



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 μ T) = 1/1.000 mT

1 Nanotesla (1 nT) = 1/1.000 μ T

Leistungsdichte

Grundeinheit: Watt pro Quadratmeter (W/m²)

abgeleitete Einheiten:

1 Milliwatt pro Quadratmeter (1 mW/m²) = 0,001 W/m² = 1/1.000 W/m²

1 Nanowatt pro Quadratcentimeter (1 nW/cm²) = 0,000.01 W/m²

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.

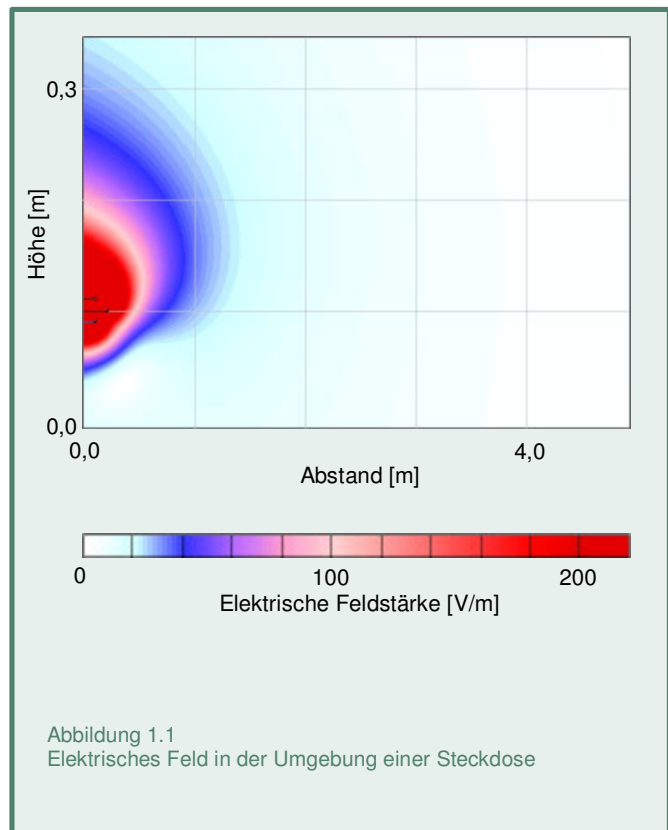
Jede elektrische Spannung führt zu einem elektrischen Feld. Daher sind elektrische Hochspannungsleitungen und elektrische Anlagen bis hin zur Steckdose von elektrischen Feldern umgeben. Für die Entstehung elektrischer Felder ist es nicht notwendig, dass ein elektrischer Strom fließt. Es gibt z.B. elektrische 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 (μT) 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.

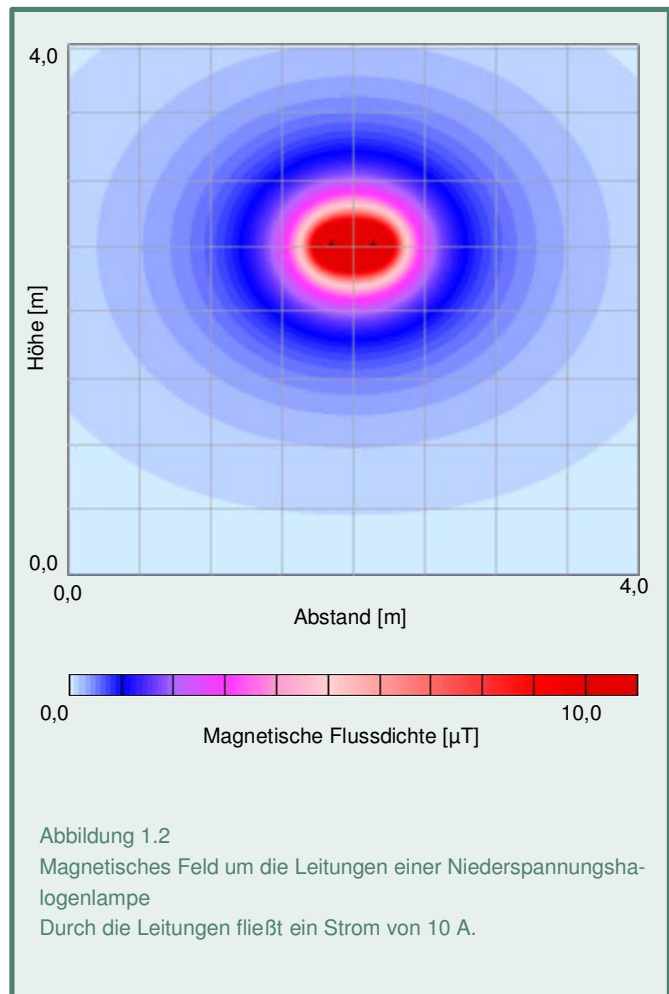
Auch bei den Magnetfeldern ist auf zwei wichtige Eigenschaften hinzuweisen:

- 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**.

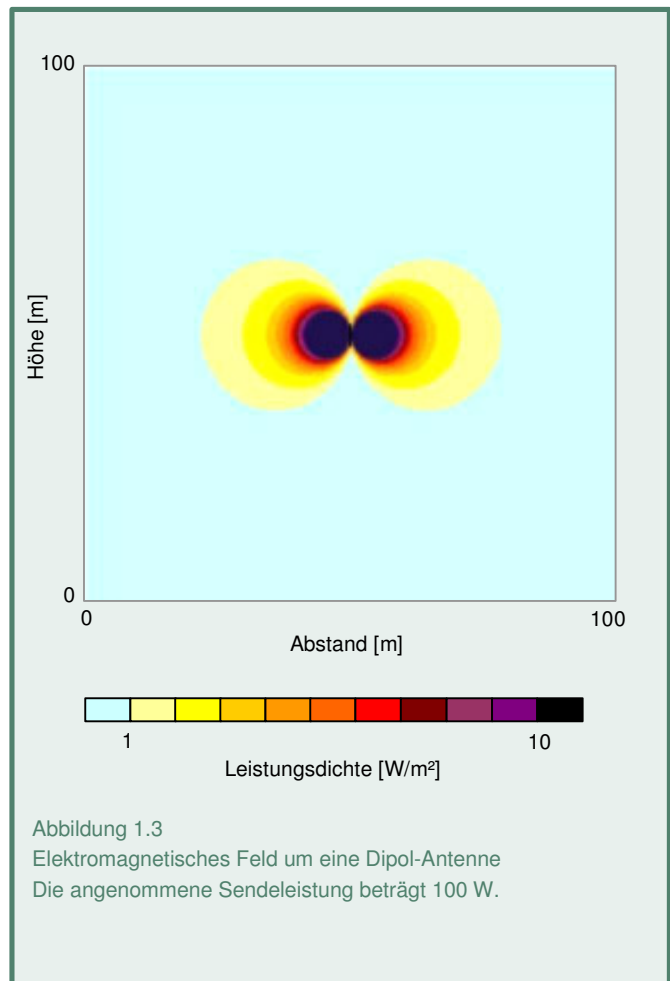
Ein elektromagnetisches Feld wird durch seine **Frequenz** und seine **Intensität** charakterisiert. Letztere wird anhand der Stärke des elektrischen Feldanteils (**Elektrische Feldstärke**, s.o.) oder der **Leistungsdichte** bestimmt. Die **Leistungsdichte** wird in der Einheit 'Watt pro Quadratmeter' (abgekürzt: W/m^2) angegeben. In der Einheit W/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 W/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 Morsen. 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 Erwär-



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.

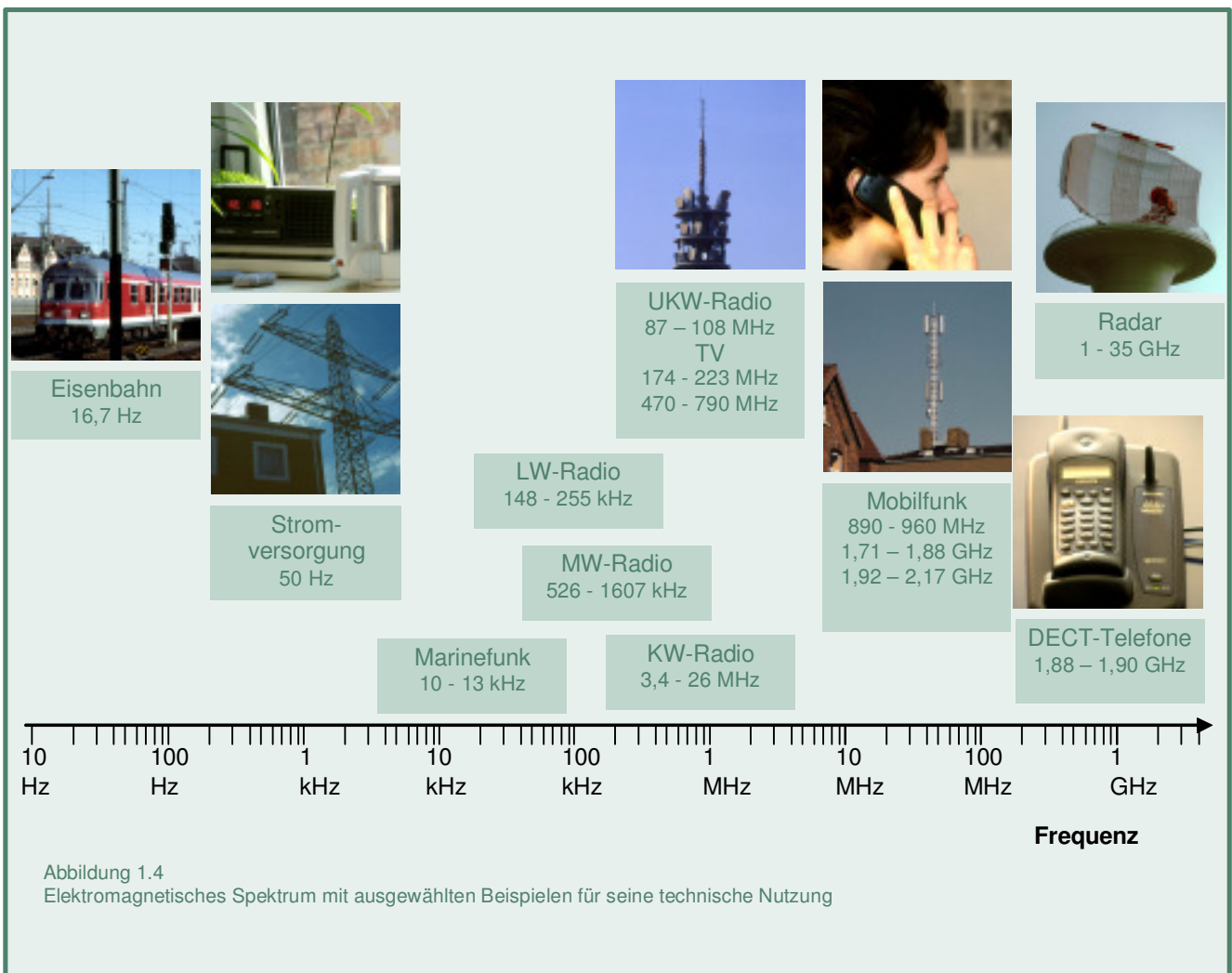
Es schließt sich der **Niederfrequenzbereich** an, der den Bereich von den niedrigsten Frequenzen bis zur Frequenz 30 kHz umfasst. Zu den niederfrequenten Feldern gehören unter anderem die Felder an elektrifizierten Eisenbahnstrecken (Frequenz 16,7 Hz) und die Felder um elektrische Leitungen, Geräte 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.



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
Frequenzbereiche des elektromagnetischen Spektrums

Frequenz	Bezeichnung	Beispiele
Niederfrequenzbereich		
0 Hz	statische Felder	Permanentmagnete, Batterien, Erdmagnetfeld
0 Hz bis 3 Hz	ultra niederfrequente (ULF) Felder	
3 Hz bis 3.000 Hz	extrem niederfrequente (ELF) Felder	elektrische Bahnanlagen, Stromversorgung
3 kHz bis 30 kHz	sehr niederfrequente (VLF) Felder	U-Boot-Kommunikation
Hochfrequenzbereich		
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	sehr hochfrequente (VHF) Wellen	UKW-Radio, TV, Amateurfunk
300 MHz bis 3.000 MHz	ultra hochfrequente (UHF) Wellen	TV, Amateurfunk, Mobilfunk, Schnurlos-Telefon, Mikrowellenherd
3 GHz bis 30 GHz	super hochfrequente (SHF) Wellen	Radar, Richtfunk
30 GHz bis 300 GHz	extrem hochfrequente (EHF) Wellen	Verkehrsradar
0,3 THz bis 400 THz	Infrarot (IR)	Fernbedienung
400 THz bis 750 THz	sichtbares Licht	Sonne, Beleuchtung
750 THz bis 30000 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.

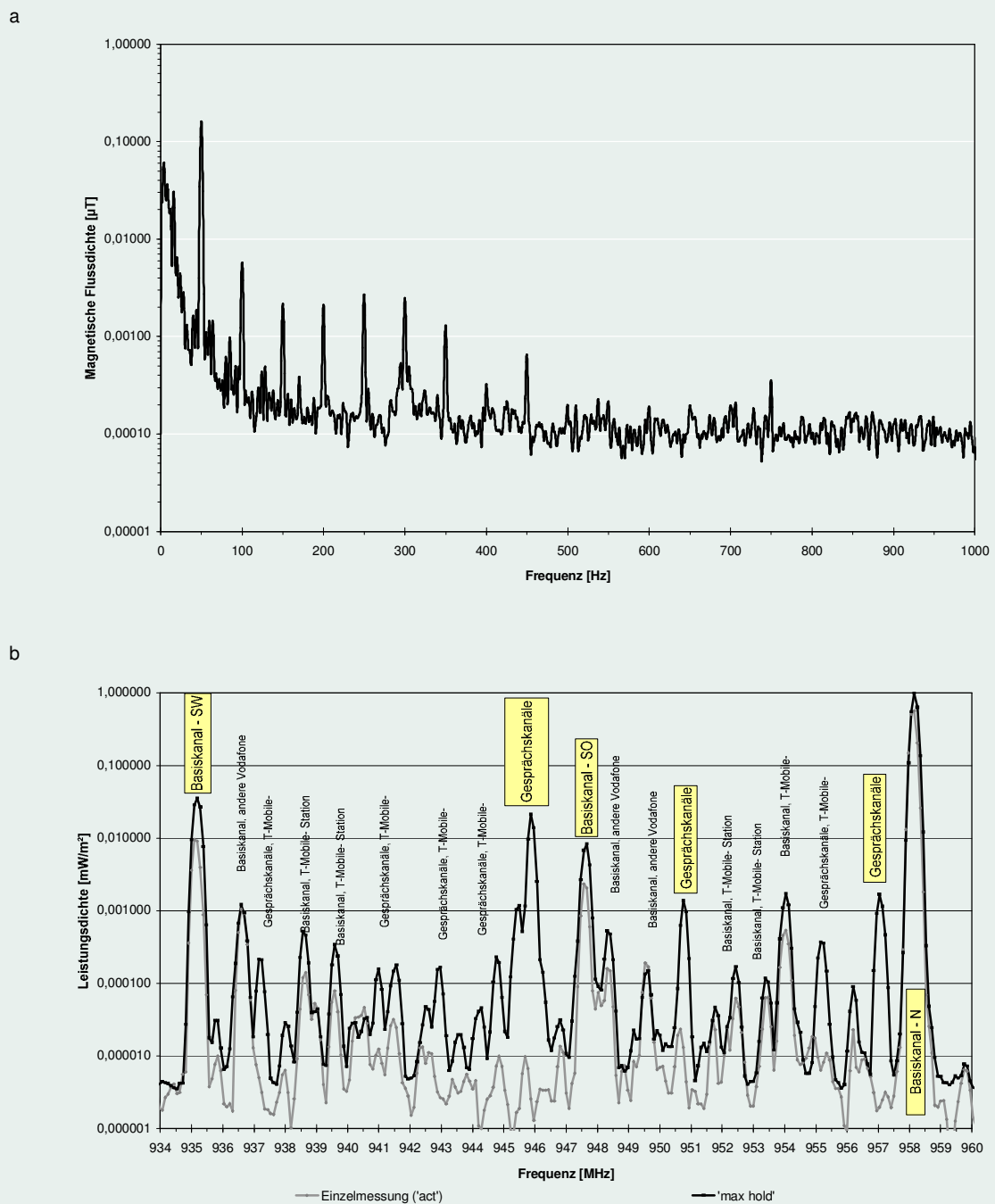


Abbildung 1.7

Ergebnisse frequenz-selektiver Messung

- a) Messung des Magnetfeldes in einem Büro über einer Trafostation mit Beiträgen bei 50 Hz und Vielfachen der Grundfrequenz
- b) Messung des elektromagnetischen Feldes in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation (GSM 900).