das gilt vor allem für niederfrequente Magnetfelder. Neben dem Krebsrisiko verdienen vor allem die Hinweise auf einen möglichen Einfluss niederfrequenter Magnetfelder auf die Entstehung von neurodegenerativen und psychischen Erkrankungen Beachtung und verstärkte wissenschaftliche Aufmerksamkeit. In Laboruntersuchungen an Tieren und Zellkulturen wurden zudem Hinweise gefunden, dass diese Felder gentoxisch wirken. Letzteres gilt auch für hochfrequente elektromag-

netische Felder, für die es zudem starke Hinweise gibt, dass sie Funktionen des Zentralen Nervensystems stören.

Eine ausführlichere Darstellung des wissenschaftlichen Erkenntnisstands zu den biologischen Wirkungen niederfrequenter Magnetfelder findet sich im Kapitel 2.2, die Wirkungen hochfrequenter Felder werden im Kapitel 2.3 diskutiert.

## Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch Installationen und Geräte im Haushalt

Die vorliegenden wissenschaftlichen Befunde stärken den Verdacht, dass niederfrequente Magnetfelder zu erheblichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können. Daher müssen alle Möglichkeiten genutzt werden, um die Expositionen so gering wie möglich zu halten. Dabei sind zunächst die Hersteller von elektrischen Geräten und Anlagen gefordert. Untersuchungen an Elektrogeräten zeigen, dass die Magnetfeldemissionen oft durch einfache Maßnahmen reduziert werden können (Einbau von Transformatoren und Motoren mit geringen Streufeldern, optimierte Kabelführungen, Ein-/Aus-Schalter nicht nur auf der Niederspannungs-, sondern auch auf der Hochspannungsseite von Transformatoren usw.). Auch bei der Planung und Ausführung elektrischer Installationen gibt es relativ einfache Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Verminderung magnetischer Felder (kurze Leitungswege, hinreichende Abstände von Leitungen mit Dauerstrom zu Schlaf- und Kinderzimmern, Rund- statt Flachkabel usw.). Die Normungsgremien und der Staat müssen durch entsprechende technische Normen und Vorschriften dafür sorgen, dass bei der Entwicklung und Planung von elektrischen Geräten und Installationen das Prinzip der Minimierung magnetischer Expositionen der Nutzer konsequent beachtet wird.

Da niederfrequente Magnetfelder in den meisten Wohnungen vor allem von den dort vorhandenen Installationen und Geräten herrühren, sollten auch die Bewohner alle Möglichkeiten nutzen, um die Belastungen zu reduzieren:

### Unnötige Belastungen vermeiden

Auf Geräte, die zu relativ hohen Dauerbelastungen durch magnetische Felder führen können, wie Niederspannungs-Halogenleuchten und elektrische Nachtspeicherheizungen, sollte verzichtet werden.

### Geräte ausschalten

Elektrische Geräte sollten vollständig ausgeschaltet werden, wenn sie nicht in Benutzung sind. Auch im Standby-Betrieb fließt ein elektrischer Strom, der ein Magnetfeld verursacht.

### Geräte vom Netz trennen

Geräte, bei denen auch nach Betätigung des Ausschalters ein Reststrom durch die Transformatoren fließt, wie Computer, Fernsehapparate und HiFi-Anlagen, sollten vom Netz getrennt werden, durch Ziehen des Netzsteckers oder Verwendung einer abschaltbaren Steckerleiste.

### Abstand halten

Von Geräten, die nicht abgeschaltet werden können, wie Kühlschrank, Gefriertruhe, Radiowecker oder Aquarium, oder Geräte, bei denen der Standby-Betrieb nicht vermieden werden kann, weil sonst z.B. die Programmierung verloren geht, sollte ein Schutzabstand von mindestens 1,5 m eingehalten werden. Auf einen möglichst großen Schutzabstand sollte auch zwischen Schlaf- und anderen Daueraufenthaltsbereichen und den Zuleitungen von Geräten im Dauerbetrieb sowie vor allem Hausleitungen und Sicherungskästen geachtet werden.

### Installationen richtig planen

Bei Neubauten sollten Bauherren darauf dringen, dass schon bei der Installationsplanung darauf geachtet wird, dass Stromleitungen, über die dauernd hohe Ströme geführt werden, einen hinreichenden Abstand von den Daueraufenthaltsbereichen im Haus haben, und Unternehmen beauftragen, die Erfahrung mit immissionsreduzierten Installationen haben.

### Abschirmung

Niederfrequente Magnetfelder können nur mit sehr großem Aufwand abgeschirmt werden. Bei elektrischen Feldern ist das einfacher. Hier reichen metallische Folien oder engmaschige Metallnetze, die aber fachgerecht geerdet werden müssen, weil sie sonst nur die Felder 'verschleppen'. Außerdem ist darauf zu achten, dass durch die Anbringung von Folien nicht die 'Atmung' der Wände behindert wird.

### Einbau von Netzfreischaltern

Wenn in einem Stromkreis alle elektrischen Geräte ausgeschaltet werden, entstehen dort keine Magnetfelder mehr.

Solange die Geräte jedoch an Steckdosen angeschlossen sind, sind sie von elektrischen Feldern umgeben. Um diese auch noch weg zu bekommen, z.B. nachts in Schlaf- und Kinderzimmern, empfiehlt sich der Einbau eines Netzfreischalters in den Stromkreis. Die Netzfreischaltung funktioniert nur in Stromkreisen, in denen sich keine Geräte im Dauer- oder Standby-Betrieb befinden. Der Netzfreischalter muss von einem fachkundigen Elektroinstallateur eingebaut werden.

### Messung

Die tatsächlichen Belastungen durch elektrische und magnetische Felder können mit Hilfe entsprechender Messgeräte mit relativ geringem Aufwand ermittelt werden. Zumindest vor größeren Umbau- oder Abschirmmaßnahmen ist eine Messung sinnvoll. Solche Messungen sollten von entsprechend geschultem Personal mit kalibrierten Messgeräten durchgeführt werden. Im Handel sind zwar auch etliche Billiggeräte erhältlich, die von Laien bedient werden können, viele dieser Geräte sind jedoch für aussagekräftige Messungen völlig ungeeignet.

### Beratung

Beratungen zur Verminderung von Belastungen durch elektrische und magnetische Felder aber auch Messungen werden von etlichen wissenschaftlichen Instituten, Baubiologen und anderen angeboten. Nicht alle dieser Angebote sind seriös. Am besten ist es, sich bei einer Verbraucherzentrale vor Ort über vertrauenswürdige Anbieter zu informieren.

## 4.5 Bahnanlagen und Züge

### Stromübertragungsleitungen

Im Unterschied zum öffentlichen Stromnetz, in dem eine Frequenz von 50 Hz verwendet wird, arbeitet die Stromversorgung der Eisenbahn aus historischen Gründen mit einer Frequenz von 16,7 Hz. Die Deutsche Bahn muss deshalb auch ein eigenes 110 kV-Stromversorgungsnetz unterhalten, einschließlich eigener Umspannwerke zur Übertragung der elektrischen Leistung von der 110 kV-Übertragungsebene auf die zum Betrieb der Lokomotiven notwendige Spannung von 15 kV.

Während die allgemeine Stromversorgung dreiphasig mit drei Leitern aufgebaut ist, wird bei der Bahnstromversor-

gung nur eine Phase verwendet, das heißt, dass auf den Masten pro System nur zwei Leitungen (Phase und Null-Leiter) geführt werden.

Die Versorgung von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen erfolgt überwiegend mit Fahrdrabt-Gleichspannungen (bzw. gleichgerichteter Wechselspannung) von 600 bis 1.200 V.

### Oberleitungen und Schienen

Die Züge der Deutschen Bahn werden über die als Oberleitung ausgeführte Phase mit der Betriebsspannung von 15 kV versorgt. Der Rückstrom fließt über die Schienen.



An Bahnstreckenentstehen sowohl die Oberleitungen als auch die Schienen starke Magnetfelder.

Dies hat zwei Auswirkungen: Zum einen verhindert der große Abstand zwischen der Oberleitung und der Schiene die gegenseitige Kompensation der Magnetfelder, die durch die Ströme in der Oberleitung und in den Schienen erzeugt werden. Zum anderen sind die Schienen über die Schwellen nicht vollständig von der Umgebung isoliert, so dass sich die Rückströme auch andere Wege im Erdreich suchen können, vorzugsweise dort, wo wegen einer hohen Bodenfeuchtigkeit oder durch metallische Gas- oder Wasserleitungen die elektrische Leitfähigkeit relativ hoch ist. Diese 'vagabundierenden Ströme' erzeugen ihre eigenen Magnetfelder, z.T. auch noch in großem Abstand von der Bahntrasse. Da die Stärke der magnetischen Felder an elektrifizierten Eisenbahnstrecken von mehreren konstruktions- und betriebsbedingten Parametern abhängt, ist eine allgemeine Klassifizierung schwierig.

Magnetfelder treten an elektrifizierten Eisenbahnstrecken nicht nur bei unmittelbarer Durchfahrt von Zügen auf, sondern schon dann, wenn irgendwo auf dem Streckenabschnitt zwischen zwei Stromeinspeisepunkten, an dem sich der Messort befindet, ein Zug fährt. Da die Leistungsanforderung in einem Streckenabschnitt zwischen zwei Stromeinspeisepunkten in Abhängigkeit von der Zahl der in diesem Abschnitt fahrenden Züge und deren Betriebszustand (Anfahren, Beschleunigen, Dauerfahrt, Abbremsen) sehr stark und schnell schwanken kann, zeigen die magnetischen Feldstärken in der Nähe von Bahntrassen sehr starke zeitliche Schwankungen. Messungen in 50 m Abstand von elektrifizierten Eisenbahnstrecken ergaben für die Magnetische Flussdichte Werte zwischen 0,05 und 0,6  $\mu\text{T}$ , wobei die Zeiten für die Übergänge zwischen Minimal- und Maximalwerten teilweise weniger als eine Minute betragen. Neben den raschen Feldstärkeschwankungen sind für die Magnetfelder an Bahnstrecken große Feldanteile mit höheren Frequenzen (Oberwellen) charakteristisch, deren Ursache die elektronische Steuerung der Motoren der Lokomotiven (Phasenanschnittsteuerung) ist.

Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Berechnung des Magnetfeldes um eine Bahnstrecke.

Bei Straßenbahnen erfolgt die Einspeisung des Betriebsstroms ebenfalls über Oberleitungen, bei S-Bahnen auch über seitlich des Gleises in weniger als 1 m Höhe über der Schienenoberkante angebrachte Stromschienen. Der Abstand zwischen Hin- und Rückleiter ist bei seitlich angebrachten Stromschienen relativ gering, weshalb die Kompensationswirkung besser ist.

## Personenzüge

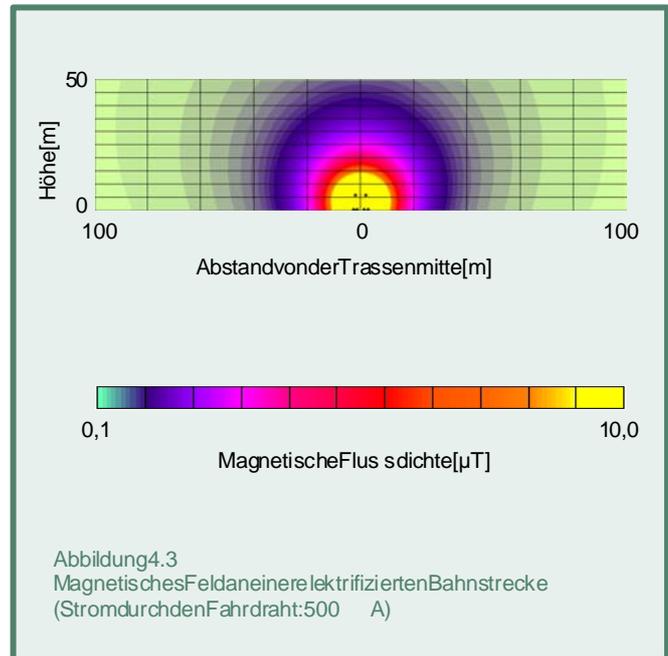
Die magnetischen Immissionen in den Wagen setzen sich aus drei Anteilen zusammen:

den externen Feldern,

- die von der Oberleitung bzw. den Schienen und den Einspeiseleitungen herrühren (s.o.) und

den internen Feldern,

- die von den Motoren ausgehen, wenn sich diese, wie beim ICE 3, direkt unterhalb der Fahrgasträume befinden, oder
- die von den Stromversorgungsleitungen innerhalb der Waggons erzeugt werden.



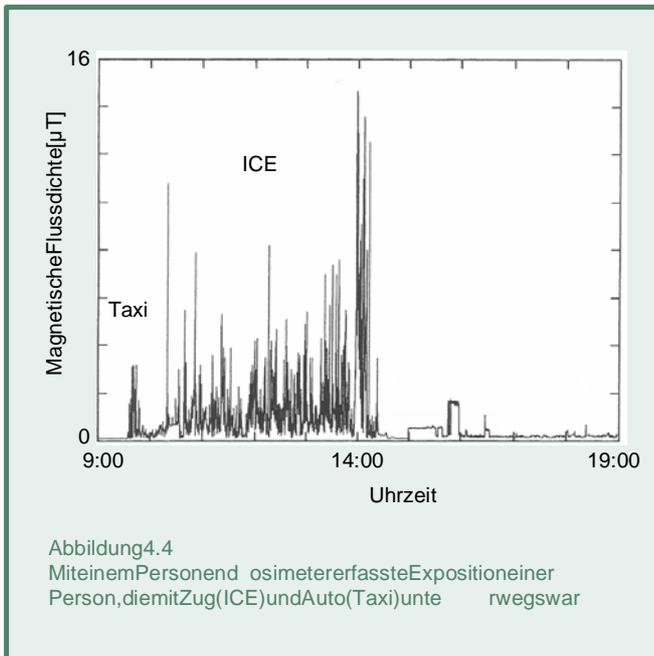
In modernen Zügen (vor allem ICE) dominiert oft der Anteil, der von der so genannten Zugsammelschiene, einem Kabelstrang unter dem Wagenboden, herrührt.

Abbildung 4.4 zeigt die mit einem Personendosimeter erfasste Exposition einer Person, die mit Zug (ICE) und Auto (Taxi) unterwegs war. An der Messkurve fallen die starken Schwankungen des Magnetfeldes auf. Die Immissionen lagen zeitweise bei mehr als 10  $\mu\text{T}$ . Aber auch im Auto treten erhöhte magnetische Wechselfelder auf. Diese sind zum einen auf die Zündanlage zurückzuführen, weshalb auch Anteile mit hohen Frequenzen im MHz-Bereich auftreten. Zum anderen erzeugen Stahlgürtelreifen durch ihre Drehung im Erdmagnetfeld magnetische Wechselfelder, deren Frequenz von der Fahrgeschwindigkeit abhängt. Die Magnetfelder in Personenwagen können insgesamt die gleiche Stärke erreichen wie die Felder in Eisenbahnen.

## Risiken durch die Felder von Bahnanlagen und in Zügen

Epidemiologische Untersuchungen, die in mehreren europäischen Ländern durchgeführt wurden, ergaben ein erhöhtes Krebsrisiko für das Personal in Zügen. Aussagen über das Gesundheitsrisiko von Fahrgästen lassen sich aus diesen Befunden für eine Personengruppe, die während eines großen Teils ihres Arbeitslebens relativ starken Magnetfeldern ausgesetzt ist, nicht ableiten.

Im Vergleich mit der Zahl der Laboruntersuchungen zum Einfluss netzfrequenter Felder (50 Hz bzw. 60 Hz) auf den Organismus ist die Zahl der Arbeiten zu den Wirkungen von Feldern mit niedrigeren Frequenzen, wie sie bei der Bahn verwendet werden, gering. Da der Wirkungsmecha-



nismus für niederfrequente Magnetfelder in biologischen Systemen bisher nicht identifiziert werden konnte, kann nicht beurteilt werden, ob Befunde aus Experimenten mit netzfrequenten Feldern auf 16,7 Hz-Felder übertragen werden können.

### Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen

Die 26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz erlaubt derzeit entlang von Bahnstrecken Immissionen bis 300  $\mu\text{T}$ . Vor dem Hintergrund der wissenschaftlichen Befunde, die auf ein erhöhtes Gesundheitsrisiko durch die Felder der Bahn deuten, sollte dieser Grenzwert deutlich gesenkt werden, bzw. es sollte ein niedrigerer Vorsorgewert zum Schutz der Bevölkerung eingeführt werden. In der Schweiz beträgt der aus Vorsorgegründen eingeführte Anlagengrenzwert nur 1,0  $\mu\text{T}$ .

Bedingt durch die Art der Energieübertragung durch ein Ein-Phasensystem und die Art der Stromzuführung über

Oberleitungen sind die Möglichkeiten zur Minderung insbesondere der magnetischen Felder von Bahnanlagen durch konstruktive und betriebliche Maßnahmen gering. Wie im Falle der Übertragungsleitungen der allgemeinen Stromversorgung, kann zwar bei den Bahnstrom-Übertragungsleitungen durch Verkabelung eine deutliche Verminderung der durch elektrische und magnetische Felder belasteten Flächen erreicht werden, für die eigentlichen Bahntrassen mit den Magnetfeldern, die von Oberleitungen und Schienen ausgehen, gibt es bisher allerdings keine erprobten Minderungskonzepte.

In den Wagen wäre eine Minderung der magnetischen Expositionen der Fahrgäste, die von internen Quellen herühren, möglich. Hierzu müssten insbesondere die Versorgungskabel so aufgebaut und verlegt werden, dass sich die Magnetfelder so weit wie möglich kompensieren bzw. dass der Abstand zu den Fahrgästen so groß wie möglich ist.

Der Umstieg von der Bahn auf das Auto führt in der Regel nicht zu einer Verminderung der Höhe der Magnetfeldbelastung.

## 4.6 Sicherungsanlagen

Zur Überprüfung von Zugangsberechtigungen, zur Verhinderung von Diebstählen und zum Aufspüren von Metallen sind eine große Zahl von Sicherheitssystemen entwickelt worden. Die bisher überwiegend eingesetzten Anlagen arbeiten alle nach dem gleichen Grundprinzip: Sie reagieren auf Veränderungen eines künstlich erzeugten magnetischen Wechselfeldes durch Magnetstreifen, die an Waren oder Erkennungsplaketten angebracht sind, oder durch ferromagnetische Gegenstände. Zukünftig werden verstärkt Systeme eingesetzt, bei denen durch hochfrequente Felder Informationen von Chips, die in Etiketten integriert sind, an einen Empfänger übertragen werden.

### Warensicherungsanlagen

Diebstahlsicherungsanlagen in Kaufhäusern, Supermärkten und Bibliotheken können Sicherungshänger oder -etiketten über Entfernungen von einigen Metern feststellen. Bei bestimmten Anlagentypen werden zusätzlich Informationen von den Etiketten zu den Detektoren übertragen.

Warensicherungsanlagen arbeiten alle nach dem gleichen einfachen Prinzip: Ein Sender sendet ein Signal definierter

Frequenz an einen Empfänger. Der Feldbereich zwischen Sender und Empfänger legt die Überwachungszone fest. Wird ein Sicherungshänger oder -etikett mit einer speziellen Charakteristik in die Überwachungszone gebracht, verursacht dies eine definierte Störung des Feldes, die vom Empfänger festgestellt wird. Dies führt dann zur Auslösung des Alarms. Um dieses einfache Prinzip möglichst störungsfrei und für unterschiedliche Warengruppen zu realisieren, werden elektromagnetische Felder mit sehr unterschiedlichen Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 2,45 GHz eingesetzt. Manche Anlagen nutzen auch mehrere Frequenzen. Auch in Bezug auf andere Feldcharakteristiken gibt es starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen: Es gibt Anlagen, die mit einem reinen Sinussignal oder unterschiedlichen Pulsformen arbeiten, andere verwenden amplitudenmodulierte Felder oder Felder, die periodisch schwanken.

Genauere Informationen über die Stärken der verwendeten magnetischen oder elektromagnetischen Felder, über Frequenzen, Modulationen und Pulsformen stehen in vielen Fällen nicht zur Verfügung. Es gibt daher bisher keine umfassende Übersicht über die Expositionen von Kunden und Personal im Bereich von Warensicherungsanlagen. In Tabelle 4.4 sind einige Beispiele aus Messungen des ECOLOG-Instituts und anderer Institutionen an Warensicherungsanlagen zusammengestellt, die das Problem der vielfach sehr starken Expositionen verdeutlichen. Angegeben sind:



Warensicherungsanlagen erzeugen nicht nur im Durchgangsbereich vergleichsweise starke Felder, sondern außerhalb auch Streufelder in der Umgebung.

- die Betriebsfrequenz(en) der Anlage
- die maximale Stärke des Feldes in der Schleuse
- die Stärke des Feldes in der Mitte der Schleuse
- der Grenzwert für die Bevölkerung (gemäß 26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz bzw. EU-Ratsempfehlung KOM(1998) 268)
- der vorgeschlagene Grenzwert für Herzschrittmacherträger (eine allgemein gültige Normung besteht bisher nicht; die Bewertung für Arbeitsplätze erfolgt als Einzelfallbewertung anhand der vom Hersteller angegebenen Herzschrittmacherdaten; zur Orientierung sind die im Entwurf der VBG Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder 1997-12 aufgeführten Grenzwerte angegeben).

Künftig werden RFID-(Radio Frequency Identification-) Systeme, die derzeit in der Praxiserprobung sind, verstärkt zum Einsatz kommen, weil mit RFID die Warenlogistik effektiver gemacht und Kassiervorgänge in Warenhäusern und Supermärkten erheblich verkürzt und ohne Einsatz von Personal durchgeführt werden können. Da es mit RFID möglich wird, alle gekauften Waren zu erfassen und über Kunden- oder Kreditkarten dem Kunden zuzuordnen, können mit dieser Technik zudem genaue Kundenprofile erstellt werden.

## Risiken durch die Felder von Warensicherungsanlagen

Die Werte in Tabelle 4.4 zeigen, dass die Grenzwerte für die Bevölkerung und erst recht die Grenzwerte für Herzschrittmacherträger im Wirkungsbereich vieler Warensicherungsanlagen zum Teil erheblich überschritten werden. Kunden halten sich in der Regel nur relativ kurze Zeit in den Feldern von Warensicherungsanlagen auf. Bei sehr empfindlichen Personen könnte die kurze Exposition jedoch unter Umständen ausreichen, um gesundheitliche Beeinträchtigungen auszulösen. Zudem zeigen Untersuchungen, dass die Felder von Warensicherungsanlagen gerade in Kinderkopfhöhe besonders stark sind. Problematisch sind manche Typen von Warensicherungsanlagen vor allem für das Personal, das im Bereich der Schleusen arbeitet und den Feldern unter Umständen während des gesamten Arbeitstages ausgesetzt ist. Das gilt bei bestimmten Anlagentypen auch für das Personal, das die Sicherungsetiketten an den Kassen mit Hilfe starker Felder deaktiviert.

Tabelle 4.4  
Stärke der Felder von Warensicherungsanlagen

Frequenz	Maximale Stärke des Feldes in der Schleuse	Stärke des Feldes in der Mitte der Schleuse	Grenzwert Bevölkerung	Grenzwert Herzschrittmacherträger
	μT	μT	μT	μT
21 Hz	369,6	138,3	238,1	50,0
75 Hz	1307,3	171,0	66,7	13,45
218 Hz	1020,0	103,1	22,9	4,61
5,0/7,5 kHz	1282,1	7,2	6,25	1,11
6,3 kHz und höher	25,0	16,0	6,25	1,11
24 kHz	6,1	0,76	6,25	1,11
35,0 kHz	4,84	< 0,1	6,25	1,11
39,5 kHz	80,4	0,77	6,25	1,11
58,0 kHz	20,6	0,2	6,25	1,11
132 kHz	36,5	0,73	6,25	0,98
1,81 MHz	0,53	< 0,04	0,51	0,31
1,95 MHz	0,82	< 0,04	0,47	0,30
2,05 MHz	0,41	0,03	0,45	0,29
2,1 MHz	0,29	0,29	0,44	0,28
8,2 MHz	0,47	< 0,04	0,11	0,15
	V/m	V/m	V/m	V/m
2,45 GHz	29,0	4	61,0	61,4

Ein gewisses Risiko besteht auch für Träger aktiver Implantate, insbesondere von Herzschrittmachern. Die Felder im Bereich vieler Warensicherungsanlagen können die Elektronik des implantierten Gerätes stören und Fehlfunktionen, Blockierungen oder Zerstörung des Geräts verursachen. Herzschrittmacher sind funktionsbedingt speziell für pulsartige Signale empfindlich und zwar besonders im Frequenzbereich des Herzschlags. Die im Körper verlegte Elektrode des Schrittmachers wirkt gegenüber elektromagnetischen Feldern als Antenne. Die Elektronik von Herzschrittmachern ist für die Verarbeitung schwacher, niederfrequenter elektrischer Signale ausgelegt, deshalb sind Störungen durch niederfrequente möglich. Aber auch Hochfrequenzfelder können zu Störungen von Herzschrittmachern führen, da sie in dem Gerät (je nach Typ unterschiedlich stark) gleichgerichtet werden. Dies kommt einer

Demodulation, das heißt der Trennung eines Signals von seinem hochfrequenten Trägersignal, gleich und kann zur Beeinflussung der Funktion von Herzschrittmacher führen.

Zu RFID-Systemen liegen bisher lediglich erste Messergebnisse aus England vor. Diese zeigen, dass die internationalen Grenzwertempfehlungen auch bei diesen Systemen vielfach deutlich überschritten werden.

### Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch Warensicherungsanlagen

Aus den vorliegenden Messungen ist zu schließen, dass die immissionschutzrechtliche Überwachung von Warensicherungsanlagen völlig unzureichend ist und dass die Überwachungsbehörden nicht willens oder in der Lage sind, zumindest die Einhaltung der gesetzlichen Sicherheitsgrenz-

werte sicher zu stellen. Die Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zur vorsorgenden Minimierung der Expositionen aus dem Jahr 2001 werden bisher offensichtlich völlig ignoriert. Die SSK hatte empfohlen, bei der Entwicklung von Geräten und bei der Errichtung von Anlagen die Minimierung von Expositionen zum Qualitätskriterium zu machen bzw. Maßnahmen zu ergreifen, um Expositionen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Rahmen der technischen und der wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten zu minimieren. Im Bereich der Warensicherung und -kontrolle ist dies mit Blick auf die bestehenden Missstände, vor allem aber auch im Hinblick auf die derzeit laufende breite Einführung von drahtlosen Warenidentifizierungssystemen RFID dringend notwendig.

## Systeme zur Personenidentifizierung

Elektromagnetische Schleusen werden auch eingesetzt, um den Zugang von Personen zu Gebäuden oder besonderen Räumen zu kontrollieren. Systeme zur Personenidentifizierung funktionieren ähnlich wie Warensicherungsanlagen, nur dass statt eines Warenetiketts ein Ausweis abgetastet wird. Der Zugang wird nur für Personen freigegeben, die einen Ausweis mit entsprechender Autorisierung mit sich führen, bzw. deren Aussehen oder andere persönliche Merkmale mit den auf dem Ausweis gespeicherten Daten übereinstimmen. Herkömmliche Systeme zur Personenidentifizierung arbeiten meist mit Frequenzen im Bereich von 6 bis 100 kHz, die Stärke der Felder reicht innerhalb der Spulen der Schleuse bis 60 T. RFID-Systeme werden bereits jetzt und künftig in einem noch viel größeren Umfang zur Personenidentifizierung eingesetzt. Systeme, bei denen der RFID-Mikrochip unter der Haut implantiert wird, sind bereits im Einsatz.

## Metall- und andere Gegenstandsdetektoren

Auf Flughäfen, in Ministerien, Gerichten und anderen wichtigen Gebäuden werden bereits seit langem Metalldetektoren eingesetzt, um zu verhindern, dass Waffen in besonders zu schützende Bereiche gelangen. Diese Detektoren reagieren, wenn ein Gegenstand aus Eisen oder einem anderen ferromagnetischen Material in das Magnetfeld der Schleuse gebracht wird und dieses dadurch verändert. Die Durchgangsmetalldetektoren auf Flughäfen arbeiten üblicherweise mit Frequenzen von weniger als 1 MHz. Die maximale magnetische Flussdichte liegt bei 0,1 mT. Metalldetektoren, die mit der Hand geführt werden und die zu-

nehmend zur Personenkontrolle auf Flughäfen eingesetzt werden, erzeugen in der Regel schwächere, lokal begrenzte Felder.

Derzeit werden Detektoren erprobt, mit denen es auch möglich ist, nicht-metallische Gegenstände zu entdecken, z.B. Waffen aus keramischen Materialien oder Plastiksprengstoff. Diese THz-Detektoren nutzen den Frequenzbereich 0,1 bis 10 Terahertz (100 bis 10.000 GHz). Der THz-Bereich liegt also frequenzmäßig zwischen dem Mikrowellen- und dem Infrarotbereich. Dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird auch als 'fernes Infrarot' bezeichnet. Den Grenzen des THz-Frequenzbereichs entsprechen Wellenlängen von 3 mm bis 30  $\mu\text{m}$ . Lange Zeit galt der THz-Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwar als wissenschaftlich interessant aber als technologisch wenig attraktiv, weil der Bau von Sendern und Empfängern für diesen Frequenzbereich schwierig, technisch aufwändig und teuer ist. Seit einigen Jahren arbeiten jedoch Forscher auf der ganzen Welt an neuen Technologien, um THz-Wellen für Informationsübertragung, Diagnostik und Überwachung nutzbar zu machen.

THz-Felder haben starke Wechselwirkungen mit polaren Materialien, durchdringen aber unpolare Substanzen. Die Absorptionsspektren vieler polarer Moleküle, wie Wasser, Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid, weisen viele charakteristische Spektrallinien im THz-Bereich auf. Diese eindeutigen Signaturen der Moleküle im THz-Bereich können für das Umweltmonitoring, den Nachweis von Luftverschmutzungen oder für Gassensoren genutzt werden. Biologisches Gewebe und andere biologische Bausteine haben ebenfalls charakteristische Signaturen im THz-Bereich. Indem ausgedehnte Untersuchungsobjekte Punkt für Punkt durchleuchtet werden, lassen sich zweidimensionale (THz-Imaging) oder sogar dreidimensionale Abbildungen (THz-Tomography) gewinnen.

In der Sicherheitstechnik eröffnen bildgebende THz-Verfahren neue Möglichkeiten. Bereits heute ist es möglich, mit THz-Kameras Menschen bis auf die Haut zu durchleuchten: Tritt beispielsweise ein Passagier am Flughafen vor die Linse, durchdringen die Strahlen seine Kleidung, nicht aber den Körper selbst. Auf dem Kamerabild erscheint er nackt, sogar Keramikwaffen oder Plastiksprengstoff zeichnen sich deswegen ab, selbst wenn diese direkt am Körper getragen werden. Für ausreichend scharfe Falschfarben-Aufnahmen reicht sogar die Intensität der

Strahlung aus, die der menschliche Körper selbst im langwelligen Spektralbereich aussendet. Mit Reaktionszeiten des Detektors unterhalb einer Sekunde und Reichweiten bis zu zwei Metern sind effektive Screening-Module denkbar, bei denen Passagieren quasi im Vorbeigehen unter die Kleidung geschaut wird. Zurzeit wird auch daran gearbeitet, mit Hilfe von THz-Wellen Mikroorganismen in geschlossenen Behältnissen nachzuweisen (z.B. Sporen des Milzbranderreger in einem Briefumschlag).

Welche Risiken von Geräten ausgehen, die nicht nur passiv THz-Strahlung nachweisen, sondern selbst aussenden, um Personen oder Objekte zu 'durchleuchten', ist ungewiss (s. Kasten 4.1)

## 4.7 Radio- und Fernsehsender

Radio- und Fernsehsender gehören mit zu den leistungsstärksten Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder.

### Radiosender

Die klassischen analogen Rundfunksender nutzen verschiedene Frequenzbereiche (s. Tabelle 4.5). Die Informationsübertragung erfolgt durch Amplituden- oder Frequenzmodulation (AM bzw. FM).

Die Sendeleistungen von Mittelwellensendern können bis 1,8 MW (= 1.800.000 Watt) betragen. Sie gehören damit zu den leistungsstärksten Funksendeanlagen überhaupt. In ihrer unmittelbaren Umgebung erzeugen sie sehr starke Felder. Allerdings sind von diesen Sendern wegen der großen Reichweite von Mittelwellen nur wenige erforderlich, um ganz Deutschland zu versorgen. Die Reichweite von Ultrakurzwellen ist wesentlich geringer und für eine flächendeckende Versorgung sind viele Sender notwendig. Im UKW-Bereich betragen die Sendeleistungen bis 100 kW (100.000 Watt) .

Für den digitalen Rundfunk (T-DAB: Digital Broadcasting, das 'T' steht für terrestrisch) wird der Frequenzbereich von 223 bis 230 MHz genutzt. Zukünftig wird wohl auch im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich die analoge Rundfunktechnik durch digitale Verfahren abgelöst. Bei DAB wird das Tonsignal vor der Ausstrahlung digitalisiert, ähnlich wie bei einer Musik-CD. Die Übertragungsqualität ist dadurch besser als beim herkömmlichen analogen Rund-

funk. Auch im fahrenden Auto ist Radioempfang ohne störendes Rauschen möglich.

Digitale Übertragungen von Sprache und Musik erfordern eine Reduktion der Daten. DAB benutzt ein standardisiertes Verfahren, in dem es die vom Hörer nicht wahrnehmbaren Anteile aus der Gesamtinformation herausfiltert, bevor der reduzierte Datenstrom in einem speziellen Verfahren codiert und digitalisiert wird. In einem Frequenzband werden typischerweise neun Programme gleichzeitig ausgestrahlt. Die komprimierten binären Daten der einzelnen Programme oder Dienste werden vor der Ausstrahlung gemischt und mit einem mehrstufigen Fehlerschutz versehen. Der so erzeugte Datenstrom wird anschließend auf die bis zu 1.536 Frequenzunterbereiche verteilt. In der Gesamtbandbreite von 1,5 MHz ähnelt das Signal einem weißen Rauschen, das heißt, dass Maxima und Minima der Signalstärke statistisch gleichmäßig verteilt sind.

Bei der terrestrischen Ausbreitung eines Funksignals kann es durch Reflektionen der Hochfrequenzstrahlung an Hindernissen (z.B. Bergen oder auch Häusern) dazu kommen, dass das Signal den Empfänger auf zwei (oder mehreren) Wegen erreicht. Da diese Wege meistens unterschiedlich lang sind, kommen diese Signale nicht gleichzeitig an und stören sich gegenseitig. Das DAB-Verfahren macht die Übertragung unempfindlich gegenüber solchen Störungen. Bei DAB können die verschiedenen Sendestationen für ein Programm daher alle in demselben Frequenzband senden. Zur Synchronisation wird bei DAB alle 0,1 Sekunden ein 'Nullsignal' mit verringerter Leistung gesendet. Außer diesen kurzen 'Einbrüchen' in der Empfangsleistung ist das DAB-Signal recht gleichmäßig und 'ungepulst'.

Für eine flächendeckende T-DAB-Versorgung sind mehr Sendeanlagen erforderlich als zur herkömmlichen UKW-Ausstrahlung, deren Sendeleistung kann aber geringer sein

Tabelle 4.5  
Für Radioübertragung genutzte Frequenzbereiche

Übertragungsbereich	Frequenzbereich
Langwelle	148,5 kHz bis 255 kHz
Mittelwelle	526,5 kHz bis 1,6 MHz
Kurzwelle	3,4 MHz bis 26 MHz
Ultrakurzwelle	87,5 MHz bis 108 MHz

## Kasten 4.1

### Risiken durch THz-Felder

Im Rahmen des EU-Forschungsprogramms *Quality of Life and Management of Living Resources* wurde das *THz-Bridge-Projekt* zu möglichen Auswirkungen von THz-Wellen auf biologische Systeme durchgeführt. Hintergrund des Projekts war die bekannte Tatsache, dass elektromagnetische Wellen mit Frequenzen im THz-Bereich von organischen Makromolekülen, wie DNA-Molekülen und Proteinen, stark absorbiert wird. Daher stellt sich die Frage, ob diese Strahlung auch bei Intensitäten unterhalb der Schwellen für thermische Schädigungen zelluläre Prozesse beeinflussen kann und ob sie ein genotoxisches Potential hat.

Das *THz-Bridge-Projekt*, an dem zehn europäische Forschungsinstitute beteiligt waren, konnte keine abschließende Antwort auf die Frage nach dem tatsächlichen Risiko bei Exposition gegenüber THz-Strahlung liefern. Unter verschiedenen Expositionsbedingungen wurden zwar keine biologischen Wirkungen nachgewiesen, aber es zeigte sich auch, dass unter bestimmten Bedingungen Veränderungen der Durchlässigkeit von Zellmembranen und sogar genotoxische Effekte hervorgerufen werden können.

Die zur Auslösung der Effekte notwendigen Intensitäten waren, verglichen mit den von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) herausgegebenen Grenzwertempfehlungen, sehr niedrig. Für Expositionszeiten gegenüber kontinuierlicher 100 GHz-Strahlung von mehr als einer Stunde wurden bei Lymphozyten sowohl genotoxische wie auch epigenetische Effekte schon bei Leistungsdichten von  $0,5 \text{ W/m}^2$  festgestellt. Die ICNIRP, deren Empfehlungen großen Einfluss auf die Festsetzung der Grenzwerte in vielen Ländern haben, hält für die Allgemeinbevölkerung  $10 \text{ W/m}^2$  und für berufliche Exponierte  $50 \text{ W/m}^2$  für vertretbar.

An diesem Beispiel wird einmal mehr deutlich, dass die geltenden Grenzwerte nicht ausreichen, um den Schutz der Bevölkerung vor negativen Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder sicherzustellen. Das Bundesamt für Strahlenschutz hat in einem Diskussionspapier zum Thema 'THz-Strahlung' zu Recht darauf hingewiesen, dass die Grenzwerte für den THz-Bereich aus den Erkenntnissen über die angrenzenden Mikrowellen- und Infrarotbereiche extrapoliert wurden, sich die Wirkungen jedoch nicht in jedem Fall widerspruchsfrei klären ließen.

als die der normalen UKW-Sender. Insgesamt ist eine deutliche Verringerung der Gesamtsendeleistung gegenüber dem analogen UKW möglich, auch wenn sicher ein Teil dieser Reduktion durch die Ausstrahlung von zusätzlichen Programmen und Diensten aufgezehrt wird.

### Fernsehsender

Fernsehsender am Boden nutzen zwei unterschiedliche Frequenzbänder (s. Tabelle 4.6). Die Sendeleistungen der klassischen (analogen) Fernsehsender hängen vom Versorgungsbereich ab. Sie können bis 500 kW betragen.

Die Information für Helligkeit und Farbe der Bildpunkte wird beim herkömmlichen Fernsehen der benutzten Hochfrequenz als analoge Amplitudenmodulation aufgeprägt. Die Amplitude bewegt sich hierfür zwischen 10 und 73 Prozent der maximalen Amplitude. In den Synchronisationspulsen springt die Amplitude sehr schnell auf 100 Prozent. Hierdurch entstehen in der Zeitstruktur des ausgestrahlten Hochfrequenzsignals zwei ausgeprägte Pulsungen, eine mit 50 Hz durch die (Halb-) Bildfolgefrequenz und eine mit 15,625 kHz durch die Zeilenfrequenz. Im Frequenzspektrum des Signals sind mit kaum abfallender Stärke auch die Oberwellen dieser Frequenzen zu finden: neben 50 Hz auch 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz usw. bis in den

Bereich um 4 bis 5 kHz hinein und neben 15,625 kHz auch 31,25 kHz, 46,875 kHz usw. bis in den 100 kHz-Bereich.

Da benachbarte Sender für die Ausstrahlung auch desselben Programms verschiedene Frequenzen benutzen müssen, um sich nicht gegenseitig zu stören, ist die Zahl der terrestrisch ausstrahlbaren Fernsehprogramme in der bisherigen analogen Übertragungsart begrenzt. Mit der analogen Technik ist eine Programmausweitung nicht möglich. Deshalb wird diese Übertragungsart bis 2010 vollständig durch eine digitale, DVB-T (Digital Video Broadcast - Terrestrisch), ersetzt. DVB-T beinhaltet aber mehr als eine reine Digitalisierung der Informationen. Diese brächte allein keine Lösung des Kapazitätsproblems. Um z.B. ein übliches Programm mit seinem 625-Zeilen-Signal in der gewohnten Qualität digital zu übertragen, wäre eine Datenrate von mehr als 200 Millionen Bits pro Sekunde (Mbit/s) nötig. Solche Werte können weder über Satellit noch im Kabel und schon gar nicht bei terrestrischer Ausstrahlung übertragen werden. Deshalb ist bei allen digitalen Systemvorschlägen eine Datenreduktion vorgesehen. Das digitale Fernsehen wurde eigentlich erst durch die Entwicklung leistungsfähiger Datenreduktionsverfahren möglich gemacht. Sie erreichen - ohne für den Zuschauer sichtbare Qualitätseinbußen - eine Reduktion der Daten-

Tabelle 4.6  
Für Fernsehübertragung genutzte Frequenzbereiche

Übertragungsbereich	Frequenzbereich
VHF(Band I)	47 MHz bis 68 MHz
VHF(Band III)	174 MHz bis 230 MHz
UHF(Band IV)	470 MHz bis 790 MHz
UHF(Band V)	790 MHz bis 862 MHz

menge je nach Programm auf 1/20 bis zu 1/100. Für eine dem heutigen Standard entsprechende Bildqualität werden bei digitaler Übertragung durch die Datenreduktion typischerweise nur noch 3 bis 7 Mbit/s benötigt. Nur für Sendungen mit sehr hohem Bewegungsanteil (z.B. Sportsendungen) sind etwas höhere Datenraten erforderlich.

Ein DVB-T Übertragungskanal ersetzt einen bisherigen analogen TV-Kanal mit einer Bandbreite von 7 bis 8 MHz. Je nach gewähltem Modulationsverfahren kann nach derzeitigem Stand in einem solchen Frequenzkanal eine digitale Datenrate von 5 bis 15 Mbit/s, ja sogar bis zu 32 Mbit/s übertragen werden (zum Vergleich: im Kabel und über Satellit können bis zu etwa 38 Mbit/s übertragen werden). Das bedeutet, dass auf einem Frequenzkanal, auf dem bisher ein TV-Programm analog übertragen wird, durch die Digitalisierung zwischen zwei und sechs Programme ausgestrahlt werden können.

Ob sich die durch Fernsehsender verursachten Immissionen nach Umstellung auf DVB-T erhöhen, hängt davon ab, wie viele digitale Netze aufgebaut werden und welche Empfangssituationen versorgt werden sollen. Für den stationären Empfang über eine Dachantenne werden deutlich kleinere Feldstärkewerte benötigt als für den mobilen Empfang mit Kleingeräten im Haus ('portable indoor'). Der Unterschied beträgt bis zu einem Faktor 25 in der benötigten Leistungsdichte. Noch höhere Feldstärkewerte sind für den sicheren Empfang auch bei schneller Bewegung, z.B. im fahrenden Auto, erforderlich. Für eine flächendeckende DVB-T-Versorgung auch mobiler Empfänger werden zusätzliche Sender notwendig, an den bestehenden Sendern kann die Sendeleistung aber reduziert werden. In der Umgebung der bestehenden Sender sollte sich die HF-Belastung durch den Übergang vom analogen zum digitalen Fernsehen also erst einmal deutlich verringern, solange

nicht die frei werdenden Frequenzkanäle gleich wieder für zusätzliche Netze und Dienste genutzt werden.

### Risiken durch die Felder von Rundfunk- und Fernsehsendern

Obwohl Rundfunk- und Fernsehsender zu den leistungsstärksten Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder gehören, etliche in Ballungsgebieten stehen und sie in ihrer Umgebung, oft seit Jahrzehnten, zu erheblichen Immissionen führen, gibt es bisher nur wenige Untersuchungen des Gesundheitszustandes der betroffenen Bevölkerung. Die Ergebnisse der epidemiologischen Studien zum Krebsrisiko in der Umgebung der Sender sind nicht einheitlich. Während in der Umgebung einiger Anlagen erhöhte Leukämieraten festgestellt wurden, ergaben andere Untersuchungen keine Auffälligkeiten. Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Exposition durch Radio- oder Fernsehsender und anderen Erkrankungen als Krebs sind noch seltener. Die wenigen vorliegenden Ergebnisse deuten jedoch auf eine Zunahme von Befindlichkeitsstörungen, wie Schlafstörungen, Konzentrationsschwäche, hoher Blutdruck und Angstgefühle, bei den stärker exponierten Anwohnern von Radiosendern.

Eine ausführlichere Darstellung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu den biologischen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit Frequenzen, die denen von UKW- und Fernsehsendern entsprechen, findet sich im Kapitel 2.3.

### Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch Rundfunk- und Fernsehsender

Die derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen sind aus Sicht des vorsorgenden Gesundheitsschutzes unzureichend. Die hohen Grenzwerte erlauben vergleichsweise geringe Abstände zwischen Sendeantennen und Wohngebieten. Mit einem Abbau von Anlagen an kritischen Standorten oder auch nur einer Reduktion der Sendeleistung ist bei der derzeitigen gesetzlichen Lage nicht zu rechnen. Die Umstellung auf die digitale Ausstrahlung von Radio- und Fernsehprogrammen könnte an einigen Standorten allerdings zu einer Verminderung der Expositionen führen. Soweit neue Sender für DAB-T oder DVB-T installiert werden müssen, sollten die Abstände zu Bereichen, in denen sich dauerhaft Menschen aufhalten, so groß sein, dass die von den Sendern und anderen Hochfrequenzquellen verursach-

ten Immissionen  $0,01 \text{ W/m}^2$  nicht überschreiten.

Die oder der Einzelne kann vor allem durch eine umsichtige Wahl des Wohnorts erhöhte Expositionen durch Radio- und Fernsehsender vermeiden. Eine Abschirmung der Felder ist technisch möglich. Sie ist im UKW-Bereich und in den TV-Frequenzbereichen leichter als bei niedrigeren Frequenzen, in jedem Fall jedoch kostspielig (s. Kapitel 3.3).

## 4.8 Mobilfunk

Der Mobilfunk hat sich im Verlauf der zurückliegenden zehn Jahre zur Hauptquelle hochfrequenter elektromagnetischer Felder, denen Menschen ausgesetzt sind, entwickelt. Die bereits in Betrieb befindlichen rund 70.000 Mobilfunkbasisstationen in Deutschland haben zwar eine wesentlich geringere Sendeleistung als viele andere Funkseideanlagen, bezogen auf die Fläche dominieren jedoch eindeutig die vom Mobilfunk verursachten Immissionen. Nur in der unmittelbaren Umgebung von leistungsstarken Radio- und Fernsehsendern überwiegen deren Beiträge zur Gesamtbelastung. Das Mobiltelefon stellt zudem für den größten Teil der Bevölkerung die stärkste Quelle hochfrequenter Felder dar, denen Personen mehr oder weniger regelmäßig ausgesetzt sind.

### Entwicklung des Mobilfunks

Bereits vor der heutigen, digitalen Mobilfunkgeneration gab es in Deutschland Mobilfunk. Das A-Netz (seit 1958 in Betrieb) und das B-Netz (seit 1972) versorgten jeweils nur einige zehntausend Teilnehmer. Das C-Netz, das 1984 in Betrieb ging und 1992 abgeschaltet wurde, hatte in seiner Hochzeit immerhin schon rund 700.000 Kunden. A-, B- und C-Netz waren als 'Autotelefonssysteme' konzipiert. Die Geräte waren schwer und teuer; die Infrastruktur der erforderlichen Basisstationen konzentrierte sich auf Hauptverkehrswege und städtische Ballungsgebiete. Ein wahrer Mobilfunkboom brach erst 1992 mit der Einführung des GSM- (Global System for Mobile Communication) Standards los, der in rund 160 Ländern genutzt wird. Mit dem GSM-Standard kamen kleine und vergleichsweise billige Handys auf den Markt. Ende des Jahres 2005 waren in Deutschland fast 80 Millionen Handys angemeldet. Diese Zahl übertraf alle Prognosen. Die flächendeckende GSM-Versorgung erforderte bisher rund 60.000 Basisstationen.

Der GSM-Standard der D- und E-Netze wurde vor allem für

die Sprachübertragung entwickelt. Die Datenmengen, die mit ihm übertragen werden können, sind begrenzt. Um die Datenübertragung zu verbessern, das heißt wesentlich größere Datenmengen in erheblich kürzerer Zeit zu übertragen, wurde im Jahr 2000 die GPRS- (General Packet Radio System) Technik eingeführt. GPRS stellt jedoch nur eine Erweiterung der GSM-Technik dar.

Mit UMTS (Universal Mobile Telecommunication Standard) wurde ein völlig neuer technischer Standard eingeführt, der vor allem die Möglichkeiten der mobilen Kommunikation durch wesentlich höhere Datenübertragungsraten verbessert. Damit ist die mobile Übertragung von Sprache, Musik, Daten, Text, Graphik und Video mit hoher Geschwindigkeit und Qualität möglich. Als Zielgruppe für die erhöhten Übertragungsmöglichkeiten haben die Netzbetreiber weniger den beruflichen Sektor im Blick, ein wesentlicher Umsatzschwerpunkt wird vielmehr bei den 'Fun'-Angeboten, insbesondere für Jugendliche, gesehen: immer neue Computerspiele, die man aus dem Internet herunter-



Radio- und Fernsehsender sind die stärksten Quellen, die hochfrequente elektromagnetische Felder rundum abstrahlen.

laden und auf seinem UMTS-Handy unterwegs spielen kann, Zugriff auf Videos und Musik aus dem Internet und vieles mehr.

Die für den UMTS-Mobilfunk erforderliche technische Infrastruktur wird sukzessive aufgebaut: Für Ende 2005 sahen die Lizenzbedingungen eine Versorgung von 50 Prozent der Bevölkerung in Deutschland vor. Interessant sind für die Netzbetreiber vor allem dicht besiedelte Gebiete sowie

Orte und Einrichtungen mit hohem Nutzeraufkommen (Flughäfen, Bahnhöfe, Innenstädte). Das UMTS-Sende und Empfangsnetz wird auf absehbare Zeit parallel zum GSM-Netz betrieben. Derzeit wird der Bedarf an UMTS-Anlagen auf rund 40.000 geschätzt. Sollte sich die Nachfrage nach Videos auf dem Handy und ähnlich aufwändigen Datenübertragungen aber stärker entwickeln als heute absehbar, werden entsprechend mehr Anlagen gebraucht werden.

### Aufbau von Mobilfunknetzen

In Deutschland ist heute fast überall Mobilfunk möglich. Lediglich im ländlichen Raum gibt es noch vereinzelte 'weiße Flecken' auf den Karten der Mobilfunknetzbetreiber. Die große Zahl bereits in Betrieb befindlicher Mobilfunkbasisstationen ist zum einen auf die Nachfrage nach Mobilfunkdienstleistungen zurückzuführen (s.u.). Zum anderen sind die Mobilfunknetzbetreiber wettbewerbsrechtlich verpflichtet, voneinander unabhängige Netze zu betreiben.

Mobilfunkbasisstationen stellen die Schnittstelle zwischen dem einzelnen Mobilfunkteilnehmer und dem Mobilfunknetz dar. Sie empfangen die von den Mobiltelefonen ausgesandten Funkwellen und leiten die darin enthaltenen Signale weiter. Umgekehrt senden sie selbst Funkwellen aus, um a) Informationen an die Mobiltelefone zu übertragen und b) diese Informationsübertragung zu organisieren. Beim Mobilfunk werden Funkwellen mit Frequenzen im unteren Mikrowellenbereich benutzt.

Da sowohl das Handy als auch die Mobilfunkbasisstation zur Informationsübertragung elektromagnetische Wellen benutzen, deren Intensität mit dem Abstand abnimmt (s.u.), kann nur telefonieren, wer sich in der Nähe einer Mobilfunkbasisstation aufhält. Da jedes Mobiltelefon, das sich im Bereitschaftsbetrieb befindet, in regelmäßigen Abständen ein Funksignal aussendet, kann es von den Basisstationen 'geortet' werden. Die Station, die das Signal zuletzt am besten empfängt, übernimmt den Service für das Mobiltelefon. Die Übertragung der Gespräche zwischen den einzelnen Basisstationen und Vermittlungsstellen erfolgt entweder per Festnetz oder über Richtfunkstrecken.

Die einzelnen Basisstationen eines Mobilfunknetzes arbeiten nicht unabhängig voneinander, wie es z.B. Rundfunk- und Fernsehsender tun, auch wenn sie das gleiche Programm ausstrahlen, sondern sie sind miteinander vernetzt.

Diese Vernetzung ist besonders wichtig für die Übergabe der Versorgung eines Teilnehmers von einer Basisstation zu einer anderen, das so genannte 'Handover'. Wenn ein Mobilfunkteilnehmer sich nämlich während des Telefonats von 'seiner' bisherigen Basisstation entfernt und in den Sendebereich der benachbarten Basisstation wechselt, erfolgt automatisch die Übergabe des Teilnehmers an die neue Station, die nun besser empfangen wird.

Funkfrequenzen stehen nur in begrenzter Zahl zur Verfügung. Jeder Betreiber muss mit den Frequenzpaketen auskommen, für die er eine Lizenz erhalten hat. Für die Mobilfunknetze bedeutet dies, dass nicht für jede Basisstation eine eigene Frequenz zur Verfügung steht, sondern dass Frequenzen mehrfach genutzt werden müssen. Daraus ergeben sich gewisse Anforderungen an die Struktur der Mobilfunknetze. Sie müssen nämlich einigermaßen regel-



Die Höhe der von Mobilfunkanlagen verursachten elektromagnetischen Expositionen hängt nicht nur vom Abstand zu den Antennen, sondern außerdem von einigen weiteren technischen Parametern ab.

mäßig aufgebaut sein, damit eine Frequenz, die von einer Basisstation genutzt wird, auch von der übernächsten Station wieder eingesetzt werden kann, ohne dass sich die Funkzellen gegenseitig stören. Die Struktur der Mobilfunknetze gleicht daher einem ziemlich regelmäßigen Raster aus Funkzellen, die jeweils von einer Basisstation im Zentrum versorgt werden (s. Abbildung 4.5). Für die Standorte der Basisstationen gibt es in diesem Raster allerdings gewisse Toleranzen. Wie viel Spielraum der Mobilfunknetzbetreiber bei der Errichtung der Station hat, hängt nicht zuletzt von der jeweiligen Größe der Funkzelle ab, aber

auch die Geländebeschaffenheit und die Bebauungsdichte spielen eine Rolle.

Die Ausdehnung der Funkzellen wird vor allem von der Zahl der Mobilfunkteilnehmer bestimmt, die versorgt werden sollen, da jede Basisstation nur eine begrenzte Zahl von Teilnehmern bedienen kann. Wollen mehr Teilnehmer auf das Netz zugreifen, müssen weitere Stationen errichtet werden. Eine große Funkzelle wird dann in mehrere kleinere aufgeteilt (s. Abbildung 4.5). Im ländlichen Raum mit einer relativ geringen Nutzerdichte haben die Funkzellen Durchmesser von einigen Kilometern, und der Spielraum für die Platzierung der Mobilfunkbasisstationen ist mit einigen hundert Metern recht groß. Anders dagegen in den Innenstadtbereichen großer Städte, auf Plätzen mit vielen Passanten, in großen Einkaufszentren, auf Bahnhöfen und Flughäfen. Hier halten sich viele Menschen auf und es werden aufgrund der hohen Nachfrage viele Stationen gebraucht. Eine dichte Platzierung von Basisstationen bedeutet aber auch, dass die Funkzellen klein sein müssen. Wenn der Durchmesser der Funkzellen selbst nur noch weniger als 200 Meter beträgt, ist der Spielraum für die Wahl der Standorte der Basisstationen nicht mehr sehr groß.

Mobilfunkbasisstationen werden von den Mobilfunknetzbetreibern bzw. den von ihnen beauftragten Unternehmen am liebsten auf höheren Objekten errichtet: Türme, Kirchen, Häuser, Schornsteine, Windenergieanlagen, Flutlicht- und Hochspannungsmasten. Wenn dies nicht möglich ist, weil eine Anlage außerhalb des bebauten Bereichs errichtet werden soll, weil sich kein geeignetes Objekt findet oder weil kein Immobilienbesitzer bereit ist, sein Objekt zu vermieten, muss ein eigener Beton- oder Gittermast errichtet werden. Dies hat aus Sicht der Mobilfunknetzbetreiber nicht nur den Nachteil zusätzlicher Kosten für den Bau des Antennenträgers, sondern er muss auch eine Baugenehmigung beantragen. Das Genehmigungsverfahren kann wegen der Einspruchsmöglichkeiten der Anwohner zu deutlichen Verzögerungen führen.

## Frequenzen, Leistungen und Zeitstruktur beim GSM-Mobilfunk

Für die Verbindung von der Basisstation zum Mobiltelefon (Downlink) werden beim GSM 900-Mobilfunk Frequenzen im Bereich 935 bis 960 MHz, für den umgekehrten Weg (Uplink) Frequenzen im Bereich 890 bis 915 MHz genutzt.

In den GSM 1800-Netzen wird der Downlink im Frequenzbereich 1.805 bis 1.880 MHz und der Uplink im Frequenzbereich 1.710 bis 1.785 MHz abgewickelt.

Die Leistung, die von Mobilfunkanlagen abgestrahlt wird, hängt zunächst vor allem von der Größe der zu versorgenden Funkzelle ab, aber auch von der Art der Bebauung. Im ländlichen Raum liegt die Sendeleistung wegen der Größe der Funkzellen bei bis zu 40 W. In Städten sind die Zellen in der Regel deutlich kleiner und es würden normalerweise 10 W reichen – allerdings nur für die Versorgung im Freien. Die Mobilfunknetzbetreiber wollen jedoch so viele Gespräche wie möglich über ihre Netze abwickeln und bieten deshalb nach Möglichkeit überall auch die Versorgung von Innenräumen, die sogenannte 'Indoor'-Versorgung, an. Zur Versorgung von Innenräumen muss die Sendeleistung jedoch deutlich erhöht werden, da viele Baumaterialien Funkwellen erheblich abschwächen (s.u.). Deshalb liegt in Wohngebieten die Sendeleistung meist bei 25 W.

Eine Mobilfunkstation kann ihre Sendeleistung in den Sprachkanälen an die jeweiligen Erfordernisse für eine gute Funkverbindung anpassen. Das gilt auch für das Handy. Ist der Abstand zwischen Station und Telefon gering und stören keine Hindernisse die Übertragung, senden sowohl Basisstation wie Handy mit minimaler Sendeleistung. Bei größeren Abständen und/oder wenn die Funkwellen Decken oder Wände durchdringen müssen, wird die Sendeleistung hochgeregelt. Beim GSM-Mobilfunk sendet das Handy zu Beginn des Verbindungsaufbaus mit voller Intensität. Die Leistung wird dann schrittweise auf das tatsächlich erforderliche Niveau herunter gefahren.

Um mit einer Station möglichst viele Teilnehmer bedienen zu können, wird beim GSM-Mobilfunk ein technischer Trick, das sogenannte Zeitschlitzverfahren, angewandt (Time Division Multiple Access, TDMA-Verfahren): Jeder Funkkanal wird in acht so genannte Zeitschlitzze oder Zeitfenster von 0,577 Millisekunden (ms) Länge aufgeteilt. Jedem Nutzer wird ein solches Zeitfenster zugewiesen, das ihm alle 4,615 ms zur Verfügung steht. In den anderen Zeitfenstern werden andere Nutzer bedient. So können, je nach Funknetz, bis zu 100 Teilnehmer über eine Station versorgt werden. In Innenstadtbereichen mit einer hohen Teilnehmerdichte kann diese Kapazität schnell ausgelastet sein und wenn sie nicht mehr ausreicht, um alle potentiellen Nutzer zu bedienen, müssen weitere Frequenzkanäle oder zusätzliche Sendeanlagen eingerichtet werden. Letz-

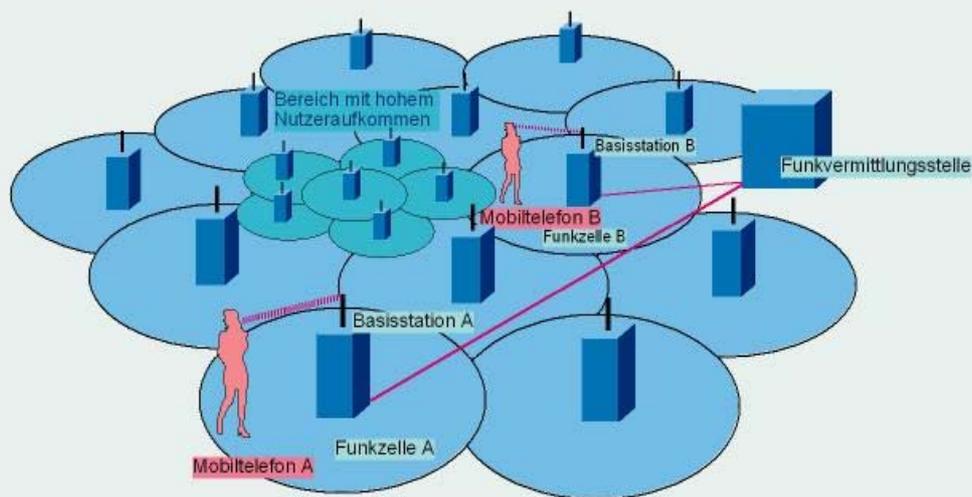


Abbildung 4.5  
 Struktureines Mobilfunknetzes  
 In Bereichen mit einem hohen Nutzeraufkommen werden kleinere Funkzelleneingerichtet, die mehr Sendeanlagen erforderlich sind.

ten Endes hängt die Zahl und Dichte der Basisstationen also von der Nachfrage ab.

Da die Übertragung nur während des zugewiesenen Zeitfensters erfolgt, zeigt die Abstrahlung des Handys eine deutliche Pulsstruktur mit einer Pulsfolgefrequenz von 217 Hz (s. Abbildung 4.6). Diese Frequenz ergibt sich aus der Zeitspanne von 4,615 Millisekunden zwischen den zur Übertragung freigegebenen Zeitfenstern ( $1/4,615 \text{ ms} = 217 \text{ Hz}$ ). In den Sendepulsen ist die Intensität um ein Vielfaches höher als die mittlere Intensität.

Auch an der Basisstation steht nur alle 4,615 Millisekunden ein Zeitfenster für die Übertragung des Funksignals zum Handy zur Verfügung. Wenn nur ein Handy bedient wird, zeigt auch das Signal der Basisstation die 217 Hz-Pulsstruktur. Sobald jedoch in den anderen Zeitfenstern weitere Nutzer bedient werden, verschwindet die 217 Hz-Pulsstruktur mehr oder weniger. Dafür können, je nach

Zahl und zeitlicher Abfolge der verschiedenen Gespräche andere Frequenzen auftreten. Wenn alle Zeitfenster belegt sind, weist das Signal der Basisstation eine Pulsung mit einer Frequenz von 1.733 Hz auf. Diese hat ihre Ursache in dem zeitlichen Abstand der Funkpulse in zwei benachbarten Zeitfenstern von 0,577 Millisekunden ( $1/0,577 \text{ ms} = 1.733 \text{ Hz}$ ). Die 1.733 Hz-Pulsstruktur zeigt sich vor allem, wenn die Intensitäten in allen Fenstern gleich sind. Dies ist im so genannten Organisationskanal der Fall. Dieser Kanal dient der Steuerung und Verwaltung des Datenverkehrs und erfüllt zugleich die Funktion einer Art 'Funkfeuer', das den Handys in der Umgebung die Betriebsbereitschaft der Station anzeigt. Dafür werden ein oder zwei Zeitfenster belegt. Die übrigen Zeitfenster werden entweder für die Abwicklung von Gesprächen genutzt oder mit einem künstlichen Signal aufgefüllt. In dem Organisationskanal erfolgt die Abstrahlung 'rund um die Uhr' in allen Zeitfenstern mit voller Leistung, also auch in den Gesprächszeitfenstern

unabhängig vom Gesprächsaufkommen und der Entfernung zwischen Handys und Station.

## Frequenzen, Leistungen und Zeitstruktur beim UMTS-Mobilfunk

Für den Betrieb des UMTS-Mobilfunks sind die Frequenzbereiche von 1.920 bis 1.980 MHz (Uplink) und 2.110 bis 2.170 MHz (Downlink) vorgesehen. Die UMTS-Signale werden zumindest in der ersten Ausbaustufe nicht die für den GSM-Mobilfunk typische 217 Hz-Pulsstruktur aufweisen, da beim UMTS-Mobilfunk zur Kapazitätserhöhung ein Kodierungsverfahren (Code Division Multiple Access, CDMA-Verfahren) anstelle des Zeitschlitzverfahrens benutzt wird. Im Gegensatz zu den klassischen Funktechnologien (A, B, C und GSM), die auf einer präzisen Trennung der Teilnehmerkanäle im Frequenzbereich und bei digitalen Zeitschlitzverfahren auch im Zeitbereich basieren, arbeiten hier alle Teilnehmer einer Basisstation 'wild gemischt' im gleichen Frequenzkanal, der 4,4 bis 5,0 MHz breit ist. Der Empfänger filtert 'sein' Signal aus dem Signalgemisch, indem er genau die Anteile mit 'seiner' Codierung erkennt; alle anderen Codes sind für ihn wie Rauschen.

Anstelle der Zeit oder einzelner Frequenzen teilen sich die Teilnehmer beim UMTS-Mobilfunk die zur Verfügung stehende Sendeleistung. Wenn nur wenige Verbindungen über eine Basisstation laufen, steht für jeden Teilnehmer eine größere Maximalleistung zur Verfügung, als wenn viele Teilnehmer aktiv sind. Damit ist die Reichweite der Basisstation unter anderem von der Anzahl aktiver Teilnehmer abhängig. Dieser Effekt wird als 'Cell Breathing' bezeichnet; die Zellengröße 'atmet' mit der Anzahl aktiver Teilnehmer. Die Auslegung der Zellengröße - und damit die räumliche Dichte der Basisstationen - orientiert sich an der maximalen Auslastung der Anlage, das heißt am kleinsten Zellenradius. Deswegen wird UMTS zur Flächendeckung mehr Basisstationen erfordern als die GSM-Netze. Durch die Überlagerung der Signale vieler Teilnehmer im selben Frequenzbereich hat das resultierende Gesamtsignal einen dem Rauschen ähnlichen Charakter. Eine schnelle Leistungsregelung sorgt bis zu 1.500 mal pro Sekunde für eine exakte Anpassung an sich ändernde Situationen.

Die maximale Sendeleistung einer UMTS-Basisstation beträgt ca. 20 W. Bei Sprachübertragung (Telefonie) können bis zu 50 Teilnehmer parallel bedient werden. Wenn größere Datenmengen zu übertragen sind, verringert sich die

Zahl der möglichen Teilnehmer. Auch beim Mobilfunk nach UMTS-Standard erfolgt eine Leistungsregelung sowohl auf Seiten der Basisstation wie des Handys, jedoch wird die Leistung schrittweise herauf gefahren, bis die für eine gute Verbindung notwendige Sendeleistung erreicht ist. Es gibt also nicht die bei GSM-Handys übliche Leistungsspitze beim Aufbau der Verbindung.

Prinzipiell ist es möglich, auch beim UMTS-Mobilfunk zusätzlich mit einem Zeitschlitzverfahren zu arbeiten, um die Kapazität gegebenenfalls weiter zu erhöhen. Als Zugriffsverfahren würde hier eine Kombination der bei GSM und UMTS angewandten Verfahren eingesetzt. Dies hätte ein gepulstes Signal wie beim GSM-Mobilfunk zur Folge.

## Funkabstrahlung von Mobilfunkantennen

Die Abstrahlung der Funkwellen erfolgt bei den Basisstationen des GSM- wie des UMTS-Mobilfunks in der Regel über Sektorantennen. Diese bündeln die Wellen horizontal in einer bestimmten Richtung, der so genannten Hauptstrahlrichtung. In der Senkrechten ist der Hauptstrahl noch viel stärker gebündelt als in der Horizontalen (s. Abbildung 4.7). Die Abstrahlung einer Mobilfunkanlage ähnelt grob dem Lichtkegel einer waagrecht gehaltenen Taschenlampe. In der Richtung, in die die Lampe leuchtet, ist es hell, senkrecht zum Lichtstrahl dunkel. Bei Mobilfunkantennen

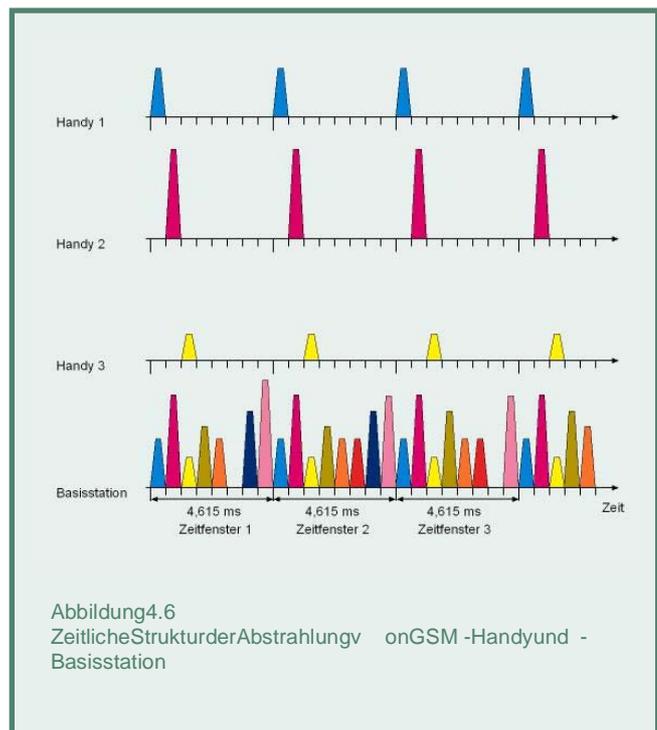


Abbildung 4.6  
Zeitliche Struktur der Abstrahlung von GSM-Handy und Basisstation

ist die Fokussierung der abgestrahlten elektromagnetischen Welle allerdings nicht so perfekt wie bei der Taschenlampe. An der Antenne treten zusätzlich zu dem Hauptabstrahlkegel auch noch so genannte 'Nebenkeulen' oder 'Nebenzipfel' auf, das heißt, dass es auch noch Abstrahlungen in andere Winkelbereiche gibt. Diese sind jedoch in der Regel deutlich schwächer als in der Hauptstrahlrichtung (s. Abbildung 4.7). Die Verstärkung der Intensität des Strahls in der Hauptstrahlrichtung wird als Antennengewinn bezeichnet. Die Breite des Strahlungsbündels wird durch die Halbwertsbreite angegeben. Das ist der Winkelbereich, in dem die Intensität der abgestrahlten Wellen mindestens halb so groß ist, wie die Intensität in der Hauptstrahlrichtung. Die Halbwertsbreite hängt von der Bauart der Antenne ab, sie liegt in der horizontalen Ebene meist zwischen 60 und 120 Grad, in der Vertikalen zwischen 4 und 16 Grad.

Die Abstrahlung erfolgt bei den meisten Mobilfunkanlagen nicht exakt horizontal, sondern die Hauptstrahlrichtung ist etwas nach unten geneigt. Der Neigungswinkel, der so genannte 'Downtilt', beträgt in der Regel einige Grad. Aufgrund der Abstrahlcharakteristik der Mobilfunkantenne ist die Intensität direkt unterhalb der Antenne in der Regel deutlich geringer als in anderen Richtungen.

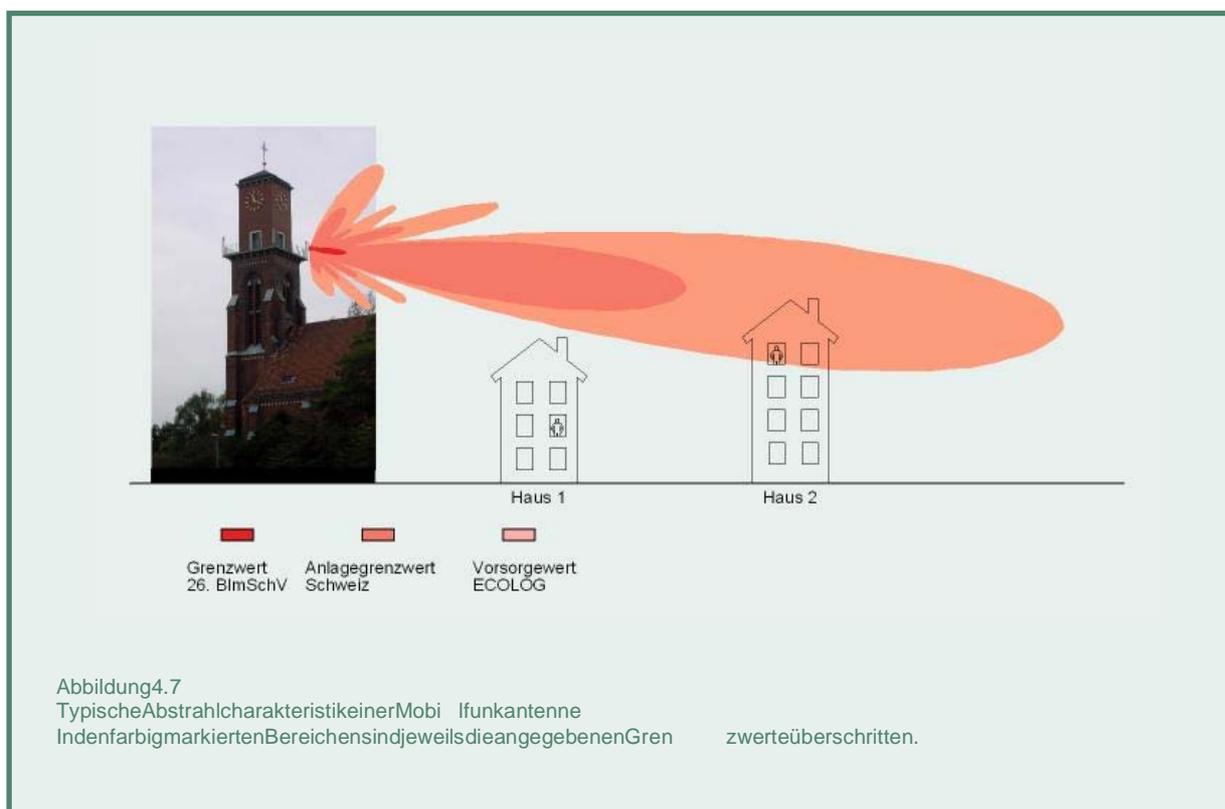
Die meisten Basisstationen sind mit drei Sektorantennen ausgestattet, die so angeordnet und ausgerichtet werden, dass das gesamte Gebiet um die Station abgedeckt wird. Sind in einer Richtung besonders viele Mobilfunkteilnehmer zu erwarten, so werden die Antennen natürlich bevorzugt in diese Richtung ausgerichtet.

In Funkzellen mit insgesamt nur relativ wenigen Teilnehmern, werden gelegentlich auch einfache Stabantennen errichtet. Dieser Antennentyp strahlt in der Horizontalen rundum gleichmäßig ab. Direkt nach unten ist die Abstrahlung dieses Antennentyps deutlich geringer als in der Horizontalen.

Die von mehreren Antennen verursachten Immissionen überlagern sich. Die gesamte Leistungsdichte berechnet sich als Summe der Beiträge der einzelnen Antennen. In Abbildung 4.11 ist das Ergebnis einer Immissionsrechnung für die Umgebung eines Mastes dargestellt, an dem insgesamt 26 Mobilfunkantennen montiert werden sollten.

### Ausbreitung von Funkwellen

Die Funkwellen breiten sich von der Antenne (wie Lichtstrahlen) geradlinig aus. Die Stärke der elektromagnetischen



schon Welle nimmt dabei mit größer werdendem Abstand ab. Sie verhält sich genauso, wie das Licht einer Taschenlampe: Je weiter man sich von der Lichtquelle entfernt, umso größer ist der beleuchtete Kreis, umso geringer ist aber auch die Helligkeit in dem Kreis. Die Abnahme der elektrischen Feldstärke erfolgt linear mit dem Abstand, d.h. wenn man in einem bestimmten Abstand eine bestimmte Feldstärke hat und man vergrößert den Abstand auf das Zehnfache, so nimmt die elektrische Feldstärke auf ein Zehntel ihres vorherigen Wertes ab. Bei der Leistungsdichte erfolgt die Abnahme quadratisch mit dem Abstand: Ein 10-fach größerer Abstand verringert die Leistungsdichte auf 1/100 ihres ursprünglichen Wertes.

Treffen elektromagnetische Wellen auf ein Hindernis, wie eine Wand oder das Laub von Bäumen, kann Folgendes passieren (s. Abbildung 4.8):

- ein Teil der Welle durchdringt das Hindernis, wird aber durch das Phänomen der Brechung in der Regel etwas abgelenkt
- ein Teil der Welle wird im Material absorbiert, d.h. die Welle wird geschwächt
- ein Teil der Welle wird möglicherweise reflektiert.

Der von der Sendeantenne in Abbildung 4.8 ausgehende direkte Funkwellenstrahl S1 wird an der Hauswand reflektiert. Durch den reflektierten Strahl R1 erreicht ein Teil der Funkwellenintensität auch den Bereich hinter Haus 1, von dem aus keine Sichtverbindung zur Antenne besteht. Ein Teil der Intensität des Strahls S1 durchdringt aber auch die Wand des Hauses 2, der Strahl wird dabei geschwächt (ein Teil der Intensität wird absorbiert) und abgelenkt. Eine gewisse Intensität der Funkwelle erreicht aber den Innenbereich von Haus 2 (Strahl G1). Beim Strahl S3 erfolgt wie beim Strahl S1 eine Aufspaltung in reflektierten (R3) und durchgehenden Anteil (G3). Wie groß der durchgehende, der absorbierte und der reflektierte Anteil im Verhältnis sind, hängt von der Frequenz der elektromagnetischen Welle, den Materialeigenschaften der Hindernisse und ihrer Dicke ab. Metalle lassen überhaupt keine elektromagnetischen Wellen durch, normales Glas ist dagegen hoch durchlässig.

An der Kante von Hindernissen kann noch ein weiterer Effekt auftreten, den man 'Beugung' nennt. Er führt dazu, dass auch bei einem Hindernis, das für die elektromagnetische Welle undurchdringlich ist, ein Teil der Intensität der

elektromagnetischen Welle in den Raum hinter dem Hindernis gelangen kann. Der Strahl S2 wird an der Schornsteinkante von Haus 2 abgelenkt (der Beugungseffekt ist hier sehr vereinfacht dargestellt). Dadurch werden auch die unteren Stockwerke von Haus 3 durch den Strahl B2 erreicht. Am Haus 3 wird dieser Strahl wieder in einen reflektierten (R2) und einen durchgehenden Anteil (G2) aufgespalten.

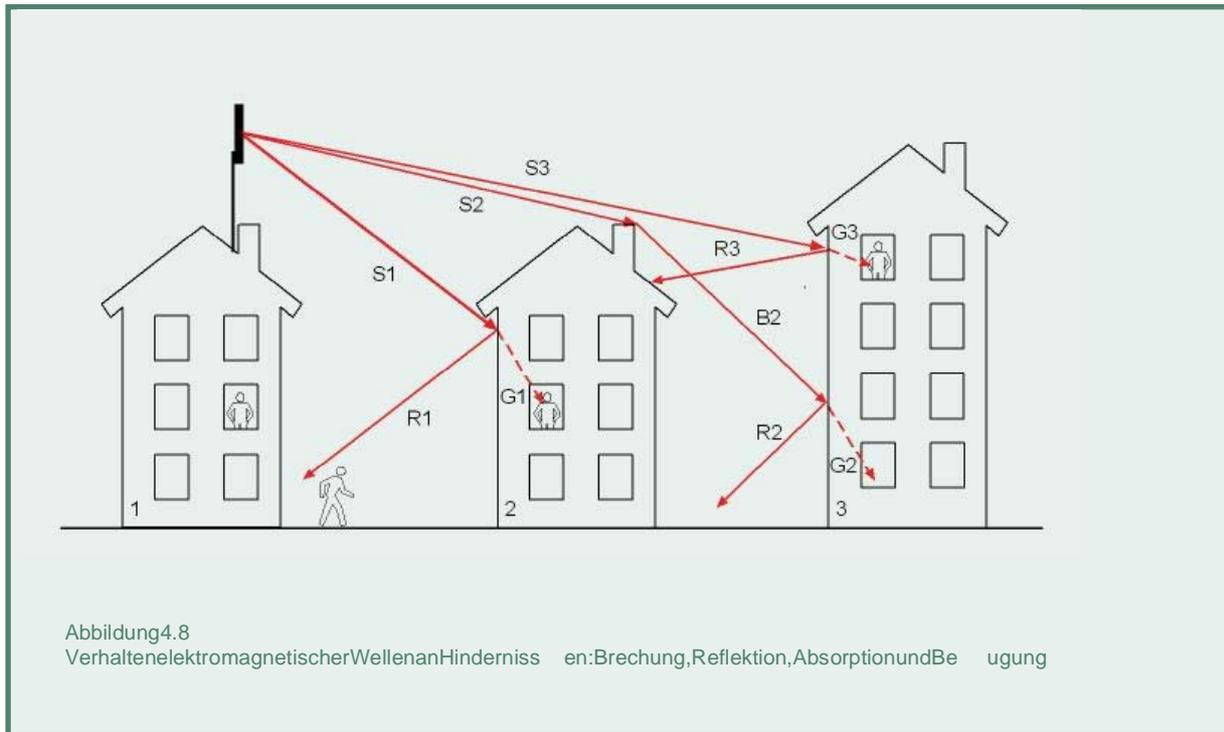
Metallische, sehr glatte Oberflächen sind nahezu perfekte Reflektoren, das heißt die Intensität in der reflektierten Welle ist praktisch genauso groß, wie die Intensität der auftreffenden Welle. Das bedeutet weiter, dass der Raum hinter einer Blechwand gegen direkt auf die Fläche auftreffende elektromagnetische Wellen abgeschirmt ist. Die Abschirmung eines Raumes wird jedoch nur dann hundertprozentig sein, wenn dieser vollständig mit Metallblechen umgeben wird, um auch das Eindringen elektromagnetischer Wellen 'auf Umwegen' durch Reflektion und Beugung zu verhindern. Eine ähnlich gute Abschirmung wie Metallbleche haben auch engmaschige Metallnetze.

Auch in der freien Atmosphäre gibt es einige Effekte, die die Ausbreitung elektromagnetischer Felder beeinflussen. Bei Regen, Schneefall oder wenn viel Staub in der Luft ist, verhindert die Streuung an Wassertropfen, Eiskristallen oder Staubteilchen eine perfekt geradlinige Ausbreitung. Dies führt dann letztlich zu einer Dämpfung der Welle und reduziert ihre Reichweite.

## Elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen

Mobilfunkbasisstationen strahlen elektromagnetische Felder unterschiedlicher Stärke ab. Diese Abstrahlung wird als 'Emission' bezeichnet. Für die Beurteilung möglicher Gesundheitsrisiken sind aber nicht die Emissionen, sondern die Immissionen von Bedeutung, also die Stärke des elektromagnetischen Feldes, das eine Mobilfunkbasisstation an einem bestimmten Ort, z.B. in einer Wohnung oder auf einem Spielplatz, hervorruft. Die Immissionen hängen zum einen von den technischen Parametern der Anlage ab:

- Höhe des Antennenträgers
- Zahl der Antennen
- Anordnung der Antennen
- Ausrichtung der Antennen



- Antennentyp (Abstrahlcharakteristik, Halbwertsbreite, Nebenkeulen jeweils horizontal und vertikal, Downtilt)
- Zahl der Sendekanäle
- effektive Sendeleistung pro Kanal.

Zum anderen werden die Immissionen durch

- den Abstand zwischen dem Ort und dem Standort der Anlage
- den Höhenunterschied zwischen dem Ort und der Antenne
- die Lage/Ausrichtung des Ortes relativ zu den Antennen
- das Vorhandensein von Objekten und ihrer Beschaffenheit, die zu Dämpfung, Reflektion oder Beugung führen können

beeinflusst.

Diese Zusammenhänge sind in der Regel so kompliziert, dass eine verlässliche Aussage zu den elektromagnetischen Belastungen in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation meist nur auf der Grundlage von Messungen oder aufwändigeren Rechnungen möglich ist.

Abbildung 4.9 zeigt das Ergebnis einer Messung der Immissionen in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation.

Es ist zu erkennen, dass die Höhe der Immissionen nicht allein vom Abstand abhängt.

Wie bereits zuvor beschrieben, wird die von Mobilfunkanlagen ausgehende Strahlung durch viele Wandmaterialien stark absorbiert. Die Dämpfung durch normales Fensterglas ist dagegen gering. Dies führt dazu, dass die Immissionen in Räumen, die ein Fenster in Richtung einer Mobilfunkanlage haben, in der Regel deutlich höher sind als in anders ausgerichteten Räumen. Dies ist in Abbildung 4.10 deutlich zu erkennen. In den Räumen auf der Seite der Wohnung, die nicht in Richtung der Mobilfunkanlage weist, sind die Feldstärken vor allem aufgrund der zusätzlichen Absorption durch die Innenwände viel geringer.

### Risiken durch die Felder des Mobilfunks

Bisher liegen nur vergleichsweise wenige epidemiologische Untersuchungen zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung vor. Die Ergebnisse sind nicht einheitlich, sind aber insgesamt als ernst zu nehmende Hinweise auf ein erhöhtes Krebsrisiko (insbesondere Leukämie und Gehirntumoren) als Folge elektromagnetischer Hochfrequenzexpositionen zu werten. Eine verlässliche Aussage über das Gesundheitsrisiko der Nutzer von Mobiltelefonen lässt sich derzeit noch nicht machen, allerdings deuten erste Untersuchungen auf einen Zusammenhang zwischen

dem häufigen Gebrauch von Handys über viele Jahre und dem Risiko, an bestimmten Formen von Gehirntumoren zu erkranken.

Auf der experimentellen Seite gibt es etliche Untersuchungen, bei denen Effekte auf der zellulären Ebene oder patho-physiologische Wirkungen nachgewiesen wurden, die unter anderem im Hinblick auf die Entstehung von Krebs bedeutsam sein könnten. Viele dieser Effekte wurden bereits für Intensitäten nachgewiesen, die deutlich unter der Schwelle für thermische Effekte und den derzeit geltenden Grenzwerten lagen.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder werden in Kapitel 2.3 ausführlicher dargestellt.

## Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch den Mobilfunk

### Mobilfunkanlagen

Angesichts der in einigen Bereichen vorliegenden wissenschaftlichen Befunde einerseits und der nach wie vor erheblichen Unsicherheiten bei der Bewertung der Gesundheitsrisiken durch nicht-thermische Hochfrequenz-Intensitäten andererseits sollten die durch den Mobilfunk verursachten Expositionen der Bevölkerung so gering wie möglich gehalten werden. Die Gesamtexposition durch Funksendeanlagen sollte im Freien  $0,01 \text{ W/m}^2$  bzw.  $2 \text{ V/m}$  nicht überschreiten (s. Kapitel 3.1). Diese Vorsorgewerte liegen deutlich unterhalb der derzeit geltenden gesetzlichen Grenzwerte.

Um die Belastungen der Bevölkerung durch Mobilfunkanlagen zu minimieren, ist eine sorgfältige Standortplanung notwendig. Eine am Gedanken der Vorsorge orientierte

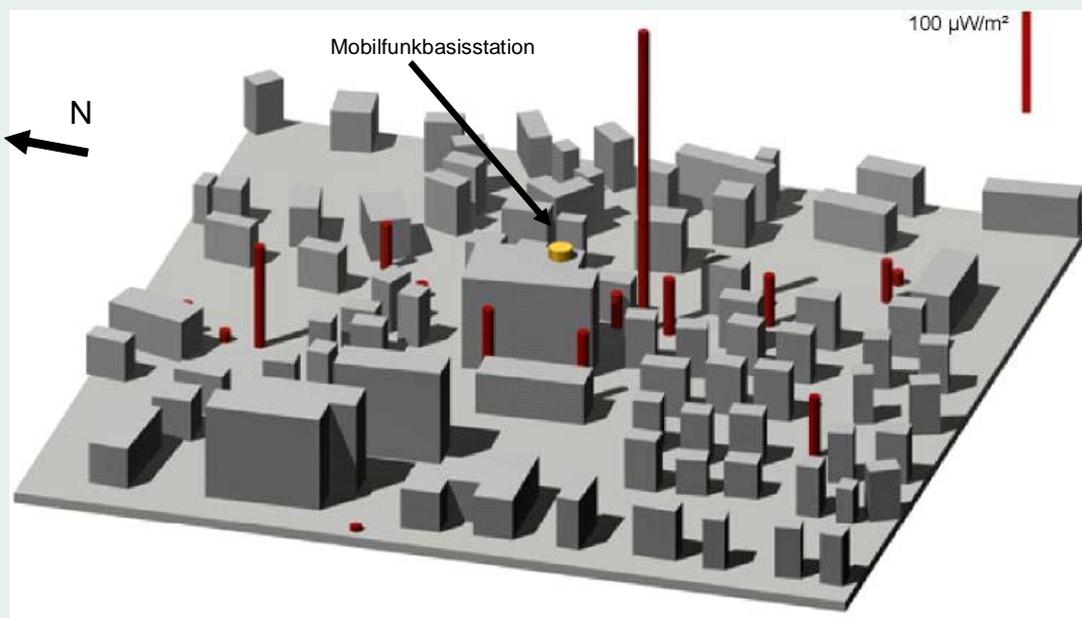


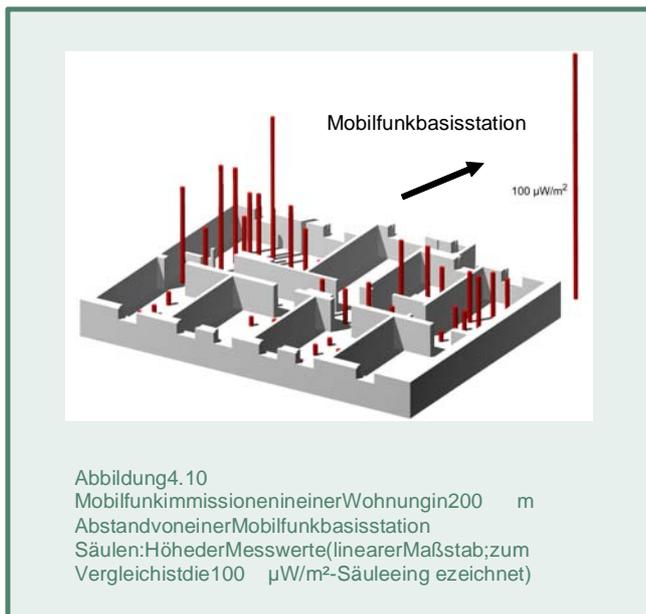
Abbildung 4.9

Mobilfunkimmissionen in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation in einem Wohngebiet mit überwiegend zweigeschossiger Ein- und Zweifamilienhausbebauung und einzelnen mehrgeschossigen Gebäuden

Kurzer Zylinder auf dem Gebäude in der Bildmitte: Standort der GSM1800 - Mobilfunkbasisstation auf einem sechsgeschossigen Wohnhaus (Höhe der Antennenunterkante 25 m, Hauptstrahlrichtungen  $90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$  gegen Nord, Sendeleistung pro Sektor 31 W)

Säulen: Höhe der Messwerte (linearer Maßstab; zum Vergleich ist die  $100 \text{ W/m}^2$ -Säule eingezeichnet)

$100 \text{ W/m}^2$ -Säule eingezeichnet



Planung muss insbesondere für Bereiche mit empfindlichen Nutzungen (Wohngebiete, Schulen, Kindergärten, Kranken- und Pflegeeinrichtungen sowie andere Bereiche, in denen sich Menschen über längere Zeiträume aufhalten) erfolgen. Auch bei der Wahl der technischen Parameter (Antennentyp, Ausrichtung der Antennen, Downtilt, Montagehöhe, Sendeleistung) gibt es Möglichkeiten, die Expositionen der Anwohner stark zu reduzieren.

Um für das jeweilige Umfeld unter Vorsorgegesichtspunkten eine Optimierung der Standorte und der technischen Konfigurationen zu erreichen, müssen schon in der Planungsphase die nach Inbetriebnahme der Anlage zu erwartenden Immissionen in der Umgebung für verschiedene planerische und technische Varianten bestimmt werden. Für die Immissionsprognose bei geplanten Anlagen kommen zwei Verfahren in Frage:

- der Aufbau von Testsendern und Messung der Immissionen
- die Berechnung der Immissionen.

Der Einsatz von Testsendern ist sehr aufwändig und es ist praktisch unmöglich, mehrere Standort- und Anlagenvarianten zu testen. Deshalb ist rechnerischen Immissionsprognosen in der Regel der Vorzug zu geben. Zur Berechnung der Immissionen werden die technischen Daten der geplanten Anlage(n) und gegebenenfalls weiterer Anlagen in der Umgebung, die zu den Immissionen beitragen können, sowie Informationen über die Umgebung in entspre-

chende Computerprogramme eingegeben. Bei der Berechnung ist von dem – unter Immissionsgesichtspunkten – schlimmsten Fall auszugehen. Abbildung 4.11 zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung. In einigen Bereichen würde der oben angegebene Vorsorgewert bei Realisierung des Standorts in der geplanten Weise in den Obergeschossen der Wohnhäuser überschritten. Dies ließe sich vermeiden durch

- Wahl eines ganz anderen Standorts
- Verteilung der Antennen auf mehrere Standorte
- Wahl geeigneter technischer Parameter (s.o.).

Die Berechnungen der Immissionen von Funkseideanlagen haben zwei Schwachpunkte:

- Dämpfungen durch Hindernisse können zwar relativ einfach berücksichtigt werden, es ist aber sehr schwierig, auch alle möglichen Effekte durch Reflexion, Beugung und Streuung der elektromagnetischen Wellen zu berechnen.
- Es ist meist schwierig, alle Beiträge anderer Sendeanlagen oder gar von kleinen Geräten (schnurlose Telefone, WLAN usw.) exakt zu berücksichtigen; sind nennenswerte Beiträge anderer, bereits in Betrieb befindlicher Quellen zu erwarten, müssen diese ggf. durch Messung bestimmt werden.

Für die Durchführung der Berechnungen ist nicht nur ein geeignetes Computerprogramm erforderlich, sondern auch die entsprechende Fachkunde. Außerdem müssen die technischen Daten der Anlage(n) vom jeweiligen Mobilfunknetzbetreiber zur Verfügung gestellt werden.

Für komplexe Immissionssituationen, wenn viele Quellen zu den Immissionen beitragen und/oder Reflexion, Beugung und Streuung möglicherweise einen starken Einfluss auf die Immissionen in sensiblen Bereichen haben, kann eine Kontrollmessung nach Errichtung der Anlage(n) sinnvoll sein.

Bei bereits im Betrieb befindlichen Anlagen können die Immissionen durch Messung ermittelt werden. Eine Messung liefert jedoch zunächst nur einen Momentanwert. Für GSM-Anlagen ist es jedoch möglich, die Immissionen für den Fall der Vollausslastung der Anlage(n) aus den Messdaten zu ermitteln. Dazu müssen die Messungen jedoch mit einem Spektrumanalysator durchgeführt werden und es

werden unter Umständen zusätzlich Informationen über die Kanalbelegung und darüber, ob besondere Funkverfahren (frequency hopping) angewandt werden, gebraucht. Für UMTS-Anlagen ist eine spezielle Messausrüstung erforderlich.

Für aussagekräftige und reproduzierbare Hochfrequenzmessungen der digitalen Mobilfunksysteme sind eine professionelle Messgeräteausstattung und profunde Kenntnisse der Hochfrequenz-Messtechnik unerlässlich. Solche Messungen sind daher nicht billig. Messgeräte aus dem Hobby- und Amateurbereich oder 'Elektrosmog-Alles-Messer' sind hierfür absolut ungeeignet.

Gibt man einen Auftrag an ein kompetentes Messinstitut, so sollte die Aufgabenstellung festgelegt werden:

- Art und Umfang der Messung (Sollen allein die Beiträge von GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen oder auch weiterer Sendeanlagen erfasst werden?)
- Messorte (Wo ist mit den höchsten Immissionen zu rechnen?)
- Grundlage für die Beurteilung der Messwerte (Sollen die Immissionen lediglich anhand der gesetzlichen Grenzwerte oder auch von Vorsorgewerte bzw. niedrigeren Grenzwerten anderer Staaten, wie der Schweiz, bewertet werden?).

Meist sind Berechnungen der Immissionen weniger aufwändig und daher kostengünstiger als Messungen und da sie in den meisten Fällen auch hinreichend genaue Immissionsdaten liefern, werden die Immissionen auch bei bereits im Betrieb befindlichen Anlagen oft anhand der technischen Daten berechnet.

Wenn es nicht möglich ist, die Immissionen durch planerische oder technische Maßnahmen soweit wie erforderlich zu reduzieren, bleibt nur die Abschirmung der betroffenen Gebäude oder Räume. Hierfür gibt es unterschiedlichste Möglichkeiten und Materialien, von abschirmenden Putzen, über Abschirmtapeten bis zu Gardinenmaterialien mit eingewebten Metallfäden. Viele Baumaterialien haben ohnehin eine stark dämpfende Wirkung (s. Kapitel 3.3). Die richtige Anbringung von Abschirmungen erfordert jedoch Fachkenntnisse. Sie ist daher meist aufwändig und kostspielig. Daher sollte durch eine Messung immer erst die Notwendigkeit einer solchen Maßnahme geprüft werden.

Auch nach erfolgter Abschirmung ist eine Messung zur Überprüfung der Wirksamkeit zu empfehlen.

Es gibt eine Reihe von Anbietern sowohl von Messungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder wie von Beratungen zur Verminderung von Hochfrequenzbelastungen. Da nicht alle dieser Angebote seriös sind, ist es am besten, sich bei einer Verbraucherzentrale vor Ort über vertrauenswürdige und fachkundige Anbieter zu informieren.

## Mobiltelefone

Wer auf das Handy nicht verzichten kann oder will, sollte seine persönliche Feldbelastung durch umsichtiges Verhalten verringern:

- In Situationen, in denen genauso gut mit einem Festnetz-Telefon wie mit einem Handy telefoniert werden kann, sollte das Festnetz genutzt werden.
- Telefonate per Handy sollten kurz gehalten und nicht benötigte Handys ausgeschaltet werden.
- Beim mobilen Telefonieren sollten möglichst Headsets benutzt werden. Wegen des größeren Abstandes zwischen Kopf und Antenne verringert sich die Belastung deutlich. Ähnliches gilt beim Versenden von Short-Messages (SMS).
- Bei schlechtem Empfang sollte möglichst nicht mit dem Handy telefoniert werden. Die Leistung, mit der das Handy sendet, richtet sich nach der Güte der Verbindung zur nächsten Basisstation. Autokarosserien verschlechtern die Verbindung für Handys ohne Au-



Mobiltelefone verursachen relative hohe elektromagnetische Exposition des Gehirns.

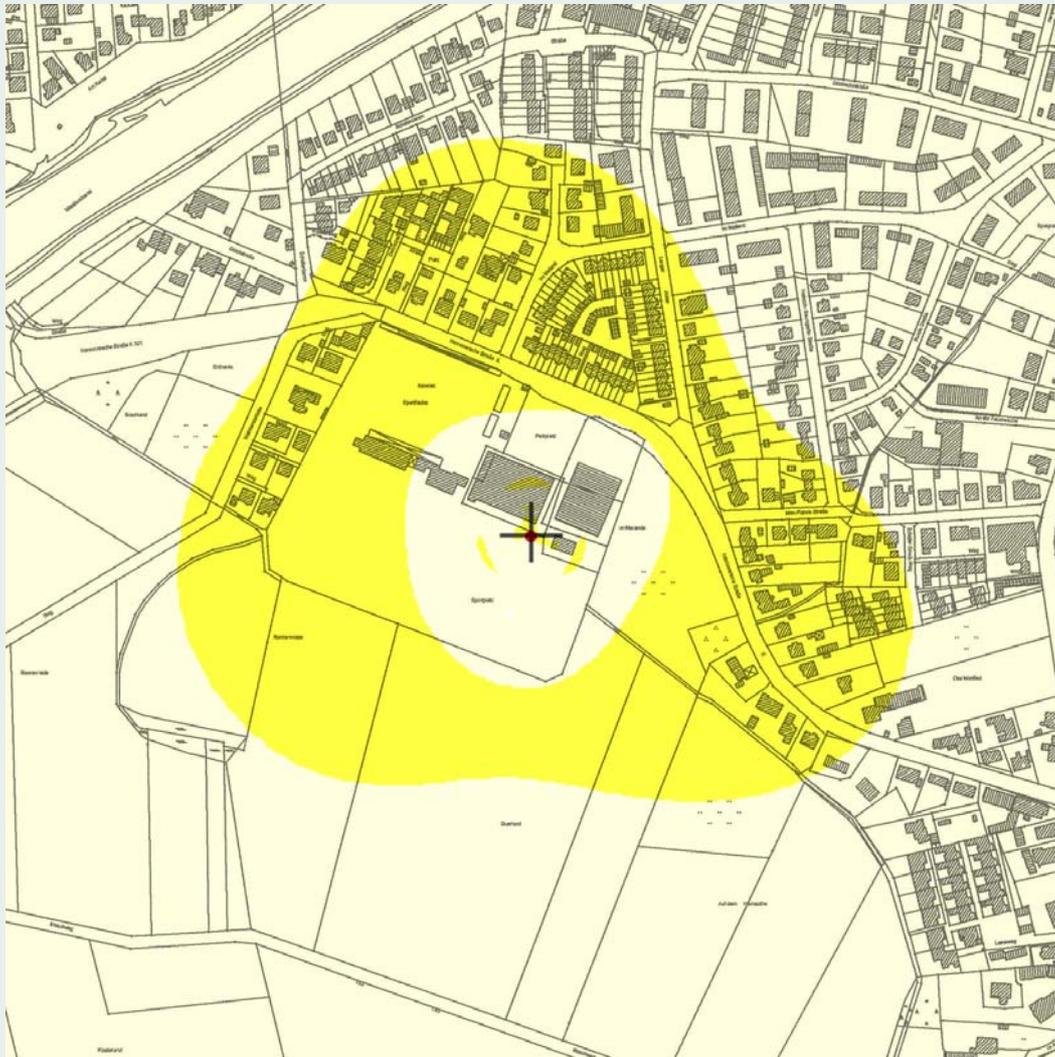


Abbildung 4. 11  
 Immissionen in 11 m Höhe über Grund in der Umgebung eines Mobilfunkstandorts mit 26 Mobilfunkantennen  
 (Montagehöhen 35 bis 39 m)

- 0,001 bis 0,01 W/m<sup>2</sup> (unterhalb des ECOLOG -Vorsorgewerts, s. Kapitel 3)
- 0,01 bis 0,1 W/m<sup>2</sup> (oberhalb des ECOLOG -Vorsorgewerts)

Benutzer, die Handys senden deshalb oft mit voller Leistung.

- Beim Kauf von Handys sollte auf einen möglichst geringen SAR-Wert geachtet werden. Der SAR-Wert gibt an, wie viel Energie pro Zeit vom Kopf absorbiert wird. Er sollte möglichst weit unter dem höchstzulässigen

Wert von 2 W/kg liegen. Auch eine feinstufige Leistungsregelung (Power-Management), die die Sendeleistung an die Güte der Verbindung zur nächsten Basisstation anpasst, trägt zur Verminderung der Belastungen bei.

**Kinder sollten Handys nur in Ausnahmesituationen benutzen**, da der heranwachsende Organismus besonders empfindlich ist und Kindern zudem lange Expositionszeiten im Laufe ihres Lebens bevorstehen.

## 4.9 Schnurlose Telefone

Bei schnurlosen Telefonen erfolgt die Übertragung zwischen der an das Festnetz angeschlossenen Basisstation und den Mobilteilen per Funk. Die meisten schnurlosen Telefone funktionieren heute nach dem DECT-Standard (DECT: Digital Enhanced Cordless Telecommunications). DECT-Basisstation und -Mobilteil bilden ein Mobilfunknetz im Kleinen, allerdings mit deutlich niedrigeren Sendeleistungen (s. Tabelle 4.7). DECT-Geräte nutzen ähnliche Frequenzen wie der GSM-Mobilfunk. In dem DECT-Frequenzbereich von 1880 bis 1900 MHz gibt es insgesamt zehn Frequenzkanäle. Zur Vermeidung von Störungen, kann die Übertragungsfrequenz zwischen diesen hin und her springen ('Frequency-Hopping'). Die zeitlichen Abstrahlungsmuster der DECT-Geräte ähneln ebenfalls denen der GSM-Mobilfunkanlagen und -telefone: Die Mobiltelefon-Basisstation sendet wie eine Mobilfunk-Basisstation dauernd (sie gibt alle 10 ms einen Synchronisationspuls ab), das Mobilteil emittiert nur während des Gesprächs. Wie beim GSM-Mobilfunk werden die Signale gepulst abgestrahlt. Die Pulsfrequenz beträgt beim DECT-Telefon 100 Hz, beim GSM-Mobilfunk 217 Hz. Anders als beim Mobilfunk weisen bei DECT-Telefonen die Abstrahlungen beider Komponenten, Basisstation und Mobilteil, die gleiche Pulsfrequenz auf.

In Tabelle 4.7 werden DECT-Telefone mit dem GSM 1800-Mobilfunk verglichen. Neben den technischen Daten sind auch Wertebereich für die Immissionen angegeben, die in bestimmten, alltagsrelevanten Abständen zu den Anlagen auftreten. Die Angaben zu den DECT-Immissionen beruhen auf Messungen an normalen Telefonanlagen dieses Typs. Deren Antennen haben praktisch keine Richtwirkung. Beim Betrieb größerer DECT-Netzwerke werden jedoch auch Antennen mit Richtwirkung eingesetzt. Bei diesen können die Immissionen im Hauptstrahl um mehr als einen Faktor 10 höher ausfallen als die in der Tabelle angegebenen Werte.

Schnurlose Telefone nach dem CT1+-Standard stellen eine Alternative zu DECT-Telefonen dar. Sie nutzen die Fre-



Messungen in Wohnungen zeigen, dass schnurlose Telefone nach dem DECT-Standard, die in der untersuchten Wohnung oder einer Nachbarwohnung installiert sind, zu erheblichen Dauerexpositionen führen können.

quenzbereiche von 885 bis 887 MHz (Mobilteil) und 930 bis 932 MHz (Basisstation). Ihr Vorteil besteht darin, dass sie im Bereitschaftsbetrieb anders als DECT-Telefone keine Strahlung aussenden. Die Betriebserlaubnis für CT1+-Geräte erlischt jedoch Ende 2008.

### Risiken durch die Felder von schnurlosen Telefonen

Wenn in einer Wohnung oder der unmittelbaren Nachbarschaft ein schnurloses DECT-Telefon betrieben wird, stellt dieses, wie Messungen zeigen, oft die stärkste Quelle hochfrequenter Felder dar. Die von den Basisstationen verursachten Dauerexpositionen liegen in der Regel deutlich über den Expositionen, die durch Mobilfunkbasisstationen in der Nachbarschaft verursacht werden. Nur in Fällen, bei denen sich die Wohnung im Hauptstrahl einer Mobilfunkantenne befindet und der Abstand zu dieser gering ist, überwiegen unter Umständen die Mobilfunkimmissionen. Die Felder, die von schnurlosen Telefonen und ihren Basisstationen verursacht werden, erreichen jedoch nicht die Stärke der Felder von Mobiltelefonen.

Es gibt aufgrund epidemiologischer Untersuchungen deutliche wissenschaftliche Hinweise, dass die von Mobiltelefonen emittierten Felder das Risiko für die Entstehung bestimmter Formen von Hirntumoren erhöhen. Diese Befunde können jedoch nicht ohne weiteres auf die Expositionssituation im Zusammenhang mit der Nutzung von schnur-

Tabelle 4.7

Technische und Immissionsdaten von DECT -Telefonen im Vergleich mit dem GSM1800 -Mobilfunk

	DECT Basisstation	DECT Mobilteil	GSM1800 Basisstation	GSM1800 Handy
Frequenz [MHz]	1880 -1900	1880 -1900	1805 -1880	1710 -1785
Maximale Sendeleistung [W]	0,25	0,25		1,0
Typische Sendeleistung [W] 4 Kanäle, je 10 [W]			40	
Mittlere Sendeleistung [W] (Gespräch)	pro Mobilteil 0,01		15	
Mittlere Sendeleistung [W] (ohne Gespräch)	pro Mobilteil 0,0025		10	
Sendart	dauernd	nur während Gespräch	dauernd	nur während Gespräch
Pulsfrequenz [Hz]	100	100	1733	217
Mittlere Immissionen [W/m <sup>2</sup> ]				
1m Abstand	0,02 -0,10			
50m Abstand			0,04	

losen Telefonen übertragen werden, da deren Felder aufgrund der geringeren Sendeleistung deutlich schwächer sind. Sie erreichen jedoch Werte, die in Laboruntersuchungen am Menschen zu Befindlichkeitsstörungen und Beeinflussungen kognitiver Funktionen führten. Zudem gibt es Hinweise auf eine Verstärkung der Zellvermehrung, die, wenn sie entsprechend geschädigte Zellen betrifft, möglicherweise die Entwicklung von Tumoren fördert. Es ist daher nicht auszuschließen, dass insbesondere die von den Basisstationen von schnurlosen Telefonen verursachten Dauerauspostitionen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können.

Eine ausführlichere Darstellung des wissenschaftlichen Erkenntnis zu den gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder findet sich im Kapitel 2.3.

### Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch schnurlose Telefone

Da DECT-Telefone erheblich zur Gesamtexposition beitragen können, sollten auch für diese Technologie die Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zur Minimierung der Expositionen der Bevölkerung unbedingt beachtet (s.

Kapitel 3). Die Konsequenzen, die Staat und Industrie aus den Empfehlungen der SSK eigentlich ziehen müssten, sind in Kapitel 3 beschrieben. Eine wichtige technische Maßnahme wäre die Unterbindung der Dauerabstrahlung durch die Basisstationen. Eindeutige Vorgaben von staatlicher Seite sind derzeit jedoch nicht zu erwarten und bisher zeigen nur einzelne Unternehmen die Bereitschaft, dieses Problem anzugehen. So bleibt es den Bürgern überlassen, durch ihr Verhalten dazu beizutragen, die Expositionen so gering wie möglich zu halten. Dazu gibt es einige Möglichkeiten:

- Die Notwendigkeit eines schnurlosen Telefons kritisch überprüfen: Ein schnurloses Telefon ist zwar bequem, aber ein klassisches Telefon erfüllt den Kommunikationszweck genauso. Insbesondere auch in Büros sind schnurlose Telefone oft unnötig.
- Abstand zu den Basisstationen halten: Die Basisstationen sollten soweit wie möglich von der nutzenden, aber natürlich auch von jeder anderen, Person platziert werden (die Leistungsdichte nimmt quadratisch mit dem Abstand zur Sendeantenne ab).
- Strahlungärmere Telefone kaufen: Es gibt einzelne Hersteller, die DECT-Telefone anbieten, die im Bereit-

schaftsbetrieb keine Strahlung aussenden. Einschlägige Gerätetests geben hierzu Informationen. Die Testergebnisse zeigen zudem, dass es DECT-Telefone gibt, die im Vergleich mit anderen Geräten deutlich geringere Expositionen verursachen.

- **Schutzbereiche abschirmen:** Wenn Expositionen nicht durch die vorgenannten Maßnahmen vermieden oder reduziert werden können (z.B. weil der Nachbar ein DECT-Telefon betreibt, das trotz der Zwischenwände erhebliche Immissionen in der eigenen Wohnung verursacht), bleibt immer noch die Möglichkeit, besonders zu schützende Bereiche (Kinderzimmer, Schlafzimmer und andere Daueraufenthaltsbereiche) abzuschirmen. Hierfür gibt es unterschiedlichste Möglichkeiten und Materialien (s. Kapitel 3).

## 4.10 WLAN und Bluetooth

### WLAN

Drahtlose Computer-Netzwerke sind seit 1992 im Einsatz. Bei den ersten Geräten lagen die Datenübertragungsraten noch deutlich unter 1 MBit/s. Zudem fehlte eine Standardisierung, so dass nur Geräte eines Herstellers untereinander kommunizieren konnten. Dies änderte sich mit der Verabschiedung des herstellerunabhängigen IEEE 802.11-Standards durch das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) in den USA. Heute werden drahtlose lokale Netzwerke häufig unter dem Sammelbegriff WLAN (Wireless Local Area Network) zusammengefasst. Dieser Begriff bezeichnet streng genommen jedoch nur Funknetzwerke, die auf dem Standard IEEE 802.11 aufbauen. Der WLAN-Standard hat nicht nur beim Aufbau lokaler Computer-Netzwerke eine große Verbreitung gefunden, sondern hat sich auch für so genannte Hot Spots, öffentliche Plätze und Gebäude mit einem hohen Aufkommen an Nutzern des Internet, durchgesetzt.

Für IEEE 802.11-WLAN wurden drei Arten der Datenübertragung definiert: eine Infrarotübertragung und zwei Funkübertragungen. Nach IEEE 802.11 erfolgt die Funkübertragung im 2,4 GHz-ISM-Band, das in vielen Ländern für industrielle, wissenschaftliche und medizinische (ISM) Zwecke lizenzfrei genutzt werden kann. Da höhere Frequenzen höhere Datenübertragungsraten erlauben, wurde auch ein WLAN-Standard für das 5 GHz-Band geschaffen. Das

5 GHz-Band ist ebenfalls lizenzfrei. Es ist bisher noch nicht stark ausgelastet, allerdings operieren auch Geräte nach dem HIPERLAN/2-Standard (s.u.) in diesem Frequenzbereich. In der Nutzung dominieren bisher immer noch Anwendungen im 2,4 GHz-Band.

Die Funkübertragung ist im Vergleich mit der Übertragung über Kabel sehr störanfällig und kann zu hohen Fehlerraten führen. Hauptfehlerquellen sind:

- 'Kollisionen' mit Funksignalen von anderen WLAN-Stationen
- Funk- und Störsignale, die von anderen Geräten ausgehen, die den gleichen Frequenzbereich nutzen (Mikrowellenherde, Bluetooth)
- Rauschen
- Interferenzen.



WLAN-Access-Points können im Nahbereich erheblich zu den HF-Dauerexpositionen beitragen.

Vom European Telecommunication Standards Institute (ETSI) wurde mit HIPERLAN ein Standard für Funknetzwerke mit hohen Datenübertragungsraten entwickelt. Die Arbeiten an der ersten Spezifikation, HIPERLAN/1, wurden 1996 abgeschlossen. Obwohl HIPERLAN/1 gegenüber IEEE 802.11 einige Vorteile bietet, konnte sich der Standard nicht durchsetzen und wurde von ETSI zu HIPERLAN/2 weiterentwickelt. Der seit dem Jahr 2000 verfügbare Standard HIPERLAN/2 unterstützt nicht nur traditionelle drahtlose Netzwerke im Büro- und Heimbereich, sondern HIPERLAN/2 wurde auch als Basis für drahtlose Zugangsnetzwerke für Weitverkehrsnetze, wie UMTS, konzipiert, vor allem für Multimedia-Anwendungen mit hohen Qualitätsanforde-

rungen. HIPERLAN/2 kann auch eingesetzt werden, um die Zugangskapazität zu Mobilfunknetzen zu erhöhen, z.B. um Hot Spots abzudecken, für die eine direkte Erschließung durch ein GSM-Mobilfunknetz aufgrund der hohen Teilnehmerzahlen schwierig ist.

HIPERLAN/2 nutzt das ISM-Band bei 5 GHz (5,15 bis 5,35 GHz oder 5,47 bis 5,725 GHz).

Bei Funk-Netzwerken werden zwei Betriebsweisen unterschieden:

- Im **Ad hoc-Modus** kommunizieren gleichberechtigte Rechner miteinander (s. Abbildung 4.12). Verbindungen sind nur zwischen Rechnern möglich, die sich innerhalb der jeweiligen Reichweiten befinden. Sobald mehrere PCs mit Funknetzwerken in Reichweite zueinander gebracht werden, können sie ein Ad hoc-Netzwerk bilden. Ad hoc-Netze ermöglichen einen schnellen, unkomplizierten und kostengünstigen Netzaufbau.
- Im **Infrastruktur-Modus** erfolgt die Anbindung mobiler Rechner über feste Basisstationen (s. Abbildung 4.13). Diese so genannten Access Points organisieren die drahtlosen Verbindungen zu und zwischen den mobilen Rechnern, bieten den mobilen Stationen in der Regel aber auch einen Zugang zu einem stationären Netzwerk. Access Points sorgen dafür, dass Daten von und zum Festnetz übertragen werden und gleichzeitig Datenaustausch in den Funkzellen stattfinden kann. Sie übernehmen damit eine ähnliche Funktion wie ein Hub oder Switch in einem drahtgebundenen Netz (LAN). In der einfachsten Version besteht ein Funknetz aus einem Access Point und mehreren über Funk angeschlossenen Stationen. Auf Anwenderseite ist eine Funknetzwerkarte für Desktop-Computer bzw. Notebook erforderlich. Zudem gibt es spezielle Geräte wie PDA (Personal Digital Assistant) mit eingebauter Unterstützung für Funknetze.

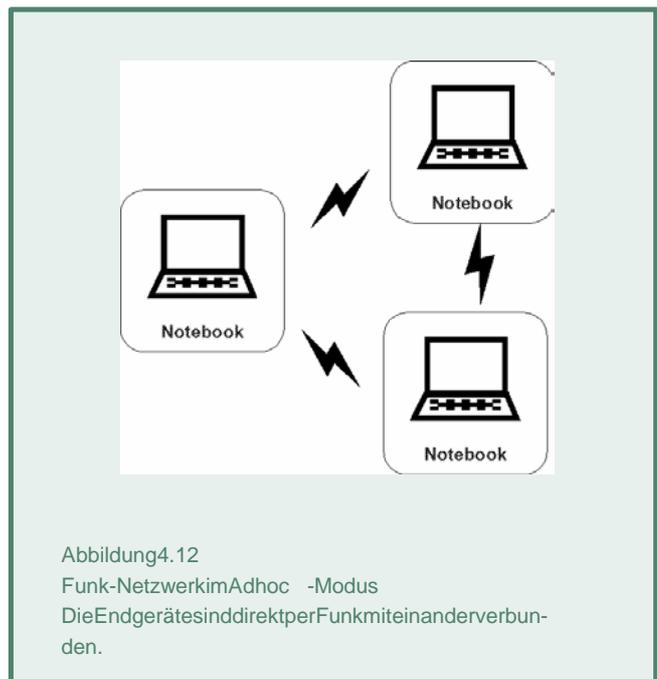
Die Größe einer Funkzelle hängt von der maximalen Reichweite einer Funk-Netzwerkarte und der angeschlossenen Antenne bzw. der Sendeleistung eines Access Points und der Abstrahlcharakteristik seiner Antenne ab. Um eine weitgehend flächendeckende Versorgung zu erreichen, ist ein möglichst dichtes Netz von überlappenden Funkzellen erforderlich. Bewegt sich ein Nutzer, so wird er von Funkzelle

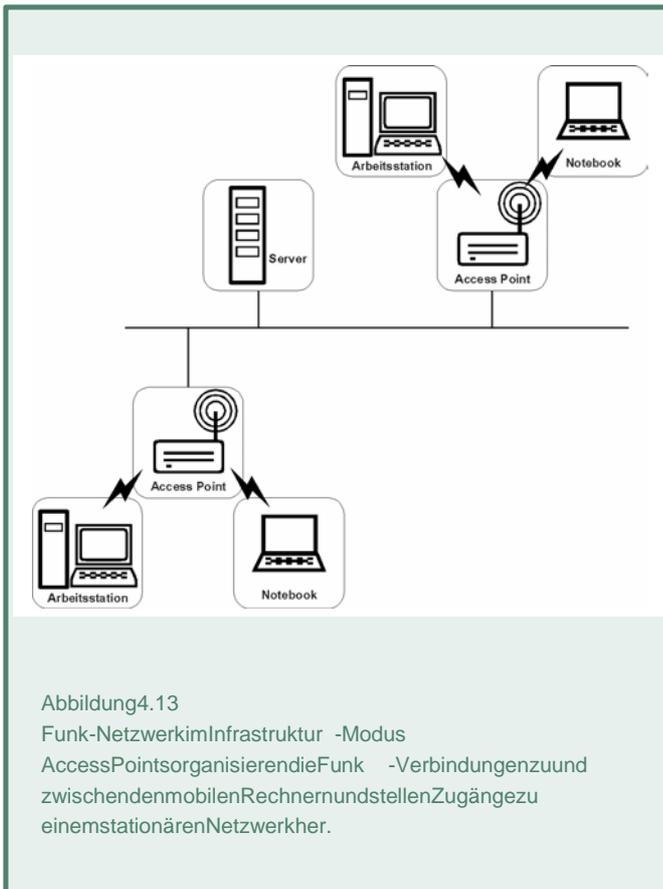
zu Funkzelle weiter gereicht, ohne dass die Verbindung zum Netzwerk abbricht. Dieses Wandern der Nutzer wird als Roaming bezeichnet.

Die in Deutschland für Funk-Netzwerke freigegebenen Frequenzbereiche und die maximal zulässigen Strahlungsleistungen unter Berücksichtigung des Antennengewinns (EIRP) sind in Tabelle 4.8 aufgeführt. Innerhalb von Gebäuden lassen sich damit Reichweiten von etwa 30 m, außerhalb von Gebäuden von etwa 300 m (2,4 GHz) bzw. 150 m (5 GHz) erreichen.

Der EIRP-Wert berücksichtigt sowohl die Sendeleistung als auch den Antennengewinn. Durch den Einsatz von Antennen mit Richtcharakteristik können auf freien Strecken auch größere Entfernungen überbrückt werden. Dabei ist jedoch die Obergrenze für den EIRP-Wert zu beachten, das heißt, dass bei Verwendung einer Antenne mit stark gerichteter Abstrahlung bzw. hohem Antennengewinnfaktor unter Umständen die Sendeleistung reduziert werden muss, um den zulässigen EIRP-Wert einzuhalten. Diese Vorschrift wird allerdings oft ignoriert (s.u.).

Bei Funk-Netzwerken sind zwei Hauptkomponenten und jeweils zwei Emissionssituationen zu unterscheiden:





### Access Point, Ruhezustand

Der Access Point sendet im Ruhezustand alle 1/10 Sekunde ein Erkennungssignal aus, das heißt das Erkennungssignal ist mit einer Frequenz von 10 Hz pulsmoduliert. Dieses so genannte Bakensignal hat eine Länge von 0,46 ms. Im Ruhebetrieb beträgt die mittlere Leistung daher etwa 1/217 der maximalen Sendeleistung.

### Access Point, Sendebetrieb

Die Datenübertragung erfolgt in einzelnen Datenpaketen bzw. durch eine Folge von Funkpulsen. Die Frequenz der Funkpulse steigt mit zunehmender Menge der zu übertragenden Daten. Bei Vollausslastung des Systems erfolgt praktisch ein kontinuierlicher Sendebetrieb. Die Spitzenintensität der Datenpulse entspricht der Höhe der Bakensignale (s. Abbildung 4.14).

### Endgerät, Ruhezustand

Funk-Netzwerk-Karten-Treiber, die über eine Stromsparfunktion verfügen, deaktivieren die Karte, so lange kein Zugriff auf das Funk-Netzwerk erfolgt (schlafender Zustand, Sleep Mode). Wenn eine Übertragung ansteht, wird

die Funk-Hardware wieder aktiviert. Begibt sich eine Station in den schlafenden Zustand, werden alle an diese Station gerichteten Datenpakete vom Datenversender zwischengespeichert. Um den Empfang der Daten zu ermöglichen, muss sich die Station regelmäßig aus dem schlafenden Zustand in den wachen Zustand begeben und die zwischengespeicherten Datenpakete abholen.

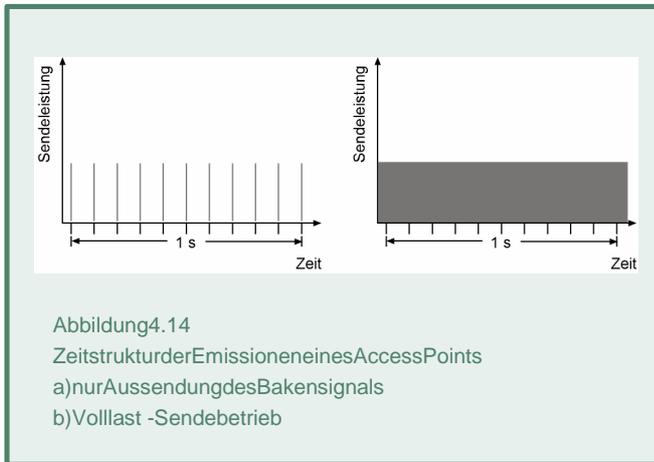
Im Infrastruktur-Mode ist das regelmäßige 'Erwachen' an die Aussendung der Bakensignale des Access Points gekoppelt. Da der Station bei der Anmeldung bzw. mit früher empfangenen Bakensignalen des Access Points auch Informationen zur Zeit-Synchronisation im Netzwerk übermittelt wurden, kann sie berechnen, wann der Zeitpunkt für ein Bakensignal gekommen ist, und sich in den Wachzustand begeben. Im Bakensignal sind neben dem Zeit-Synchronisationssignal alle Stationen verzeichnet, für die der Access Point Datenpakete zwischengespeichert hat. Diese müssen so lange aktiv bleiben, bis diese Daten zugestellt wurden.

In Ad hoc-Netzwerken ist die Zeit-Synchronisation etwas komplizierter, da es keine ausgezeichnete Station gibt. Die Stationen versenden ebenfalls Bakensignale. Steht die Aussendung eines Bakensignals an, 'horcht' die Station den Funkbetrieb ab und bewirbt sich um die Nutzung einer Funkverbindung. Da immer nur eine Station aktiv ist, kann auch nur diese ein Bakensignal versenden und übernimmt damit die Zeit-Synchronisation. Der Schlaf-/Wachzustand-Wechsel verläuft dann wie oben beschrieben. In einem Ad hoc-Netzwerk sendet immer nur eine Station ein Signal, das nur der Organisation des Netzwerks und nicht der eigentlichen Datenübertragung dient. Dies muss nicht, kann aber immer dieselbe Station sein.

Tabelle 4.8  
 Frequenzbereiche und maximale Sendeleistungen für  
 Funk-Netzwerke in Deutschland

Frequenzband	Frequenzbereich [MHz]	Maximale Strahlungsleistung <sup>1</sup> (EIRP) [mW]
2,4 GHz	2400 -2483,5	100
5 GHz	5150 -5350	200
	5470 -5725	1000

<sup>1</sup>bezogen auf eine Bandbreite von 20 MHz



#### Endgerät, Sendebetrieb

Die Zeitstruktur des abgestrahlten Funksignals entspricht dem des Access Points im Datenübertragungsbetrieb: Bei kleinen Datenraten oder wenn der Access Point auch andere Teilnehmergeräte bedienen muss, erfolgt eine gepulste Übertragung; bei hoher Datenrate wird ein permanentes Sendesignal ausgesandt.

Auch wenn keine Datenübertragung stattfindet, sendet der Access Point oder das Gerät, das die Synchronisation innerhalb des Netzwerkes aufrechterhält, periodisch, typischerweise alle 100 ms, ein Backsignal mit einer Länge von 0,3 bis maximal 0,5 ms aus. Für die übertragungslosen Zeiten ergibt sich somit eine mittlere Sendeleistung von 0,3 - 0,5 mW, wodurch die mittlere Leistungsdichte in einem Meter Abstand ebenfalls um den Faktor 200 bis 300 sinkt. Während der Datenübertragung schwankt der Ausnutzungsgrad (Duty-Cycle) an den WLAN-Stationen sehr stark. Selbst bei regem Datenverkehr liegt er typischerweise nur zwischen 30 und 65 Prozent. Nur in seltenen Fällen kann der Duty-Cycle an einer WLAN-Station auf über 80 Prozent ansteigen.

Die elektrische Feldstärke bzw. die Leistungsflussdichte der abgestrahlten Funksignale hängt nicht nur von der Sendeleistung und der Auslastung des Systems, sondern auch von dem Gewinn der verwendeten Antennen ab.

Bei der Beurteilung der Immissionen durch Funk-Netzwerke sind zwei Situationen zu unterscheiden:

- a) Nutzung per Funk verbundener Endgeräte
- b) Aufenthalt im Abdeckungsbereich eines Funk-Netzwerks

In Tabelle 4.9 werden die durch Messungen an WLAN-Komponenten ermittelten Maximalwerte der Leistungsdichte mit den Immissionen durch andere Hochfrequenzquellen verglichen. Es zeigt sich, dass Funk-Netzwerkarten bei einem typischen Abstand zum Nutzer von 0,5 m Felder erzeugen, deren Intensität zwar deutlich unter der von Mobiltelefonen und schnurlosen DECT-Telefonen liegt, jedoch höher ist als die Intensität, denen Anwohner von Mobilfunkanlagen ausgesetzt sind.

Die Schwankungsbreite der Messwerte in der Umgebung von WLAN-Komponenten ist erheblich. Bei Access Points ist dies zum einen darauf zurückzuführen, dass die Untersuchungen an unterschiedlichen Anlagen durchgeführt wurden. Untersuchungen in Innenräumen zeigen aber zum anderen, dass auch die Größe der Räume und vor allem die verwendeten Baumaterialien sowie die Wand-, Decken- und Bodenbeschichtungen einen erheblichen Einfluss auf die Feldverteilung in Räumen haben. Auch die Anwesenheit von Personen und Einrichtungsgegenständen beeinflusst die Felder.

Bei den vorliegenden Messergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass die untersuchten Funk-Netzwerk-Komponenten die zulässigen EIRP-Werte nicht überschritten. Es werden aber auch so genannte 'Booster' zur Erhöhung der Sendeleistung auf einige Watt und Richtantennen mit einem Antennengewinn von 24 dB (Verstärkungsfaktor 250) und mehr angeboten. Bei einer ungünstigen Position einer Person zu der Hauptabstrichrichtung ist mit Expositionen deutlich über den hier wiedergegebenen Messwerten zu rechnen. Das Problem wird dadurch verschärft, dass für WLAN-Komponenten keine Lizenzpflicht besteht und die Bundes-Netzagentur (ehemals Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post) lediglich den Markt beobachtet, aber keine gezielten Kontrollen durchführt.

#### Bluetooth

Bluetooth soll die Vernetzung unterschiedlichster Geräte ermöglichen. Das Besondere an Bluetooth ist weniger die Technik, denn es gibt bereits eingeführte Verfahren, die schneller und für die Datenübertragung über größere Entfernungen geeigneter sind, sondern es sind die vielfältigen Anwendungsgebiete. Bluetooth wird unter anderem eingesetzt für drahtlose Verbindungen zwischen Tastatur, Mouse, Drucker und anderen Peripheriegeräten einerseits und

dem Computer andererseits, zwischen Handy und Headset, zwischen persönlichem Organizer und der häuslichen Kommunikationszentrale.

Die Bluetooth-Technik basiert auf Standards, die für WLAN geschaffen wurden. Genutzt wird das lizenzfreie 2,4 GHz-ISM-Band. Innerhalb dieses Bandes wechselt Bluetooth mit dem FHSS-Verfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum) 1600 mal pro Sekunde nach einem komplexen Muster die Frequenz. Hierzu nutzt Bluetooth 79 Kanäle im Abstand von 1 MHz. Durch das Frequenz-Hopping soll die Übertragung robuster gegen Störungen gemacht werden, die im 2,4 GHz-Band kaum zu vermeiden sind, da dieser ISM-Frequenzbereich auch für viele andere Anwendungen, unter anderem für WLAN und Mikrowellenöfen, genutzt wird. Außerdem soll durch dieses Verfahren das Abhören erschwert werden.

Bluetooth ist als ausgesprochener Kurzstreckenfunk konzipiert. Die maximale Reichweite beträgt 10 m, mit einem Zusatzmodul sind Reichweiten bis 100 m möglich. Sind größere Entfernungen zu überbrücken, so muss auf andere Techniken zurückgegriffen werden, wie Mobiltelefon, analoges Telefon, LAN, ISDN oder ähnliches.

Die Antennen für Bluetooth-Anwendungen sind meist sehr einfach konstruiert und haben kaum eine Richtwirkung. Die maximale mittlere Sendeleistung wird bei maximal asymmetrischer Übertragung erreicht und liegt bei etwa drei Viertel der Spitzenleistung, denn, um die Übertragungsqualität zu verbessern, wird bei Bluetooth eigentlich alle 625  $\mu$ s die Sendefrequenz gewechselt. Da zum Einstel-

len der neuen Frequenz Zeit benötigt wird, kann pro Block nur für 366  $\mu$ s gesendet werden. Bei großen Datenmengen können durch Zusammenfassen von fünf normalen Paketen vier Umstellzeiten eingespart werden und so für 2,87 ms eine Frequenz aus den 79 je 1 MHz breiten Kanälen beibehalten werden. Der maximale Ausnutzungsgrad (Duty-Cycle) liegt damit kurzzeitig bei 0,765. Für den 'Master', das Gerät, das das Bluetooth-Netzwerk steuert, liegt der tatsächliche Duty-Cycle typischerweise bei ca. einem Drittel (zwischen 0,3 und 0,4). Die anderen Geräte, die 'Slaves', teilen sich zusammen ein weiteres Drittel, das letzte Drittel wird für die Frequenzumstellungen benötigt. Dementsprechend reduzieren sich auch die mittleren Sendeleistungen.

Für Bluetooth gibt es drei verschiedene Geräteklassen. Die jeweils zulässigen maximale Sendeleistungen und die berechneten Immissionen sind in Tabelle 4.10 aufgeführt.

Bluetooth-Headsets gehören meist zur Klasse III mit einer maximalen Peak-Sendeleistung von 1 mW und einer mittleren Sendeleistung von 0,3 bis 0,4 mW. Die Sendeleistungen des Bluetooth-Headsets werden in Tabelle 4.11 mit den entsprechenden Sendeleistungen eines Handys verglichen. Handys arbeiten mit einem festen Duty-Cycle von einem Achtel, dafür variiert die Pulsleistung aufgrund des Power-Control je nach Empfangsbedingungen um bis zu einen Faktor 1000.

Die Zahlen in Tabelle 4.11 verdeutlichen, dass ein Bluetooth-Headset im Vergleich zur direkten Handy-Benutzung die HF-Exposition des Kopfes bei schlechten Empfangsbe-

Tabelle 4.9  
Leistungsdichten von Anlagen und Geräten in Wohnungen und Büros bzw. von Mobilfunkanlagen in der Umgebung (Spitzen-Werte)

Gerät/Anlage	Frequenzbereich [MHz]	Abstand [m]	Leistungsdichte [W/m <sup>2</sup> ]
Funk-Netzwerkkarte	2400,0 bis 2483,5	0,5	0,1
Access Point	2400,0 bis 2483,5	2,0	0,01
DECT-Telefon	1880 bis 1900	0,1	1,0
DECT-Basisstation	1880 bis 1900	1,0	0,02
Mobilfunk-Handy, D-Netz	890 bis 915	0,1	12,5 bis 42,5
Mobilfunk-Basisstation	935 bis 960 1805 bis 1880	versch.	0,00001 bis 0,1

dingungen, wie sie in Wohnungen und in Fahrzeugen oft vorherrschen, deutlich verringert. Bei sehr guten Empfangsbedingungen regulieren die Handys ihre Sendeleistung soweit herunter, dass sie mit derjenigen des Headsets vergleichbar wird. Die mittlere Sendeleistung der Handys ist dann sogar geringer als diejenige des Headsets. Wenn nicht telefoniert wird, sendet das Handy nur bei sich ändernden Empfangsbedingungen oder in sehr großen Zeitabständen ein kurzes Meldesignal. Die Bluetooth-Verbindung zwischen Headset und Handy bleibt dagegen dauernd aktiv.

### Risiken durch die Felder von WLAN und Bluetooth

An Endgeräten (Desktop-Computer, Notebooks) liegen die Leistungsdichten in typischen Nutzerabständen zwischen 0,01 und 0,1 W/m<sup>2</sup>. Im Abstand von 2 m zu Access Points wurden Leistungsflussdichten von 0,001 bis 0,01 W/m<sup>2</sup> ermittelt. Die Expositionen durch Bluetooth-Geräte dürften vergleichbar sein.

Die Felder, denen die Nutzer von WLAN und Bluetooth ausgesetzt sind, erreichen nicht die Stärke der Felder von Mobiltelefonen. Deshalb können die Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen zu Risiken im Zusammenhang mit Expositionen durch Handys (s. Kapitel 2.3, 4.8) nicht direkt zur Einschätzung der Risikopotentiale der von WLAN- und Bluetooth-Komponenten ausgehenden Strahlung herangezogen werden. Auch die experimentellen Untersuchungen erfolgten in der Regel bei deutlich höheren Intensitäten als bei WLAN- und Bluetooth bei normaler Nutzung auftreten. Hinweise auf Befindlichkeitsstörungen und Beeinflussungen kognitiver Funktionen fanden sich in

Tabelle 4.10  
Maximale Sendeleistungen und Immissionen für Bluetooth -Sender

Frequenz	Klasse	Maximale Strahlungsleistung (EIRP) [mW]	Maximale Leistungsdichte [mW/m <sup>2</sup> ]	
			Abstand 0,5 m	Abstand 1,0 m
2,4GHz	I	100 <sup>1</sup>	32,5	10,1
	II	2,5 <sup>2</sup>	1,0	0,2
	III	1,0 <sup>2</sup>	0,4	0,1

<sup>1</sup>Leistungsregelung vorgeschrieben

<sup>2</sup>Leistungsregelung möglich



Bluetooth-Verbindungen zum Computer sind praktisch, erhöhen im Nahbereich aber deutlich die Expositionen.

einigen experimentellen Untersuchungen jedoch bei Intensitäten, denen Nutzer von WLAN- und Bluetooth-Geräten ausgesetzt sind. Auch eine Verstärkung der Zellproliferation und damit potentiell ein Einfluss auf die Entwicklung von Tumoren könnte möglich sein.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder werden in Kapitel 2.3 ausführlicher dargestellt.

Gesundheitliche Beeinträchtigungen können theoretisch auch durch die Beeinflussung von medizinischen Implantaten und elektronischen medizinischen Geräten auftreten. Bei den in typischen Abständen zu WLAN-Komponenten zu erwartenden geringen Intensitäten sind aber keine Störungen von Herzschrittmachern und anderen aktiven Implantaten zu erwarten. Nur bei sehr geringen Abständen kann die maximale Störfeldstärke nach DIN V EN V 50204 von 3 V/m (das entspricht ca. 0,02 W/m<sup>2</sup>) unter Umständen überschritten werden. Untersuchungen in Krankenhäusern ergaben, dass die Installation von Funk-Netzwerken in

Tabelle 4.11  
Sendeleistungen von Handy und Bluetooth-Headset

		Pulsleistung [mW]	Mittlere Leistung [mW]
Handy GSM 900	schlechter Empfang	2000	250
	bester Empfang	2	0,25
Handy GSM 1800	schlechter Empfang	1000	125
	bester Empfang	1	0,13
Bluetooth-Headset		1	0,35

Bezug auf die Funktionsfähigkeit von medizinischen Geräten weitgehend unproblematisch ist.

### Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch WLAN und Bluetooth

Die elektromagnetischen Expositionen durch WLAN- und Bluetooth-Komponenten liegen deutlich unter den Schwellenwerten für akute Gesundheitsschäden durch thermische Effekte und den aus diesen Schwellen abgeleiteten Grenzwerten – zumindest solange nur Komponenten eingesetzt werden, die die vorgeschriebenen Begrenzungen in Bezug auf die Äquivalente isotrope Sendeleistung einhalten. Sie sind aber so hoch, dass sie in den Bereich von Intensitäten fallen, für die es wissenschaftliche Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen gibt. WLAN- und Bluetooth-Geräte stellen zudem nur zwei Quellen hochfrequenter Felder unter vielen dar. Da ihre Immissionen zur Gesamtexposition beitragen, sind auch für diese Technologien die Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zur Minimierung der Expositionen der Bevölkerung zu beachten (s. Kapitel 3). Die Konsequenzen, die Staat und Industrie aus den Empfehlungen der SSK eigentlich ziehen müssten, sind in Kapitel 3 beschrieben. Da eine Bereitschaft zu konsequent Vorsorge orientiertem Handeln auf staatlicher Seite nicht zu erkennen ist und sich die Industrie bisher weigert, das Minimierungsprinzip als wichtiges technisches Entwicklungskriterium anzuerkennen und anzuwenden, bleibt es den Nutzern von WLAN und Bluetooth überlassen, durch ihr Verhalten dazu beizutragen, die Expositionen so gering wie möglich zu halten. Dazu haben sie einige Möglichkeiten:

- Die Notwendigkeit von WLAN und Bluetooth kritisch

hinterfragen: Die Einrichtung eines verkabelten Computernetzwerks ist zwar arbeitsaufwändiger als der Aufbau eines WLAN, aber Hochfrequenz-Expositionen werden vollständig vermieden. Gleiches gilt für den Anschluss peripherer Komponenten (Mouse, Tastatur, Drucker usw.) an den Computer. Auch hier sind unter Vorsorgegesichtspunkten Kabelverbindungen eindeutig den Bluetooth-Funkverbindungen vorzuziehen. Bluetooth-Headsets können in bestimmten Situationen zwar zu einer Reduzierung der beim Mobiltelefonieren entstehenden Expositionen beitragen (s.o.), der Schutzeffekt ist bei drahtgebundenen Headsets aber deutlich besser

- **In Schulen sollte aus Vorsorgegründen auf WLAN vollständig verzichtet werden. Wenn in einem Klassenraum mehrere Computer per WLAN und Access Point vernetzt werden, sind Expositionen der Schüler möglich, die mit Blick auf die besondere Empfindlichkeit des kindlichen Organismus vermieden werden sollten.**
- Geräte abschalten: Geräte, wie WLAN-Access Points, die auch im Ruhezustand senden, sollten abgeschaltet werden, wenn sie nicht benötigt werden.
- Abstand zu WLAN- und Bluetooth-Antennen halten: Geräte, die nicht wie WLAN-Notebooks und Bluetooth-Headsets zwangsläufig körpernah genutzt werden müssen, sollten soweit wie möglich von der nutzen, aber natürlich auch von jeder anderen, Person platziert werden (die Leistungsdichte nimmt quadratisch mit dem Abstand zur Sendeantenne ab).
- Schutzbereiche abschirmen: Wenn Expositionen nicht durch die vorgenannten Maßnahmen vermieden oder

reduziert werden können, bleibt immer noch die Möglichkeit der Abschirmung. Hierfür gibt es unterschiedlichste Möglichkeiten und Materialien (s. Kapitel 3.3).

### 4.11 Radar

Mit Radar (Radiation Detection and Ranging) werden Verfahren der Funkmesstechnik bezeichnet, bei denen elektromagnetische Wellen ausgestrahlt, an Objekten reflektiert und die Reflektionen wieder empfangen werden, um Informationen über die Lage, die Beschaffenheit oder die Bewegung dieser Objekte zu gewinnen. Anwendung findet die Radartechnik zur Sicherung und Kontrolle des Verkehrs zu Land, zu Wasser und in der Luft, für viele militärische Zwecke, zur Wetterbeobachtung, bei der Erforschung der Erdatmosphäre und des Weltraums.

Radaranlagen arbeiten mit hochfrequenten elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenbereich (s. Tabelle 4.12). Die von Radaranlagen abgestrahlten Leistungen können sehr unterschiedlich sein. Es gibt Anlagen, die mit 100 mW und weniger auskommen, aber auch solche mit 2,5 MW elektrischer Leistung. Da Radarstrahlen in der Regel stark gebün-

delt sind, ist die effektive Sendeleistung (EIRP) im Strahl noch wesentlich höher als die elektrische Leistung der Anlage (s. Tabelle 4.12). Der Öffnungswinkel des Radarahauptstrahls, das heißt der Winkel zwischen den Zonen, in denen die Intensität auf die Hälfte des Wertes in der Strahlenmitte abgefallen ist, beträgt meist nur wenige Grad. Beim Rundstrahlradar, einer viel verwendeten Art von Impulsradar, strahlt die Antenne mit einer Fächerkeule, die in der Horizontalen scharf (kleiner Öffnungswinkel), in der Vertikalen weniger scharf (großer Öffnungswinkel) gebündelt ist.

Neben der Hauptkeule weisen die Richtdiagramme von Radarantennen noch zahlreiche Nebenkeulen auf, die im Nahbereich der Antennen leistungsstarker Radaranlagen zu erheblichen Immissionen außerhalb des Hauptstrahls führen können.

Die Hochfrequenzwellen, die von Radarsendern ausgestrahlt werden, müssen amplituden- oder frequenzmoduliert sein, damit man aus der Phasenlage des reflektierten Radarsignals auf die Laufzeit der Radarstrahlung und damit auf die Entfernung des Zieles schließen kann. Die meisten Radaranlagen arbeiten mit kurzen Mikrowellenpul-

Tabelle 4.12  
Betriebsfrequenzen und abgestrahlte Leistung (EIRP) von Radaranlagen

Anwendung	Frequenz(bereich) [GHz]	Abgestrahlte Leistung	
		Spitze	Mittel
Windprofilmessradar	0,05 0,47 - 0,49 1,27 - 1,30		
Militärisches Radar	1 - 2 4 - 6 8 - 12		
Luftraumüberwachungsradar	1,25 - 1,26 1,34 - 1,35	16 GW	33 MW
Schiffsradar	1,55 - 1,65 3,02 - 3,10 9,45	250 MW 19 MW 32 MW	250 kW 19 kW 32 kW
Ziv. Flughafenradar	2,81 - 2,89 9,0 - 9,2 9,3 - 9,5	3,1 GW	3,1 MW
Wetterradar	5,47 - 5,65 9,3 - 9,5	0,1 - 0,25 MW	
Wasserstraßenüberwachungsradar	8,83 - 9,23 34,5 - 35,2	2 GW 100 MW	2 MW 100 kW
Verkehrsradar	9,0 - 35,0	0,5 - 100 mW	

sen, zwischen denen längere Pausen liegen, in denen das Echosignal empfangen wird (Impulsradarverfahren). Durch hohe Impulsleistungen (Energie pro Zeit) kann man große Reichweiten erzielen. Die Impulsfolgefrequenz hängt von der gewünschten, bzw. der möglichen, Reichweite des Radars ab. Um eine eindeutige Ortung zu erhalten, müssen erst alle Echos des ausgestrahlten Impulses wieder auf der Antenne, die jetzt als Empfangsantenne funktioniert, angekommen sein. Die Impulsfolgefrequenzen betragen typischerweise einige hundert Hertz.

Im Gegensatz zum normalen Radar arbeitet das Sekundär radar nicht mit dem vom Ziel reflektierten Radarpuls, sondern an Bord des Zieles befindet sich ein aktives Antwortgerät, das auf den ankommenden Radarstrahl reagiert und ein Antwortsignal abstrahlt. Die wichtigste Anwendung für das Sekundärradar ist die Flugsicherung. Da aber nicht alle Flugzeuge mit den Antwortgeräten ausgerüstet sind, kann das Sekundärradar immer nur in Kombination mit einem normalen Impulsradar eingesetzt werden.

## Risiken durch die Felder von Radaranlagen

Die Besonderheit der Immissionen von Impulsradaranlagen liegt in der zeitlichen Struktur ihrer Abstrahlung: Impulse hoher Intensität wechseln mit relativ langen Pausen ohne Abstrahlung. In der Mitte eines Radarstrahls können die elektromagnetischen Felder extrem stark sein. Im Hauptstrahl eines Wasserstraßenüberwachungsradars sind im Abstand von einigen Metern von der Antenne Immissionen von mehr als  $100 \text{ W/m}^2$  möglich. Die mittlere Strahlungsbelastung reduziert sich aufgrund der Antennenrotation auf  $1/100$  bis  $1/1.000$ . In der Umgebung von Luftverkehrskontrollradars kann es zu Belastungen von Arbeitern mit Leistungsdichten bis zu einigen  $10 \text{ W/m}^2$  kommen, normal sind Werte zwischen  $0,03$  und  $0,8 \text{ W/m}^2$ .

Sehr hohe Expositionen können auftreten, wenn ein Radarstrahl direkt auf bewohnte Bereiche gerichtet ist, bzw. solche überstreicht. Hohe Expositionen sind z.B. möglich, wenn der Luftraum dicht über dem Horizont gescannt wird, weil dann der Abstand zwischen bewohnten Bereichen und Radarstrahl unter Umständen sehr klein ist. Auch in Häfen und Schleusen sowie entlang von Wasserstraßen kann es zu hohen Expositionen kommen, wenn Personal oder Einwohner direkt vom Hauptstrahl der Radaranlage eines vorüber fahrenden Schiffes erfasst werden.

Verkehrsradaranlagen erreichen typischerweise Leistungsdichten von  $10 \text{ mW/m}^2$  in  $10 \text{ m}$  Abstand.

Es gibt nur wenige epidemiologische Untersuchungen zu durch Radarexpositionen verursachten Gesundheitsschäden. In einigen dieser Studien wurde eine erhöhte Krebsrate in den exponierten Personengruppen festgestellt. Diese Untersuchungen wurden allerdings überwiegend an Personengruppen durchgeführt, die aufgrund ihrer beruflichen Tätigkeit (Soldaten, Techniker) Radarstrahlung, aber vielfach auch Röntgenstrahlung und Chemikalien, die bekanntermaßen kanzerogen wirken, ausgesetzt waren. Es gibt aber auch eine Reihe von Laboruntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen, die Hinweise auf eine krebsfördernde Wirkung der beim Radar eingesetzten Mikrowellenstrahlung ergaben (s. Kapitel 2.3). Außerdem wurde in zahlreichen Experimenten festgestellt, dass niederfrequent gepulste Mikrowellenstrahlung, die typisch für das Radar ist, zu Störungen der Gehirnaktivität (EEG) führt.

## Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen durch Radaranlagen

Ein Schutz empfindlicher Bereiche (Wohngebiete, Kindergärten, Schulen, Kranken- und Pflegeeinrichtungen) vor Radarstrahlung ist nur durch hinreichenden Abstand von den Anlagen zu erreichen. Dies ist sowohl bei der Bebauung von Flächen in der Nähe bestehender Radaranlagen als auch bei der Planung neuer Anlagen, z.B. in der Nähe von Wohngebieten, zu beachten. Wie groß der aus Vorsorgegründen einzuhaltende Schutzabstand zu sein hat, hängt



Radaranlagen zur Luftraumüberwachung arbeiten mit hohen Sendeleistungen.



Radaranlagen auf Schiffen können entlang von Wasserstraßen und in Häfen zu erheblichen Expositionen führen.

von der abgestrahlten Leistung, der Richtcharakteristik der Antenne, dem vom Radarstrahl überstrichenen Raum und von der Zeitstruktur der Abstrahlung ab. Bei Radaranlagen auf Schiffen, die auf Wasserstraßen verkehren, muss die abgestrahlte Leistung in Wasserstraßenabschnitten, in denen es aufgrund einer Bebauung an den unteren Uferbereichen zu erhöhten Expositionen kommen kann, gegebenenfalls abgesenkt werden.

Wenn es nur um die Verminderung der Expositionen in einzelnen Gebäuden oder Räumen geht, kommt auch eine Abschirmung in Frage (s. Kapitel 3.3).

## 4.12 Andere Funkdienste

### Richtfunk

Richtfunkstrecken dienen der Übertragung von Daten, Telefongesprächen, Radio- und Fernsehprogrammen über weite Strecken. Die typischen Distanzen zwischen Sendee- und Empfangsstandort liegen bei 50 bis 70 km. Richtfunkstrecken werden auch zur Informationsübertragung innerhalb der Mobilfunknetze eingesetzt. Dabei müssen aber nur Distanzen von wenigen Kilometern überbrückt werden.

Für den Richtfunk sind Frequenzbänder in allen Wellenbereichen oberhalb und einschließlich der Kurzwellen reserviert. Die meisten Richtfunkstrecken arbeiten aber mit Frequenzen im Mikrowellenbereich (4 bis 20 GHz).

Richtfunkübertragungen verlangen eine sehr gute Bündelung des Funkstrahls. An der Sendeantenne, in der Regel

eine Parabolantenne, hat der Strahl allenfalls den Durchmesser der Antenne selbst (von in der Regel schwachen Seitenkeulen abgesehen). Richtstrahlverbindungen müssen, um Störungen bei der Übertragung zu vermeiden, so eingerichtet werden, dass keine Hindernisse die Strahlausbreitung beeinträchtigen können. Da die Sendeantennen zudem meist auf Türmen oder hohen Gebäuden, unzugänglich für die Allgemeinheit, angebracht werden, ist es praktisch ausgeschlossen, dass Personen direkt in den Strahl vor der Sendeantenne geraten können. Die Immissionen außerhalb des Richtfunkstrahls sind in der Regel sehr gering. Auf seinem Weg vom Sender zum Empfänger weitet sich der Richtstrahl aber auf. Deshalb wird am Empfangsort eine Fläche 'beleuchtet', die wesentlich größer sein kann als die Fläche der Empfangsantenne. Die Größe der bestrahlten Fläche ergibt sich aus der Abstrahlcharakteristik der Sendeantenne und dem Abstand zwischen Sender und Empfänger, die Höhe der Immissionen am Empfangsort hängt zusätzlich von der Sendeleistung ab.



Parabolantennen sorgen für eine starke Bündelung der Abstrahlung von Richtfunkanlagen. Außerhalb des Hauptstrahls von Richtfunkstrecken ist die Intensität der Strahlung daher in der Regel sehr gering.

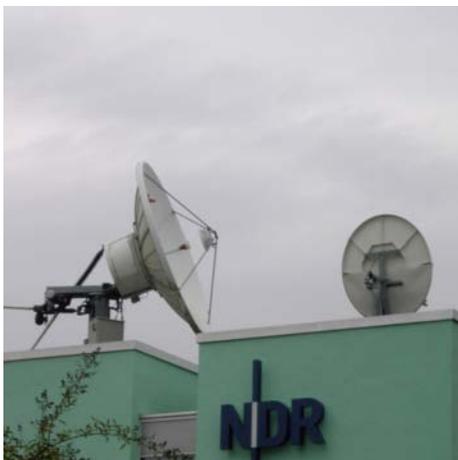
### Satellitenfunk

Satelliten werden zur Verbreitung von Radio- und Fernsehprogrammen genutzt. Diese Anwendung macht jedoch nur einen kleinen Teil des Satellitenfunkverkehrs aus. Mit Hilfe des erdumspannenden Satellitensystems mit tausenden von Sende- und Empfangsanlagen wird vor allem ein großer Teil des internationalen und der interkontinentalen

Fernmeldeverkehrs, der interkontinentale Mobilfunk und der Sprechfunkverkehr mit Schiffen und Flugzeugen abgewickelt. Es gibt Satelliten für die Navigation und für eine nicht zu überschauende Zahl von militärischen, meteorologischen und anderen wissenschaftlichen Anwendungen, Satellitensysteme zur Aufklärung und Überwachung, zur Beobachtung von landwirtschaftlichen Erträgen und ökologischen Schäden.

Die Sendefrequenzen der Bodenstationen und der Satelliten liegen alle im Mikrowellen-Bereich (4 bis 30 GHz).

Die Satellitensendeantennen am Boden, z.B. auf dem Gelände von Rundfunk- und Fernsehanstalten oder der Telekom, strahlen eine relativ hohe Leistung ab, die Richtwirkung der Antennen ist aber so gut, dass allenfalls im Nahbereich solcher Anlagen erhöhte Immissionen auftreten können. Das von den Satelliten Richtung Erde ausgesandte Signal ist meist sehr schwach, weshalb für den Empfang von Radio- und Fernsehprogrammen via Satellit auch eine Parabolantenne gebraucht wird, die es bündelt und auf den eigentlichen Empfänger im Zentrum der Antenne fokussiert.



Sendeantenne von Satellitenfunkanlagen verursachen allenfalls im Nahbereich höhere Expositionen.

## Behördenfunk

Von den Behörden mit öffentlichen und Sicherheitsaufgaben (BOS, z.B. Polizei und Feuerwehr) werden schon seit vielen Jahren zum einen Funkanlagen und zum anderen viele mobile Funkgeräte betrieben. Für den herkömmlichen analogen Behördenfunk sind mehrere Frequenzfenster im Bereich von 30 bis 450 MHz reserviert. Die Sendeleistung



Marinefunkanlagen, die den Kontakt zu Schiffen auf allen Weltmeeren aufrechterhalten, strahlen mit hoher Sendeleistung. In der Umgebung sind sehr hohe Expositionen möglich.

gen der von Behörden betriebenen ortsfesten Anlagen können bis 15 W betragen. Die Leistungen der Endgeräte für den Handbetrieb liegen im zivilen Bereich bei 2,5 W und die Geräte in Kraftfahrzeugen bei 15 W. Letztere sind deutlich höher als die von Mobiltelefonen. Im militärischen Bereich werden Anlagen und Endgeräte mit sehr viel höheren Leistungen betrieben.

## TETRA

In Zukunft werden fast alle wichtigen öffentlichen Dienste, insbesondere die Notfalldienste, wie Polizei, Unfalldienste, Feuerwehr, aber möglicherweise auch Transport- und Taxi-Unternehmen ihre Funksysteme auf das digitale Funksystem TETRA (Terrestrial Trunked Radio) umstellen. In der so genannten 'Trunked Mode Operation' (TMO) hat das System eine ähnliche Architektur wie die Mobilfunknetze: Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Mobilgeräten wird über feste Basisstationen vermittelt. Die mobilen Geräte können sowohl Handgeräte als auch in Fahrzeugen montierte Geräte sein. Die Basisstationen werden wie beim Mobilfunk so verteilt, dass eine möglichst gute Flächenabdeckung erreicht wird. Diese kann durch so genannte Repeater, die auf Fahrzeugen montiert sind, deutlich verbessert und vergrößert werden. Die Größe der Zellen wird maximal 60 km betragen. Die Signalqualität und die Zahl der Gespräche verkleinert die nutzbare Zellengröße auf 8 km, bei hohem Gesprächsaufkommen sind die Zellen noch deutlich kleiner.

Anders als beim Mobilfunk ist mit TETRA eine direkte Kommunikation zwischen verschiedenen Mobilgeräten (Direct Mode Operation, DMO) möglich, aber die meisten Dienste werden wohl in TMO arbeiten.

Für TETRA sind europaweit mehrere Frequenzbänder zwischen 380 und 470 MHz, sowie zwischen 870 und 933 MHz vorgesehen.

Die Information wird bei TETRA digitalisiert und mit einer der hochfrequenten Trägerwelle aufgeprägten Phasenmodulation übertragen. Durch die Digitalisierung ist es möglich, die Sprache zu komprimieren und dann in kurzen Blöcken zu übertragen. Ein ganz ähnliches Verfahren wird auch bei den normalen GSM-Mobilfunknetzen (s. Kapitel 4.8) angewendet. Bei TETRA haben die einzelnen Blöcke, die Zeitschlitz, jeweils eine Länge von 14,2 ms und werden in Rahmen von 56,7 ms Länge übertragen. Die mobilen Geräte benötigen bei der Sprachübertragung nur einen solchen Zeitschlitz. Dies ergibt ein Nutzverhältnis von 0,25 und eine Pulsfrequenz von 17,64 Hz. Diese gepulste Abstrahlung der Mobilgeräte ist ganz ähnlich derjenigen bei anderen digitalen Funknetzen, wie eben auch bei den GSM-Mobilfunknetzen. Bei GSM beträgt die Pulsfrequenz jedoch 217 Hz.

Für spätere Anwendungen, wie Datenübertragungen einschließlich Videosequenzen, ist bei TETRA vorgesehen, das Nutzverhältnis zu erhöhen, indem von einem Nutzer mehrere Zeitschlitz belegt werden. Wenn alle vier Zeitschlitz von einem Nutzer belegt sind, wird die Übertragung kontinuierlich. Wird jeder zweite Zeitschlitz belegt, verdoppelt sich die Pulsfrequenz auf 35,2 Hz. Bei Nutzung mehrerer Zeitschlitz steigt die mittlere Leistung entsprechend an,

bis bei gleichzeitiger Belegung aller vier Zeitschlitz die mittlere Leistung gleich der Spitzenleistung ist. Die Spitzenleistung ist die mittlere Leistung innerhalb eines Pulses.

Die mobilen Geräte, die bei TETRA Anwendung finden, werden in 4 Leistungsklassen eingeteilt (s. Tabelle 4.13). Für Geräte der Leistungsklasse 1 ist eine Spitzenleistung bis 30 Watt zulässig, bei den anderen sind es 10 W bzw. 3 W und 1 W bei Klasse 4. Diese Spitzenleistungen beziehen sich auf die Ausgangsleistungen der eingebauten Verstärker. Die tatsächlich abgestrahlten Leistungen sind entsprechend den Verlusten in den Kabeln vom Verstärker zur Antenne und abhängig von der Effektivität der Antenne meist deutlich kleiner. Welche Leistungsklassen in den einzelnen Diensten genutzt werden ist unterschiedlich. Für die Handgeräte sind meistens Geräte der Klasse 4 und für den Fahrzeugeinbau Geräte der Klasse 3 vorgesehen.

Bei dem am häufigsten angewendeten TMO Verfahren wird die abgestrahlte Leistung stufenweise der jeweiligen Situation angepasst. Bei Gesprächen, die über einen Repeater laufen, sowie im direkten DMO-Verfahren wird die Leistungsregelung nicht eingesetzt.

Die Basisstationen arbeiten bei TETRA normalerweise mit bis zu vier Frequenzkanälen, von denen bei einigen Diensten nur ein Kanal ständig strahlt, während die anderen nur bei Bedarf zugeschaltet werden, genauso wie bei GSM-Basisstationen. Bei anderen Diensten sind alle installierten Kanäle durchgängig in Betrieb. Da die Basisstationen aber mehrere Gespräche gleichzeitig verwalten, sind dort meist mehrere Zeitschlitz in Betrieb, im ständig strahlenden Kanal grundsätzlich alle vier. Dies führt dazu, dass das abgestrahlte Signal der Basisstationen praktisch kontinuierlich

Tabelle 4.13  
Spitzenleistung und zeitlicher Mittelwert des Verstärkers von Handgeräten bei verschiedenen Funksystemen

System	Maximale Leistung des Verstärkers [W]		Leistungsregelung
	Spitzenleistung	Mittlere Leistung	
analoger Polizeifunk	1,5	1,5	nein
TETRA, Klasse 3	3,0	0,75	ja (nicht DMO)
TETRA, Klasse 4	1,0	0,25	ja (nicht DMO)
GSM 900 (D -Netze)	2,0	0,25	ja
GSM 1800 (E -Netze)	1,0	0,125	ja

lich ist, jedenfalls nicht regelmäßig gepulst.

Die Leistungen der Basisstationen richten sich danach, wie groß das Gebiet ist, das abgedeckt werden soll. Die Verstärkerleistungsleistungen liegen pro Kanal zwischen 0,6 und 40 W. Durch die Kabeldämpfung und die Verluste im Kombinierring, in dem die Verstärkersignale der verschiedenen Kanäle zusammengefasst und erst dann zur Antenne geleitet werden, liegt die abgestrahlte Leistung bei ca. einem Drittel dessen, was die Verstärker zusammen abgeben. So strahlt die Antenne einer Anlage mit vier Verstärkern à 25 W 30 bis 35 W ab, wenn alle Kanäle in Betrieb sind.

Die Richtwirkung der TETRA-Antennen ist meist etwas schlechter als die von GSM-Antennen, was dazu führt, dass die Strahlenkegel breiter sind und die Leistung in Hauptstrahlrichtung kleiner ist als bei vergleichbaren GSM-Anlagen.

## Betriebsfunk

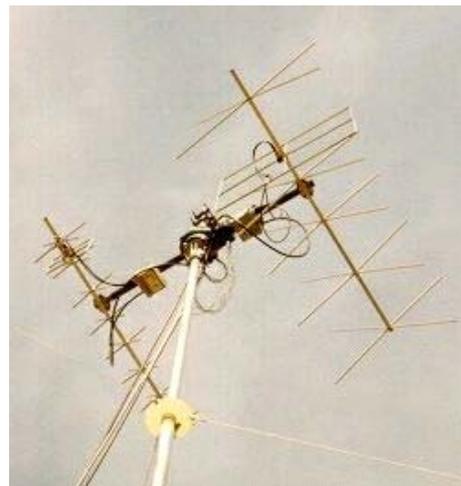
Speditionen, die Deutsche Bahn, Taxiunternehmen und viele andere Betriebe betreiben eigene Funkanlagen und eine Vielzahl von Endgeräten, die in Fahrzeugen montiert sind oder von Mitarbeitern am Körper getragen werden. Für den Betriebsfunk sind mehrere Frequenzfenster vorgesehen. Die Frequenzen reichen von 60 bis 500 MHz.

Der Bündelfunk ist eine Fortentwicklung des Betriebsfunks. Er ermöglicht die Übertragung von Sprache und Daten zwischen Fest- und Mobilstationen in regionalen Versorgungszellen. Während der Betriebsfunk für geschlossene Benutzergruppen konzipiert wurde, werden beim Bündelfunk auch Übertragungswege für offene Nutzergruppen betrieben. In jeder Bündelfunkzelle sind mehrere Übertragungskanäle verfügbar, von denen einer zugewiesen wird, wenn über einen speziellen Organisationskanal ein Verbindungswunsch angemeldet wird. Der Organisationskanal dient auch der Steuerung und Überwachung.

Für Bündelfunkanwendungen sind Frequenzen im Bereich 410 bis 466 MHz und im Bereich 870 bis 921 MHz vorgesehen. Die zulässigen Sendeleistungen hängen vom Frequenzbereich ab. Sie können für ortsfeste Anlagen maximal 200 W und für mobile Funkstellen maximal 12 W betragen und damit deutlich höher sein als die Sendeleistungen von Mobilfunkbasisstationen und Handys.

## Amateurfunk

In Deutschland betreiben etwa 70.000 Privatpersonen Funk als Hobby. Der Empfang von Amateurfunksendungen sowie der Besitz von Amateurfunkgeräten ist in Deutschland jedermann gestattet. Für den Amateurfunk sind Frequenzbereiche vom Langwellen- bis in den Mikrowellenbereich freigegeben worden (135 kHz bis 250 GHz). Damit sind, je nach Technik, weltweite oder nur lokale Verbindungen möglich. Während in jedem anderen Funkdienst nur typengeprüfte Geräte verwendet werden dürfen, ist Funkamateuren der Selbstbau ihrer Geräte (Sender, Empfänger und ähnliches) gestattet. Dabei müssen sie aber natürlich die gesetzlichen und einschlägige technische Vorschriften beachten. Die für die Teilnahme am Amateurfunkdienst (Senden und Empfangen) erforderlichen Kenntnisse müssen im Rahmen von Amateurfunkprüfungen, die die Bundesnetzagentur durchführt, nachgewiesen werden.



DafürdenAmateurfunkvieleunterschiedlicheFrequenzbereichefreigegebenwurden,werdenauchvieleverschiedeneAntennentypeneingesetzt. In der NachbarschaftsolcherAnlagen sindhoheExpositionenmöglich.

Im Bereich bis 1,3 GHz sind Spitzensendeleistungen bis 750 W zulässig, bei höheren Frequenzen maximal 75 W. Die Sendeleistungen von Amateurfunkanlagen können damit ein Vielfaches der Sendeleistung von Mobilfunkanlagen betragen, die typischerweise bei 20 W liegen.

In Wohngebieten, in denen Amateurfunkanlagen betrieben werden, sind diese nicht selten für den Hauptbeitrag zur Hochfrequenzexposition verantwortlich. Die Sendeleistungen von Amateurfunkanlagen sind zwar durch einschlägige Vorschriften begrenzt, doch sind die zulässigen Werte ver-

glichen mit vielen anderen Funkanwendungen sehr hoch (s.o.). Außerdem gibt es neben der Mehrzahl der Amateurfunker, die sich an die Vorschriften halten, immer wieder schwarze Schafe, die die Sendeleistungen ihrer Anlagen unzulässig erhöhen.

Amateurfunkanlagen können zum einen durch direkte Strahlung zu hohen Immissionen führen. Zum anderen kann es bei Sendeanlagen in der Nähe von Häusern zu lokalen Erhöhungen der Immissionen durch Sekundärstrahlung kommen: Dachrinnen und andere ausgedehnte metallische Strukturen können für bestimmte Frequenzen zugleich als Empfangs- und (sekundäre) Sendeantennen wirken. Durch Resonanzeffekte können noch in größeren Entfernungen von der eigentlichen Sendeantenne hohe Feldstärken auftreten. Die von einem Amateurfunksender abgestrahlte Energie kann auch von der hausinternen Verkabelung (Lichtleitungen, Antennenkabel) aufgenommen und abhängig von der Kabellänge weitergeleitet werden.

### See- und Binnenschiffahrtfunk

Der Seefunk dient der Übertragung schiffsdienstlicher und privater Nachrichten sowie für den Nachrichtenaustausch im Zusammenhang mit der Wahrung der Sicherheit der Schifffahrt und des Schutzes des menschlichen Lebens auf See. Er ermöglicht Verbindungen zwischen Schiffen und Stationen an Land sowie zwischen Schiffen und an Bord von Schiffen. Für den mobilen Seefunk sind mehrere Frequenzbereiche reserviert: im Kurzwellenbereich zwischen 1,6 und 27,5 MHz, im UKW-Bereich zwischen 156 und 162 MHz, im VHF-Bereich zwischen 457 und 468 MHz sowie für Übertragung via Satellit im Frequenzbereich 1,5 bis 1,7 GHz. Im Kurzwellenbereich sind Senderausgangsleistungen bis 1500 W zulässig. Bei den höheren Frequenzen wird die Sendeleistung der ortsfesten Anlagen im Rahmen der Frequenzuteilung durch die Bundesnetzagentur bezogen auf den jeweiligen Standort festgelegt. Von der Bundesmarine werden im Küstenbereich Funksendeanlagen betrieben, die auch andere als die zuvor genannten Frequenzen (unter anderem 10,2 und 13,1 kHz) nutzen und sehr leistungsstark sind.

Der Funkdienst zur Abwicklung des Funkverkehrs auf Binnenwasserstraßen und Binnengewässern wird als Binnenschiffahrtfunk bezeichnet. Er umfasst die Funkverbindungen der Schiffe untereinander, zwischen Schiffen und Hafenbehörden, zur Übertragung nautischer Informationen

und für den öffentlichen Nachrichtenaustausch sowie den Funkverkehr an Bord. Der Binnenschiffahrtfunk wird über Frequenzen im UKW-Bereich abgewickelt (156 bis 162 MHz). Die Anlagen auf den Schiffen können Sendeleistungen bis 35 W haben. Die Sendeleistung der ortsfesten Anlagen im Rahmen der Frequenzuteilung durch die Bundesnetzagentur standortbezogen festgelegt.

### Flugfunk

Der Flugfunk dient der Kommunikation zwischen den Bodenfunkstellen und Funkstellen an Bord von Luftfahrzeugen (Luftfunkstellen) oder zwischen Luftfunkstellen. Der Flugfunk wird weltweit mit Frequenzen oberhalb des normalen UKW-Radio betrieben (108 bis 144 MHz). Die für den jeweiligen Frequenzbereich und die Standorte zulässigen Sendeleistungen der stationären Anlagen werden im Einzelfall von der Bundesnetzagentur so festgelegt, dass die Anlagen des Prüf- und Messdienstes der Bundesnetzagentur nicht gestört werden.

### Navigationsfunk

Zur Unterstützung der Navigation auf See und in der Luft werden so genannte 'Funkfeuer' betrieben. Für die Navigation in der Schifffahrt sind Frequenzen in den Bereichen 283,5 bis 315 kHz und 315 bis 325 kHz vorgesehen. Der Flugnavigationfunkdienst nutzt mehrere Frequenzbereiche zwischen 283,5 kHz und 1095 MHz. Die zulässigen Sendeleistungen werden standortbezogen von der Bundesnetzagentur festgelegt.

## 4.13 Anlagen und Maschinen an Arbeitsplätzen

Durch den zunehmenden Einsatz elektrischer und elektronischer Anlagen, Maschinen und Geräte ist die Zahl der Quellen elektromagnetischer Felder an Arbeitsplätzen deutlich gestiegen. Das gilt insbesondere für Arbeitsplätze in Unternehmen und Unternehmensbereichen, die nicht der Produktion zuzuordnen sind. In Büros haben die elektromagnetischen Expositionen im Niederfrequenzbereich durch immer mehr Geräte und Anlagen, die an die elektrische Versorgung angeschlossen sind, deutlich zugenommen. Noch deutlicher ist der Anstieg im Hochfrequenzbereich durch schnurlose Telefone, Funk-Netzwerke (WLAN), Funk-Verbindungen zur Computer-Peripherie (Bluetooth)

und die Computer selber. Hinzu kommen Zugangskontrollsysteme, Diebstahlsicherungsanlagen und Artikelerkennungssysteme, die mit elektromagnetischen Feldern in unterschiedlichsten Frequenzbereichen arbeiten. Die absolut höchsten Belastungen treten jedoch nach wie vor an Maschinen und Produktionsanlagen auf (s. Tabelle 4.14).

## Risiken durch die elektromagnetischen Expositionen an Arbeitsplätzen

An Industriearbeitsplätzen sind die Arbeitnehmer nicht selten elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern ausgesetzt, deren Stärke weit über dem liegt, was für die Allgemeinbevölkerung zulässig ist. Epidemiologische Untersuchungen haben denn auch gezeigt, dass in vielen Berufsgruppen mit erhöhten elektromagnetischen Expositionen das Risiko für Krebserkrankungen erhöht ist. Das gilt z.B. für das Zugpersonal in Ländern mit elektrifizierten Bahnstrecken, Elektroschweißer, Arbeiter an Plastiksweißmaschinen und Funkerinnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden aber immer wieder kontrovers diskutiert, weil die Arbeitnehmer oft auch gleichzeitig anderen Einflüssen, wie z.B. Chemikalien oder Hitze, ausgesetzt sind, die ebenfalls einen Einfluss auf die Krebsentwicklung haben können.



In Medizin und Forschung werden sehr starke statische Magnetfelder eingesetzt. Um das Personal zu schützen, müssen großräumige Sicherheitsbereiche festgelegt werden.



Beim Elektroschweißen treten sehr starke Magnetfelder auf.

## Maßnahmen zur Verminderung der Expositionen an Arbeitsplätzen

Es gibt in Deutschland bisher keine gesetzlichen Regelungen zum Schutz der Arbeitnehmer vor negativen gesundheitlichen Auswirkungen von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Die an Arbeitsplätzen zulässigen Werte bzw. die Arbeitsschutzmaßnahmen sind vielmehr in einer berufsgenossenschaftlichen Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, der Unfallverhütungsvorschrift 'Elektromagnetische Felder' (BGV B11) vom 1. Oktober 2001, festgelegt. Grundlage für die zulässigen Werte sind die von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) zur Vermeidung akuter Gesundheitsschäden empfohlenen Basiswerte für die Elektrische Stromdichte im Niederfrequenzbereich und die Spezifische Absorptionsrate (SAR) im Hochfrequenzbereich. Wie bei den Grenzwerten zum Schutz der Allgemeinbevölkerung (26. BImSchV) werden alle Hinweise auf Wirkungen unterhalb der Schwellen für Stromreizungen (Niederfrequenz) bzw. thermische Effekte (Hochfrequenz) nicht berücksichtigt. Aus den Basiswerten werden die zulässigen Werte für die elektrische Feldstärke, die magnetische Feldstärke bzw. die magnetische Flussdichte sowie die elektromagnetische Leistungsdichte berechnet.

In der BGV B11 werden zum einen drei Expositionsbereiche und ein Gefahrenbereich (s. Kasten 4.2) und zum anderen wird zwischen Ganz- und Teilkörperexposition unterschieden. Außerdem enthält die BGV B11 für gepulste Felder im Niederfrequenzbereich spezielle Anforderungen. In

Tabelle 4.15 sind die zulässigen Werte für die Expositionsbereiche 1 und 2 für ausgewählte, an Arbeitsplätzen häufig auftretende Frequenzen aufgeführt. Zum Vergleich sind dort auch die Grenzwerte der EU-Empfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern vom 12. Juli 1999 angegeben. Die EU-Empfehlung deckt im Gegensatz zur 26. BImSchV den



Elektrische Schmelzöfen für Stahl und andere Metalle erzeugen auf Grund hoher Strömestärke starke Magnetfelder.

gesamten Frequenzbereich nicht-ionisierender elektromagnetischer Strahlung ab. In den Frequenzbereichen, die auch durch die 26. BImSchV geregelt sind, stimmen die Grenzwerte mit denen der EU-Empfehlung überein.

In Tabelle 4.15 sind auch die Werte aufgeführt, die nach der europäischen Richtlinie zu Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) an Arbeitsplätzen zulässig sein sollen. In der Richtlinie gibt es keine Unterscheidung unterschiedlicher Expositionsbereiche wie in der BGV B11. Für Bereiche, die bisher dem Expositionsbereich 2 zugeordnet werden, würde die Übernahme der EU-Regelungen eine Verschlechterung bedeuten. Für höher exponierte Arbeitsplätze würde die Anwendung der EU-Regelungen dagegen zu einem besseren Schutz führen.

Wie die BGV B11 berücksichtigt die EU-Richtlinie den Schutz von Arbeitnehmern allein wissenschaftlich eindeutig nachgewiesene schädliche Kurzzeitwirkungen im menschl-

chen Körper, die durch das Fließen induzierter Ströme und durch Energieabsorption sowie durch Kontaktströme verursacht werden. Langzeitwirkungen einschließlich potentieller karzinogener Wirkungen aufgrund der Exposition gegenüber zeitvariablen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, für die kein abschließender wissenschaftlicher Beweis für einen kausalen Zusammenhang vorliegt, werden von der Richtlinie nicht abgedeckt.

Untersuchungen der Gewerbeaufsichtsämter, der Berufsgenossenschaften und anderer Gutachter zeigen, dass die zulässigen Werte für elektromagnetische Expositionen an Arbeitsplätzen vielfach weit überschritten werden (s. Tabelle 4.14). Hier sind neben der Gewerbeaufsicht, die solche Missstände konsequent unterbinden muss, auch die Personalvertretungen und die Gewerkschaften gefordert, die sich für einen besseren Schutz der Arbeitnehmer einsetzen müssen. Dabei reicht es letztlich aber nicht, nur für die Einhaltung der Vorschriften zu sorgen, sondern es sollten alle technischen und sich durch die Gestaltung von Arbeitsabläufen ergebenden Möglichkeiten genutzt werden, um die Belastungen der Arbeitnehmer durch elektromagnetische Felder so gering wie möglich zu halten. Die Strahlenschutzkommission hat im Juli 2003 'Grundsätze für den Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder und Wellen' verabschiedet. Darin formuliert sie zwei wichtige Grundsätze, die an Arbeitsplätzen künftig stärker beachtet werden sollten:

- "Die Vermeidung unnötiger Expositionen ist ein grundsätzliches Ziel des Strahlenschutzes und sollte daher auch für den Schutz der Arbeitnehmer gelten."
- "Arbeitnehmer sind hinsichtlich der zulässigen Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern und Wellen grundsätzlich der Allgemeinbevölkerung gleich zu stellen."

Tabelle 4.14

Messwerte für Anlagen und Maschinen im Vergleich mit den zulässigen Werten an Arbeitsplätzen  
(Die Expositionsbereiche der BGV B11 werden im Kasten 4.2 erläutert.)

Anlage/Maschine	Frequenz	Zulässige Werte BGVB11		Typische Messwerte
		Expositionsbereich		
		1	2	
Aluminiumelektrolyse	0 Hz	212 mT	212 mT	100 mT
Galvanikanlagen	0 Hz	212 mT	212 mT	4 mT
Transformatorstation	50 Hz	1360 µT	420 µT	<100 µT
Hochspannungsanlage	50 Hz	1360 µT	420 µT	<300 µT
		6,7 kV/m	21,3 kV/m	<15 kV/m
Lichtbogen-Pfannenofen	50 Hz	1360 µT	420 µT	<100 µT
Induktionsschmelzofen	250 Hz	270 µT	85 µT	<70 µT
Lötanlage	9,6 kHz	67,9 µT	21,2 µT	<500 µT
Induktionshärtungsanlage	10 kHz	67,9 µT	21,2 µT	<2.800 µT
	500 kHz	9,8 A/m	4,7 A/m	<3 A/m
		1066 V/m	333,3 V/m	<200 V/m
Induktionstiegelofen	50 Hz	1360 µT	420 µT	<25.000 µT
	900 Hz	75,4 µT	23,6 µT	<11.300 µT
	1 kHz	67,9 µT	21,2 µT	<7.400 µT
Stangenerwärmung	9 kHz	67,9 µT	21,2 µT	<4.600 µT
Probenerwärmung	10 kHz	67,9 µT	21,2 µT	1.000 µT
Schweißnaht-Glühen	10 kHz	67,9 µT	21,2 µT	2.200 µT
Kunststoffschweißen	27 MHz	0,18 A/m	0,08 A/m	<0,3 A/m
		61,4 V/m	27,5 V/m	<1000 V/m
Stanzautomat	27 MHz	0,18 A/m	0,08 A/m	0,09 A/m
		61,4 V/m	27,5 V/m	6 V/m
Trockner	13 MHz	0,37 A/m	0,18 A/m	<0,22 A/m
		61,4 V/m	27,5 V/m	<150 V/m
Klebebinder	27 MHz	0,18 A/m	0,08 A/m	0,015 A/m
		61,4 V/m	27,5 V/m	10 V/m

## Kasten 4.2

Expositionsbereiche gemäß BGV B11

### Expositionsbereich 2

alle Bereiche des Unternehmens, sofern sie nicht den Expositionsbereich 1, dem Bereich erhöhter Exposition oder dem Gefahrbereich zuzuordnen sind

### Expositionsbereich 1

kontrollierte Bereiche sowie Bereiche, in denen aufgrund der Betriebsweise oder aufgrund der Aufenthaltsdauer sichergestellt ist, dass eine Exposition oberhalb der zulässigen Werte von Expositionsbereich 2 nur vorübergehend erfolgt

### Bereich erhöhter

kontrollierter Bereich, in dem die Werte des Expositionsbereiches 1 überschritten werden

### Gefahrbereich

kontrollierter Bereich, in dem die Werte für Bereiche erhöhter Exposition überschritten werden

Tabelle 4.15  
Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und Arbeitnehmer

Vorschrift	Frequenz					
	16,7Hz	50Hz	10kHz	27MHz	900MHz	2,4GHz
EU-Empfehlung Allgemeinbevölkerung	10kV/m 300µT	5kV/m 100µT	87V/m 6,3µT	28V/m 0,07A/m	41,3V/m 0,11A/m 4,5W/m <sup>2</sup>	61V/m 0,16A/m 10W/m <sup>2</sup>
BGVB11						
-Expositionsbereich 1	30kV/m 4066µT	21,3kV/m 1358µT	1,07kV/m 67,9µT	61,4V/m 0,18A/m	92,1V/m 0,24A/m 22,5W/m <sup>2</sup>	137,3V/m 0,36A/m 50W/m <sup>2</sup>
-Expositionsbereich 2	20kV/m 1270µT	6,67kV/m 424µT	333,3V/m 21,22µT	27,5V/m 0,09A/m	41,3V/m 0,11A/m 4,5W/m <sup>2</sup>	61,5V/m 0,16A/m 10W/m <sup>2</sup>
EU-Richtlinie Arbeitsplätze	20kV/m 1497µT	10kV/m 500µT	610V/m 30,7µT	61V/m 0,16A/m	90V/m 0,24A/m 22,5W/m <sup>2</sup>	137V/m 0,36A/m 50W/m <sup>2</sup>

## Glossar







## Glossar

**Absorption:** hier: Aufnehmen von Strahlungsenergie

**Akustikusneurinom:** (auch Schwannom genannt) gutartiger Tumor, der sich an Hör- und Gleichgewichtsnerven bildet. Größere Akustikusneurinome können aufgrund des Drucks, den sie auf den Hirnstamm ausüben, lebensbedrohlich werden

**Alzheimer-Krankheit:** diffuse Rückbildung des Gehirns, die bis zum Gedächtnisverlust führen kann

**Amyotrophische Lateralsklerose:** degenerative Erkrankung des ersten und zweiten motorischen Neurons mit Muskelschwund und Spastik, die sich meist zwischen dem 40. und 65. Lebensjahr manifestiert

**Aneuploidie:** Veränderung der Chromosomenzahl

**Apoptose:** programmierter Zelltod

**Äquivalente isotrope Strahlungsleistung** (equivalent isotropic radiated power, EIRP): Maß für die gleichmäßig in den umgebenden Raum abgestrahlte Sendeleistung eines Funksenders. Die meisten Funksender strahlen nicht isotrop, sondern weisen eine Vorzugsrichtung auf (so genannte Sendekeule). Um verschiedene Sender vergleichen zu können, wird der äquivalente Wert angegeben, den ein Sender haben müsste, um in alle Richtungen die gleiche Leistung abzustrahlen wie in der Vorzugsrichtung.

**Arrhythmie:** unregelmäßige Herzschlagfolge

**Benzo(a)pyren:** krebserregender polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoff

**Blut-Hirn-Schranke:** selektiv durchlässige Schranke zwischen Blut und Hirnsubstanz, die den Stoffaustausch mit dem Zentralnervensystem kontrolliert und so das Gehirn vor schädlichen Stoffen schützt

**Chromatid:** Chromosomenhälfte

**Chromatin:** Substanz des Zellkerns, bestehend aus DNA, RNA und Eiweißen

**Chromosomen:** im Zellkern befindliche Träger des Erbguts, die artspezifisch in Anzahl und Form variieren

**Chromosomen-Abberation:** strukturelle Abweichungen einzelner Chromosomen, Abweichung von der normalen Chromosomenzahl

**dB:** s. Dezibel

**DECT** (Digital Enhanced Cordless Telecommunications): Standard für schnurlose Telefone (s. Kapitel 4.9)

**Demenz:** Verfall der geistigen Leistungsfähigkeit

**Dezibel** (dB): logarithmisches Maß, das die Berechnung der Verstärkung bzw. Dämpfung komplexer Systeme vereinfacht. Um z.B. die Verstärkung eines Gesamtsystems, bestehend aus Sender, Kabeln, Steckverbindungen und Antenne zu berechnen, müssen die einzelnen dB-Werte lediglich addiert werden. Eine Veränderung um 3 dB entspricht immer einer Verdoppelung bzw. Halbierung, eine Veränderung um 10 dB entspricht einem Faktor 10 bzw. 1/10).

**dichotom:** in zwei gleiche Hälften geteilt

**DNA** (desoxyribonucleid acid): (auch DNS) Desoxyribonucleinsäure, Träger der Erbinformationen

**EEG:** s. Elektroenzephalographie

**EIRP:** s. Äquivalente isotrope Strahlungsleistung

**Elektroenzephalographie:** Methode zur Registrierung der elektrischen Aktivität des Gehirns

**Elektromagnetische Hypersensibilität:** s. Elektrosensibilität

**Elektrosensibilität** (Elektromagnetische Hypersensibilität): besondere Empfindlichkeit von Personen, die auf elektromagnetische Felder mit unterschiedlichsten Symptomen reagieren

**Emission:** hier: von einer Quelle ausgehende Strahlung

**endokrin:** die Drüsen betreffend, die ihr Sekret direkt in die Blutbahn abgeben

**Epidemiologie:** Teilgebiet der Medizin, in der mit statistischen Methoden das Auftreten von Krankheiten untersucht wird

**epigenetische Veränderungen:** erbliche Veränderungen der genetischen Information, die nicht auf Mutationen beruhen, sondern ihre Ursache z.B. in einer Veränderung der Chromatinstruktur haben

**Epithelzellen:** Zellen der obersten Schicht der Haut oder Schleimhaut

**ERP** (Effective Radiated Power): effektiv abgestrahlte Leistung in der Hauptstrahlrichtung einer Sendeantenne

**Erythropoese:** Entstehung der roten Blutkörperchen

**Erythrozyten:** rote Blutkörperchen

**Evidenz:** Deutlichkeit, einleuchtende Erkenntnis

**Fertilität:** Fruchtbarkeit

**Fibroblasten:** Bildungszelle des faserigen Bindegewebes

**Gen-Expression:** Biosynthese eines spezifischen Genproduktes, das eine spezielle RNA oder ein Eiweiß sein kann

**Gentoxizität, gentoxisch:** das Erbgut schädigend

**Gen-Transkription:** s. Transkription

**Gen-Translation:** s. Translation

**GHz:** Gigahertz, Einheit für die Frequenz (s. Kapitel 1) (1 GHz = 1.000.000.000 Hz)

**Gliom:** von der bindegewebigen Stützsubstanz des Zentralnervensystems ausgehendes Geschwulst im Gehirn oder Rückenmark oder des Auges

**Granulosazellen:** Zellen des Epithels sprungreifer Eizellenbläschen (Follikel)

**Haarfollikel** Haarbalg, der die Haarwurzel umgibt

**hämatologisch:** das Blut betreffend

**Hz:** Hertz, Einheit für die Frequenz (s. Kapitel 1)

**ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung

**Immission:** hier: von einer oder mehreren Quellen an einem Ort (Immissionsort) verursachte Felder

**infertil:** unfruchtbar

**in situ:** in natürlicher Lage

**Interferenz:** Überlagerung elektromagnetischer Welle

(kann je nachdem, ob die Wellen in gleichen oder entgegengesetzten Schwingungszuständen aufeinander treffen zur Verstärkung oder Schwächung führen)

**in vitro:** im Reagenzglas (durchgeführt)

**in vivo:** am lebenden Organismus (durchgeführt)

**isotrop:** gleichmäßig in alle Richtungen

**kanzerogen:** krebserzeugend

**Kanzerogenese:** Krebsentstehung

**kHz:** Kilohertz, Einheit für die Frequenz (s. Kapitel 1) (1 kHz = 1.000 Hz)

**km:** Kilometer

**kognitiv:** das Erkennen, die Wahrnehmung betreffend

**konsistent:** widerspruchsfrei, sicher

**kumulativ:** (an ) häufend

**kV/m:** Kilovolt pro Meter, Einheit für die Elektrische Feldstärke (s. Kapitel 1) (1 kV/m /= 1.000 V/m)

**kW:** Kilowatt, Einheit für die elektrische Leistung (auch Sendeleistung) (1 kW = 1.000 W)

**Lymphom:** Lymphdrüsenvergrößerung, die sowohl gutartig als auch bösartig sein kann

**Lymphozyten:** weiße Blutkörperchen

**m:** Meter

**Malignität:** Bösartigkeit (einer Geschwulst)

**Median-Wert:** in einer nach ihrer Größe geordneten Reihe der Wert, der die Reihe halbiert, das heißt eine Hälfte der Werte liegt unter, die andere Hälfte über diesem Wert

**Melanin:** Farbstoff der Haut

**Melanozyten:** Zellen, in denen Melanin gebildet wird

**Melatonin:** Hormon der Zirbeldrüse mit vielfältiger Wirkung. Es spielt z.B. beim zirkadianen Rhythmus und beim Krebsgeschehen eine Rolle

**Meningeom:** gutartiger Tumor des Gehirns und des Rückenmarks



ckenmarks, der von den Deckzellen der Spinnewebhaut ausgeht

**Messenger RNA:** Boten Ribonukleinsäure, ist an der Übertragung der auf der DNA festgelegten Informationen in Eiweiße beteiligt

**Meta-Analyse:** statistische Methode, mit der die Ergebnisse mehrerer unterschiedlicher Studien zusammengefasst werden

**MHz:** Megahertz, Einheit für die Frequenz (s. Kapitel 1) (1 MHz = 1.000.000 Hz)

**Mikronukleus:** Mikrokern, Chromosomenfragment im Zellplasma, Marker für genotoxische Wirkungen

**Mikrotesla ( $\mu\text{T}$ ):** Einheit für die Magnetische Flussdichte (s. Kapitel 1) (1  $\mu\text{T}$  = 1/1.000.000 T)

**Monozyten:** größtes weißes Blutkörperchen im peripheren Blut

**Mortalität:** Verhältnis der Zahl der Todesfälle zur Gesamtzahl der statistisch berücksichtigten Personen

**ms:** Millisekunde (1 ms = 1/1.000 s)

**Myokardinfarkt:** Herzinfarkt

**MW:** Einheit für die elektrische Leistung (auch Sendeleistung) (1 MW = 1.000.000 W)

**$\mu\text{T}$ :** s. Mikrotesla

**neurodegenerativ:** Nerven- und Gehirnleistungen betreffender Verfall, z.B. bei Alzheimer-Krankheit und Amyotrophischer Lateralsklerose

**Neurodegenerative Erkrankungen:** Sammelbegriff für Krankheiten, deren gemeinsames Merkmal ein fortschreitender Verlust an Neuronen ist (Morbus Alzheimer, Parkinson, Huntington; Amyotrophische Lateralsklerose)

**Neuron:** Nervenzellen und deren Fortsätze

**Neurotransmitter:** Substanzen, die bei der Erregungsübertragung in den Neuronen freigesetzt werden. z.B. Acetylcholin und Adrenalin

**Noxe:** Krankheitsursache, Stoff oder Bedingung mit schädigender Wirkung

**ODC:** s. Ornithindecaboxylase

**Ornithindecaboxylase (ODC):** Enzym, das u.a. die Apoptose beeinflusst

**Parkinsonsche Krankheit:** neurodegenerative Erkrankung besonders im Alter, gekennzeichnet durch verminderte Bewegungsfähigkeit, unwillkürliche Bewegungsstörungen (Zittern), leise und monotone Sprache u.a.

**patho-physiologisch:** krankhafte Funktionsstörungen eines Organismus betreffend

**permeabel:** durchlässig

**polychromatische Erythrozyten:** unreife rote Blutzellen, die durch saure und basische Farbstoffe angefärbt werden können

**Proliferation:** Vermehrung, Wachstum, Wucherung

**REM-Schlaf:** Schlafphase mit schnellen Augenbewegungen (rapid eye movement), Traumphase

**repetitiv:** sich wiederholend

**Replikation:** a) Bildung einer Kopie des genetischen Materials durch Selbstverdoppelung, b) exakte Wiederholung eines Experiments

**SAR:** s. Spezifische Absorptionsrate

**SCE:** s. Schwesterchromatid-Austausch

**Schwannom:** s. Akustikusneurinom

**Schwesterchromatid-Austausch:** (SCE) Austausch zwischen den beiden Chromatiden eines Chromosoms

**Spastik:** erhöhter Spannungszustand der Muskeln

**Spezifische Absorptionsrate (SAR):** (Einheit: W/kg) Maß für die Energie, die pro Sekunde von 1 kg Körpergewebe aufgenommen wird

**SSK:** Strahlenschutzkommission

**Synapse:** Übergangsstelle zwischen Nerven- und Muskelzelle

**teratogen:** Missbildungen während der Embryonalentwicklung hervorrufend

**Tesla:** Einheit für die Magnetische Flussdichte (s. Kapitel 1)

**THz:** Terahertz, Einheit für die Frequenz (s. Kapitel 1) (1 THz = 1.000.000.000.000 Hz)

**T-Lymphozyten:** weiße Blutkörperchen, Träger der zellvermittelten Immunität

**toxisch:** giftig

**transformiert:** umgeformt, verändert z.B. durch Übertragung genetischer Informationen

**Transkription:** Überschreibung der Basensequenz eines Gens von der DNA auf die Messenger RNA

**Translation:** Übersetzung der Erbinformation von der Messenger RNA in Eiweiße

**Tumorpromotor:** Stoff, der selbst keinen Krebs auslöst, aber die Krebsentstehung beschleunigt

**ubiquitär:** überall, verbreitet vorkommend

**V/m:** Volt pro Meter, Einheit für die Elektrische Feldstärke (s. Kapitel 1)

**WLAN** (Wireless Local Area Network): Funknetzwerk (s. Kapitel 4.10)

**Zentromer:** Ansatzstelle der Spindelfaser, die bei der Zellteilung die Chromatiden zu den Tochterzellen zieht

**Zirbeldrüse:** an der Gehirnbasis gelegene Drüse, Bildungsort von Melatonin

**zirkadian:** den Tagesrhythmus betreffend

Kontakte und Informationen







## Kontakte und Informationen

### Arbeiten des ECOLOG-Instituts

Im Folgenden sind Arbeiten aufgeführt, die diesem Handbuch zugrunde liegen und in denen sich Hinweise auf die wissenschaftliche Originalliteratur finden.

**Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten werden in dem vom ECOLOG-Institut herausgegebenen und alle zwei Monate erscheinenden Fachinformationsdienst *EMF-Monitor: Elektromagnetische Felder, Umwelt und Gesundheit* vorgestellt.**

- Neitzke H.-P. 2006: Mobiltelefone, schnurlose Telefone und Gehirntumoren. *EMF-Monitor* 12 (1): 1-6
- Neitzke H.-P. 2005: Mobiltelefone und Gehirntumoren. *EMF-Monitor* 11 (5): 1-4
- Neitzke H.-P. 2005: Zukunftstechnologie Terahertz-Wellen: Chancen und Risiken. *EMF-Monitor* 11 (3): 1-3
- Neitzke H.-P. 2005: Zwischenbilanz zum Deutschen Mobilfunkforschungsprogramm. *EMF-Monitor* 11 (2): 1-3
- Neitzke H.-P. & Osterhoff J. 2005: Elektrosensibilität: Stand der Forschung. *EMF-Monitor* 11 (4): 1-8, 11 (5): 9-15
- Neitzke H.-P. & Osterhoff J. 2005: Mobilfunk & Gesundheit 2000-2005. *EMF-Monitor* 11 (1): 1-10, 11 (2): 5-6
- Neitzke H.-P., Osterhoff J., Peklo K., Voigt H. & Wohlatz T. 2005: Bestimmung der Exposition von Personengruppen, die im Rahmen des Projektes 'Querschnittsstudie zur Erfassung und Bewertung möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch die Felder von Mobilfunkbasisstationen' untersucht werden. Schlussbericht zu einem Forschungsprojekt im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz
- Voigt H. 2005: HF-Expositionen durch Funkanwendungen in Haus und Büro: DECT, WLAN und Bluetooth. *EMF-Monitor* 11 (1): 10-12
- Voigt H. 2005: Elektromagnetische Felder und gesundheitliche Beeinträchtigungen. *EMF-Monitor* 11 (6): 3-5
- Voigt H. & Osterhoff J. 2005: Krebserkrankungen im Umkreis von Mobilfunkbasisstationen. *EMF-Monitor* 11 (6): 1-3
- Neitzke H.-P. 2004: Elektromagnetische Felder von Warensicherungsanlagen. *EMF-Monitor* 10 (4): 1-5
- Neitzke H.-P. 2004: Gesundheitliche Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder. *EMF-Monitor* 10 (1): 3-7
- Neitzke H.-P. & Osterhoff J. 2004: Zellregulatorische und gentoxische Effekte elektromagnetischer Felder. *EMF-Monitor* 10 (6): 1-7
- Neitzke H.-P. & Osterhoff J. 2004: Beeinflussung des Gehirns und kognitiver Funktionen durch die Felder der Stromversorgung. *EMF-Monitor* 10 (1): 1-3
- Osterhoff J. 2004: Gentoxische Effekte elektromagnetischer Felder 10 (2): 1, 5-7
- Behrendt D., Neitzke H.-P., Neitzke T., Osterhoff J., Kleinhüchelkotten S. & Voigt H. 2003: Funk-Netzwerke. Sachstandsermittlung zur Netzwerktechnologie WLAN im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- Neitzke H.-P. 2003: Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz. *EMF-Monitor* 9 (6): 1, 3-6
- Neitzke H.-P. 2003: Niederfrequente Magnetfelder und neurodegenerative Erkrankungen. *EMF-Monitor* 9 (5): 1-3
- Neitzke H.-P. 2003: Mobilfunk - Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Vorsorge. Stellungnahme zur Anhörung im Gesundheitsausschuss der Hamburgischen Bürgerschaft. Hamburg, 27. Februar 2003
- Neitzke H.-P. & Osterhoff J. 2003: Wirkung von GSM und UMTS-Feldern auf Wohlbefinden und kognitive Funktionen. *EMF-Monitor* 9 (5): 3-5
- Neitzke H.-P., Osterhoff J. & Voigt H. 2003: Biologische Wirkungen schwacher HF-Felder und Empfehlungen zur Begrenzung der Expositionen durch Funksendeanlagen. *EMF-Monitor* 9 (2): 1-8
- Neitzke H.-P., Voigt H., Behrendt D., Kleinhüchelkotten S., Osterhoff J. & Schlußmeier B. 2003: Vorsorgemaßnahmen im Bereich Mobilfunk. Strategiepapier im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz. (Zusammenfassung der Empfehlungen und Stellungnahme des BfS unter [www.bfs.de/elektro/papiere/strategiepapier\\_mf.html](http://www.bfs.de/elektro/papiere/strategiepapier_mf.html))
- Neitzke H.-P., Voigt H., Behrendt D., Osterhoff J. & Voß A. 2003: Erfüllung der freiwilligen Selbstverpflichtung der Mobilfunknetzbetreiber gegenüber der Bundesregierung vom 6. Dezember 2001. Bestandsaufnahme im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz

- Voigt H. 2003: Neue Techniken: DVB-T. EMF-Monitor 9 (3): 8-12
- Neitzke H.-P. 2002: Gesundheitliche Risiken durch die elektromagnetischen Felder von Mobilfunkanlagen. Gutachterliche Stellungnahme für das Amtsgericht Kempten
- Neitzke H.-P. 2002: Kriterien für strahlungsarme Handys. Sachverständigenanhörung der Jury Umweltzeichen. Berlin, 10. Juni 2002
- Neitzke H.-P. 2002: Mobilfunk – Risiken und Vorsorge. Anhörung im Hessischen Landtag. Wiesbaden, 24. Januar 2002
- Neitzke H.-P. 2002: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Telekommunikation und deren Bedeutung für die öffentliche Gesundheitsvorsorge. Tagung der Ev. Akademie Loccum, 11-13. Februar 2002
- Neitzke H.-P. 2002: Niederfrequente Magnetfelder und Krebs: Schlussfolgerungen aus den epidemiologischen Studien. EMF-Monitor 8 (1): 3-5
- Neitzke H.-P. 2002: Was ist neu am Risiko Mobilfunk? Zur Typologie technologischer Risiken. ECOLOG Arbeitspapier T&U 01/03
- Neitzke H.-P. & Osterhoff J. 2002: Elektromagnetische Felder als Ursache neurodegenerativer Erkrankungen, depressiver Symptome und Selbstmord. EMF-Monitor 8 (3): 8-9, 8 (4): 1-6
- Voigt H. 2002: Neue Techniken: Der neue digitale Behörden- und Polizeifunk TETRA. EMF-Monitor 8 (3): 1, 5-6
- Depner K., Hennies K., Neitzke H.-P. & Voigt H. 2001: Bewertung der Risiken elektromagnetischer Felder für Umwelt und Gesundheit. I. Niederfrequente Felder. Diskussionspapier für das Bundesamt für Strahlenschutz und die Strahlenschutzkommission. ECOLOG Arbeitspapier T&U 02/01
- Neitzke H.-P. 2001: Risiken durch den Mobilfunk. Sachverständigenanhörung der Ausschüsse für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie Gesundheit des Deutschen Bundestages. Berlin, 2. Juli 2001
- Neitzke H.-P. 2001: Die Risiken sind ungeklärt: Neue Techniken auf dem Vormarsch. EMF-Monitor 7 (4): 2-4
- Neitzke H.-P. 2001: Energie ist in der Luft – Energetische Umweltverschmutzung durch Mobilfunksendeanlagen. Vorgänge 153: 88-94
- Neitzke H.-P. 2001: Magnetfelder und Leukämie bei Kindern. EMF-Monitor 7 (1): 1-3
- Osterhoff J. 2001: Mögliche kokarzinogene Effekte magnetischer Felder. EMF-Monitor 7 (4): 4-5
- ECOLOG 2000a: Neitzke H.-P., Hennies K. & Voigt H.: Gesundheitliche Auswirkungen und biologische Effekte niederfrequenter Magnetfelder. Diskussionspapier für ein Fachgespräch der Strahlenschutzkommission
- ECOLOG 2000b: Neitzke H.-P., Hennies K. & Voigt H.: Gesundheitliche Auswirkungen und biologische Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder. Diskussionspapier für ein Fachgespräch der Strahlenschutzkommission
- Hennies K., Neitzke H.-P. & Voigt H. 2000: Mobilfunk und Gesundheit. Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes. Gutachten im Auftrag der Fa. T-Mobil
- Neitzke H.-P. 2000: Kinder im Kreuzfeuer elektromagnetischer Felder. EMF-Monitor 6 (3): 1-2
- Neitzke H.-P., van Capelle J., Depner K. & Hanisch T. 1994: Risiko Elektromog? Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Gesundheit und Umwelt. Birkhäuser Verlag, Basel

### Andere Publikationen

- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) 2004: Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld
- Bundesamt für Strahlenschutz 2004: Strahlung / Strahlenschutz. Eine Information des Bundesamtes für Strahlenschutz
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schweiz) 2005: Elektromog in der Umwelt
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz) 2003: Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. BUWAL Umwelt-Materialien Nr. 162
- Strahlenschutzkommission 2001: Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission
- Strahlenschutzkommission 2003: Neue Technologien (einschließlich UMTS): Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission



## Kontakte

### Bundesamt für Strahlenschutz

#### Aufgaben

- Bündelung der Kompetenzen auf den Gebieten Strahlenschutz, kerntechnische Sicherheit, Transport und Verwahrung von Kernbrennstoffen sowie Endlagerung radioaktiver Abfälle im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Forschung auf den Gebieten Strahlenschutz, Strahlenschutzvorsorge, kerntechnische Sicherheit und nukleare Ver- und Entsorgung
- Gesundheitlicher, umweltbezogener und physikalisch-technischer Schutz der Menschen und der Umwelt vor Schäden durch ionisierende und nichtionisierende Strahlung
- Radiologischer Notfallschutz
- Kerntechnische Sicherheit
- Staatliche Verwahrung von Kernbrennstoffen
- Entsorgung radioaktiver Abfälle
- Sicherheit der Beförderung und Aufbewahrung von Kernbrennstoffen
- Kontinuierlichen Messungen der Radioaktivität in der Umwelt

#### Kontakt

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Tel. 01888-333-0

Fax 01888-333-1885

E-Mail [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Internet [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

### ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH

#### Aufgaben

- Forschung und Auswertung von Forschungsergebnissen zu den Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Umwelt und Gesundheit
- Entwicklung von Konzepten für den vorsorgenden Umwelt- und Gesundheitsschutz im Zusammenhang mit technologischen elektromagnetischen Feldern
- Unterstützung bei der Überprüfung und bei der Vorsorge orientierten Planung von emittierenden Anlagen (Stromversorgungsanlagen, Mobilfunk- und andere Funkanlagen)
- Messung und Berechnung niederfrequenter elektrischer und magnetischer sowie hochfrequenter elektromagnetischer Felder
- Umwelt- und Risikokommunikation
- Herausgabe des Fachinformationsdienstes *EMF Monitor – Elektromagnetische Felder, Umwelt und Gesundheit* mit

Analysen des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes, Informationen über neue Forschungsergebnisse, Berichten über neue technische Entwicklungen, Darstellungen und Bewertungen von Schutz- und Vorsorgemaßnahmen

#### Kontakt

ECOLOG-Institut  
Nieschlagstr. 26  
30449 Hannover  
Tel. 0511-9245646  
Fax 0511-9245648  
E-Mail mailbox@ecolog-institut.de  
Internet www.ecolog-institut.de

### **Strahlenschutzkommission**

#### Aufgaben

- Beratung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in den Angelegenheiten des Schutzes vor den Gefahren ionisierender und nichtionisierender Strahlen
- Stellungnahmen und Empfehlungen zur Bewertung biologischer Strahlenwirkungen und zu Dosis-Wirkungsbeziehungen
- Erarbeitung von Vorschlägen für Dosisgrenzwerte und daraus abgeleitete Grenzwerte
- Beobachtung der Entwicklung der Strahlenexposition der Gesamtbevölkerung, spezieller Gruppen der Bevölkerung und beruflich strahlenexponierter Personen
- Anregung zu und Beratung bei der Erarbeitung von Richtlinien und besonderen Maßnahmen zum Schutz vor den Gefahren ionisierender und nichtionisierender Strahlen
- Beratung bei der Erarbeitung von Empfehlungen zum Notfallschutz und bei der Planung von Maßnahmen zur Reduzierung der Strahlenexposition bei kerntechnischen Notfällen und Katastrophen
- Erarbeitung genereller Ausbreitungsmodelle für die von kerntechnischen Anlagen und bei der technischen und medizinischen Anwendung von radioaktiven Stoffen mit Abluft und Abwasser freigesetzten Radionuklide
- Beratung des BMU bei der Auswertung von Empfehlungen für den Strahlenschutz, die von internationalen Gremien erarbeitet wurden
- Beratung der Bundesregierung bei ihrer Mitwirkung in internationalen Gremien
- Beratung des BMU bei der Aufstellung von Forschungsprogrammen zu Fragen des Strahlenschutzes sowie deren wissenschaftliche Begleitung

#### Kontakt

Strahlenschutzkommission  
Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn  
Fax 0228-676459  
E-Mail HHeller@bfs.de  
Internet www.ssk.de



## **Verbraucher Initiative e.V.**

### Aufgaben

- ökologischer, gesundheitlicher und sozialer Verbraucherschutz
- Verbraucherinformation

### Kontakt

Die VERBRAUCHER INITIATIVE e.V.  
Elsenstraße 106  
12435 Berlin  
Tel. 030-53 60 73-3  
Fax 030-53 60 73-45  
E-Mail [mail@verbraucher.org](mailto:mail@verbraucher.org)  
Internet [www.verbraucher.org](http://www.verbraucher.org)

## **Verbraucherzentrale Bundesverband e.V.**

### **Verbraucherzentralen**

### Aufgaben

- Vertretung der Interessen der Verbraucher gegenüber Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit
- Dachorganisation von 39 Verbraucherverbänden (16 Verbraucherzentralen und 23 weitere Verbände)
- Verbraucherberatung und -information

### Kontakt

Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. - vzbv  
Markgrafenstraße 66  
10969 Berlin  
Tel. 030-25800-0  
Fax 030-25800-218  
E-Mail [info@vzbv.de](mailto:info@vzbv.de)  
Internet [www.vzbv.de](http://www.vzbv.de)  
[www.verbraucherzentrale.de](http://www.verbraucherzentrale.de)