

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Dipl.-Ing. Maik Lindenmann, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer, Dr.-Ing. Carsten Rusteberg
HAWK Hildesheim

1 Allgemeine Welleneigenschaften

Es gibt zwei Möglichkeiten um Energie zu transportieren, zum einen durch Wellen und zum anderen durch Teilchen. Wellen übertragen Energie ohne dabei den Transport von Materie zu nutzen, Teilchen dagegen übertragen Energie, indem sie durch ihre Masse und Ladung mit einem anderen Medium in Wechselwirkung treten.

Allgemein wird unterschieden zwischen Strahlen, Wellen und Feldern:

Strahlen: Wellen mit sehr kleinen Wellenlängen (Röntgenstrahlen, Lichtstrahlen)

Wellen: Wellen mit größeren Wellenlängen (Lichtwellen, Schallwellen)

Felder: Wellen mit sehr großen Wellenlängen (Elektrische Felder, Magnetfelder) [19]

2 Bewegte und Ruhende Ladungen

2.1 Elektrische Gleichfelder (Elektrostatik)

Die Elektrostatik ist die Lehre von den Kräften zwischen ruhenden elektrischen Ladungen, d.h. durch die Trennung eines neutralen Körpers, entstehen positiv und negativ geladene Teilchen, die ein elektrisches Spannungsfeld aufbauen.

Die Stärke dieses elektrischen Spannungsfeldes wird in V/m (Volt pro Meter) angegeben.

Solche Ladungstrennungen entstehen beispielsweise bei Reibung gleicher oder verschiedener Materialien, z.B. bei Synthetikfasern oder Kunststoffoberflächen.

Problematisch bei diesen elektrostatischen Aufladungen ist, neben der Aufladung des Körpers, die Veränderung des Raumklimas. Die Zusammensetzung der Luftionisation im Raum verschiebt sich, was zur Folge hat, dass Staub, Reizstoffe und andere Allergene durch statisch aufgeladene Materialien angezogen werden.

Das elektrische Gleichfeld kann nicht nur als elektrisches Spannungsfeld gemessen werden, sondern auch als Oberflächenspannung in Volt. [1, 2, 3]

Elektrische Gleichfelder entstehen vor Bildschirmen, durch synthetische Fasern wie Teppiche oder Gardinen und an Kunststoffoberflächen wie Kunststoffbodenbeläge, Lacke oder künstliche Furniere.

2.2 Magnetische Gleichfelder (Magnetostatik)

Da magnetische Gleichfelder keine zeitliche Änderung besitzen, sind die Möglichkeiten der Wirkungsweise beschränkt. Einerseits existiert die Kraftwirkung auf Teilchen und Gegenstände, wie beispielsweise Stahlträger, Türcargen, Geräte und Lautsprecherboxen und andererseits erzeugen sie elektrische Spannungen in Körperteilen. Die Höhe der elektrischen Spannungen und Ströme hängt zum einen von der Feldstärke und zum anderen von der Geschwindigkeit ab, mit der sich der Körper durch das vorhandene Feld bewegt.

Das größte uns bekannte magnetische Gleichfeld ist das natürliche Erdmagnetfeld. Dabei wirkt die Erde als ein Stabmagnet. Der Mensch hat sich seit Generationen daran gewöhnt und lediglich durch die Veränderung des Feldes durch Gleichstrom von Straßenbahnen oder magnetisierbaren Metallen

kommt der Körper in eine ungewohnte „Magnetfeldsituation“ [2]. Im Körper werden durch diese künstlichen magnetischen Gleichfelder Ströme erzeugt, die die körpereigenen Ströme stören können. Gemessen werden die magnetischen Gleichfelder durch die Änderung der magnetischen Flussdichte in Tesla (T) oder durch die Abweichung der Kompassnadel von den natürlichen Feldlinien in Grad (°). Magnetische Gleichfelder entstehen beispielsweise durch den Gleichstrom von schienengebundenen Bahnen, Photovoltaikanlagen oder durch magnetische Metalle (Stahlträger in einem Haus).

2.3 Elektrische Wechselfelder (Niederfrequenz)

Frequenzbereich 0 Hz (Hertz) bis 30 kHz (Kilohertz)

Nach [1] und [2] sind elektrische Wechselfelder eine Folge elektrischer Spannungen, die unter anderem in Installationen, Kabeln, Geräten, Motoren und Transformatoren, anliegen, auch wenn kein Strom fließt. Die unterschiedlichen Betriebsspannungen haben einen Einfluss auf die Größe des elektrischen Feldes. So liegt im Haus in der Regel eine Betriebsspannung von 230/400 Volt, in Mittelspannungsleitungen 20.000 Volt (20 Kilovolt) und in Hochspannungsleitungen 110.000–380.000 Volt (110–380 kV) vor.

Die elektrische Spannung (Formelzeichen U oder V) wird als Potentialdifferenz zweier Orte im elektrischen Feld definiert. Sie wird gemessen in Volt (V). [3, 4]

$$U = \frac{W}{Q} \text{ (Gleichung 2-1)}$$

Dabei bedeuten:

U = elektrische Spannung zwischen zwei Punkten P_1 und P_2

W = Ladungstrennungsarbeit [J]

Q = Ladung [C]

Mit Hilfe der elektrischen Spannung kann die elektrische Feldstärke (in V/m) gemessen werden, die je nach Qualität der Installation z.B. sehr unterschiedliche Größen haben kann.

$$E = \frac{F}{Q} \text{ (Gleichung 2-2)}$$

Dabei bedeuten:

E = elektrische Feldstärke

F = die auf die Ladung Q ausgeübte Kraft [N]

Q = Ladung [C]

Die elektrische Feldstärke E nimmt mit der Entfernung zur Quelle ab ($1/r^2$). [5]

Der menschliche Körper wird durch niederfrequente elektrische Felder genauso wie jedes andere, aus geladenen Teilchen bestehende Material, beeinflusst. Wenn elektrische Ladungen auf leitfähige Materialien treffen, wird die räumliche Verteilung auf der Materialoberfläche beeinflusst. [7,8]

Jedoch dringt das elektrische Feld, im Gegensatz zum magnetischen Feld nicht in leitfähige Materialien ein, sondern endet an deren Oberfläche, zum Beispiel an Gebäuden, Pflanzen oder dem menschlichen Körper. Der kapazitive Strom dringt in den Körper (überwiegend in den oberen Körperbereich) ein und fließt als Leitungsstrom über die Blutbahnen zur Erde ab.

In dem Bereich der elektrischen Wechselfelder können folgende Beispiele genannt werden: ungeschirmte Leitungen, Kabel und Geräte, die unter Spannung stehen; Elektroinstallationen mit Stegleitungen und Einzeldrähten ohne Schutzleiter; Geräteanschlusskabel mit Euroflachstecker oder Konturenstecker, denen der gelb-grüne Schutzleiter fehlt; ungeschirmte Verlängerungskabel und Tischverteiler; ungeschirmte Lampen im Nahbereich; Energiesparlampen, Leuchtstofflampen oder Dimmer. [35]

2.4 Magnetische Wechselfelder (Niederfrequenz)

Frequenzbereich 0 Hz bis 30 kHz

Nach [1] und [2] sind magnetische Wechselfelder eine Folge von elektrischem Stromfluss. Die Größe des magnetischen Feldes ist abhängig von dem Abstand der Leiter und der Höhe des Stromflusses (Stromstärke).

Ein magnetisches Feld baut sich auf, wenn ein elektrischer Strom fließt. Die magnetische Feldstärke (Formelzeichen H) beschreibt jeden Punkt eines magnetischen Feldes im Vakuum. Sie wird in Amperen pro Meter (A/m) gemessen. [3, 4, 6]

$$H = \frac{N}{l} \times I \text{ (Gleichung 2-3)}$$

Dabei bedeuten:

H = Betrag der magnetischen Feldstärke

N = Windungszahl der Spule [1]

l = Länge der Spule [m]

I = Stromstärke [A]

Um die Richtung und Stärke einer magnetischen Wirkung zu beschreiben, dient nicht nur die magnetische Feldstärke, sondern auch die magnetische Flussdichte (Formelzeichen B), gemessen in Tesla (T). Im Vakuum sind diese beiden Größen stets gleichgerichtet und proportional zueinander.

Es gilt die Beziehung:

$$B = \mu_0 H \text{ (Gleichung 2-4)}$$

Dabei bedeuten:

B = magnetische Flussdichte

μ_0 = magnetische Feldkonstante (Proportionalitätskonstante) [Vs/Am]

H = magnetische Feldstärke

Die magnetische Feldkonstante beträgt:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \text{ (Gleichung 2-5)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \text{ (Gleichung 2-5) gilt nur im materiefreien Raum.}$$

Magnetische Felder (Niederfrequenz) induzieren im menschlichen Körper Ströme, die auf geschlossenen Kreiswegen durch diesen fließen. Je größer diese Ströme sind, desto mehr können sie Nerven und Muskeln stimulieren oder andere biologische Vorgänge des Körpers beeinflussen. Die Stärke der Ströme wird durch das äußere Magnetfeld bestimmt. [7, 8]

Im Gegensatz zum elektrischen Feld durchdringt das magnetische Feld, weitgehend ungehindert, Gebäude und biologische Substanzen. So kommt es dazu, dass neben dem magnetischen Feld im Körper ein induziertes elektrisches Wirbelfeld entsteht.

Niederfrequente magnetische Wechselströme entstehen in verschiedenen Bereichen des täglichen Lebens. Zum einen durch Ausgleichsströme auf Datenkabeln, Schutzleitern, Gas- und Wasserleitungen sowie Fernwärmerohre, zum anderen im Nahbereich von Hochspannungsleitungen, Bahnstromanlagen und Dachüberspannungen, im häuslichen Bereich dürfen Magnetfelder in Folge von Fußbodenheizungen und Heizdecken nicht vernachlässigt werden..

Starke lokale Magnetfelder können durch Aquariumpumpen, Overheadprojektoren, elektrische Uhren, Radiowecker, CD-Player, Fernsehgeräte und sonstigem entstehen. [35]

2.4.1 Natürliche magnetische Wechselfelder (Spherics)

Atmospherics (atmosphärische Störungen) sind äußerst kurze elektromagnetische Impulse, die durch meteorologische Prozesse ausgelöst werden. Die Wellen liegen im Bereich von 10 kHz bis 100 kHz.

„Spherics – die Kurzform von „Atmospherics“ – bezeichnet langwellige elektromagnetische Impulse von weniger als einer Millisekunde Dauer, die im Zusammenhang mit Blitzen und konvektiven Prozessen in Wolken entstehen....“ [13]

Wissenschaftler haben bewiesen, dass der menschliche Körper nicht nur auf Veränderungen im Luftdruck, sondern auch auf elektromagnetische Wellen reagiert. Im Besonderen sensible Menschen, die „wetterfülig“ sind, können in 1000 km Entfernung auf ein Gewitter reagieren. Weiterhin gibt es (nach Reiter, 1960) durch Spherics noch andere Auswirkungen auf den Menschen, wie beispielsweise Kopfschmerzen bei Hirnverletzten, Phantomschmerzen bei Amputierten, eine Zunahme von Verkehrs- und Betriebsunfälle. [12, 14, 16]

3 Elektromagnetische Wellen (Hochfrequenz)

Frequenzbereich 30 kHz bis 300 GHz (Gigahertz)

Breiten sich elektrische und magnetische Felder gemeinsam in Raum und Zeit aus, verschmelzen sie und eine elektromagnetische Welle entsteht, d.h. sie stehen in einem direkten Zusammenhang zueinander. Elektromagnetische Wellen werden genutzt, um Daten in einem höheren Frequenzbereich (30 kHz bis 300 GHz) kabellos zu übermitteln. Ihre Einheit ist $\mu W / m^2$ [2, 3]

Die elektromagnetische Welle wird in zwei Komponenten aufgeteilt:

- die elektrische, die durch $E = \hat{E} \sin \varpi(t - \frac{x}{v})$ (Gleichung 3-1)
- die magnetische, die durch $B = \hat{B} \sin \varpi(t - \frac{x}{v})$ (Gleichung 3-2) beschrieben wird.

Dabei sind:

E = elektrische Feldstärke [V/m]

\hat{E} = Höchstwert von E

ϖ = 2π Kreisfrequenz der elektromagnetischen Welle [1/s]

x = x-Koordinate

v = Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle [m/s]

B = magnetische Induktion [T]

\hat{B} = Höchstwert von B

Diese beiden Komponenten sind bei den hochfrequenten elektromagnetischen Wellen sehr eng miteinander gekoppelt, das hat zur Folge, dass die Wirkung dieser Strahlung auf keine der Komponenten genau zurückgeführt werden kann. [10]

Die Frequenz und die Länge einer elektromagnetischen Welle sind zusammengehörig und beschreiben ihren Charakter. Eine kleine Wellenlänge bedeutet eine hohe Frequenz und eine große Wellenlänge eine geringe Frequenz (siehe Tabelle 7-2). Dazu ist anzumerken, dass die Strahlung auch energiegeladener ist, je höher die Frequenz.

Im Hochfrequenzbereich (30 kHz bis 300 GHz) sind die Wellen nicht mehr leitungsgeführt bzw. objektgebunden wie im Niederfrequenzbereich, sondern werden ohne Träger- oder Ausbreitungsmedium in die Umgebung abgestrahlt. Dies kann auch im Vakuum erfolgen. [9]

Die Wärmewirkung der hochfrequenten elektromagnetischen Wellen ist ein wichtiger biologischer Effekt und wird beispielsweise bei Mikrowellenherden genutzt. Menschen sind in der Regel wesentlich geringeren Feldern ausgesetzt, von daher erhalten sie auf Grund dessen keine deutliche Erwärmung. [7, 8]

Im Zusammenhang mit elektromagnetischen Wellen steht auch der Begriff der *Polarisation*. Eine Mobilfunkbasisstation beispielsweise sendet antennenbedingt elektromagnetische Wellen mit einer bestimmten Polarisation aus. Sie wird mithilfe der Richtung der elektrischen Feldlinien definiert. Das Handy empfängt bei „freier Sicht“ [20] die elektromagnetische Welle mit der Polarisation, mit der sie abgestrahlt wurde, die Polarisation ändert sich jedoch durch Reflexion, Beugung und Streuung der Welle (siehe folgendes Kapitel).

Immer häufiger werden heutzutage Mobilfunkbasisstationen diagonal polarisiert, so dass eine horizontale und vertikale Komponente vorhanden ist. Der Hauptvorteil dieser Polarisationsart liegt beim Empfang, die Feldanteile sind statistisch völlig unabhängig voneinander, d.h., wenn eine Richtung gerade in einem Minimum ist, kann das Signal meist noch über die andere Polarisation detektiert werden.

(Quelle: (1)) Problematisch kann dies bei Abschirmmaßnahmen sein.

Elektromagnetische Felder entstehen überall da, wo Hochfrequenz herrscht, beispielsweise bei schnurlosen Telefonen nach dem DECT Standard (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), die ständig gepulste (siehe unten) Mikrowellenstrahlen aussenden; drahtlose Computernetzwerke nach dem WLAN Standard (Wireless Local Area Network), die ebenfalls gepulste Mikrowellen aussenden; im Nahbereich von Mobilfunkbasisstationen (GSM, UMTS, TETRA), DECT-Telefonen und WLAN Sendern oder bei Mobiltelefonen (GSM und UMTS), die beim Gespräch starke Mikrowellenstrahlen abgeben.

4 Ausbreitung von Wellen

4.1 Reflexion

Ein Ausbreitungsweg der elektromagnetischen Wellen ist die „Reflexion“. Die physikalischen Eigenschaften von Wellen, wie beispielsweise Aggregatzustand, Dichte usw., ändern sich, wenn zwei Medien aneinandergrenzen. Daraus folgt, dass sich auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle ändert und es somit zu einer Aufspaltungs- und Richtungsänderung (Brechung) dieser Welle kommt.

Trifft eine Welle auf die Grenzfläche eines Körpers, beispielsweise eine Hauswand, wird sie reflektiert. In dem Fall gilt das Reflexionsgesetz:

- Einfallswinkel, Reflexionswinkel und Lot liegen in einer Ebene
- Einfallswinkel = Ausfallswinkel [19, 27]

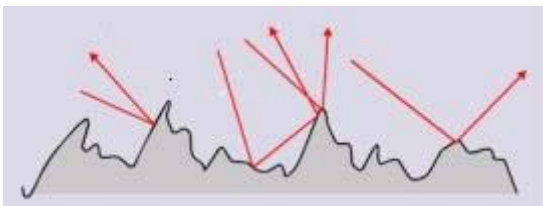


Abbildung 4-1 Reflexion an rauer Oberfläche (Quelle: [38])

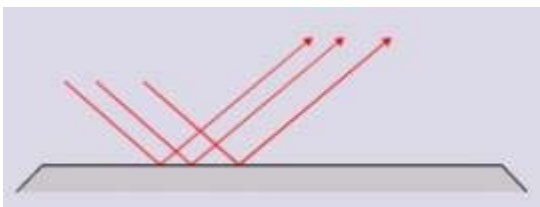


Abbildung 4-2 Reflexion an glatter Oberfläche (Quelle: [38])

4.2 Beugung

Ein weiterer Ausbreitungsweg ist die „Beugung“. Dieser Fall tritt ein, wenn eine Welle auf ein Hindernis trifft, beispielsweise ein Haus, und an dessen Gebäudekanten gebeugt wird. Die Welle erfährt eine Richtungsänderung und pflanzt sich auch in den geometrischen Schattenbereich des Gebäudes fort. Anhand des *Prinzips von Huygens* (C.Huygens, 1629 bis 1695) kann diese Richtungsänderung und die Ausbildung der neuen Wellenfront ermittelt werden:

- alle Punkte einer Wellenfläche (siehe Kapitel 10) schwingen mit der gleichen Phase
- sie haben dieselbe Frequenz wie der Erreger
- sie unterscheiden sich nicht grundsätzlich von diesem. [6]

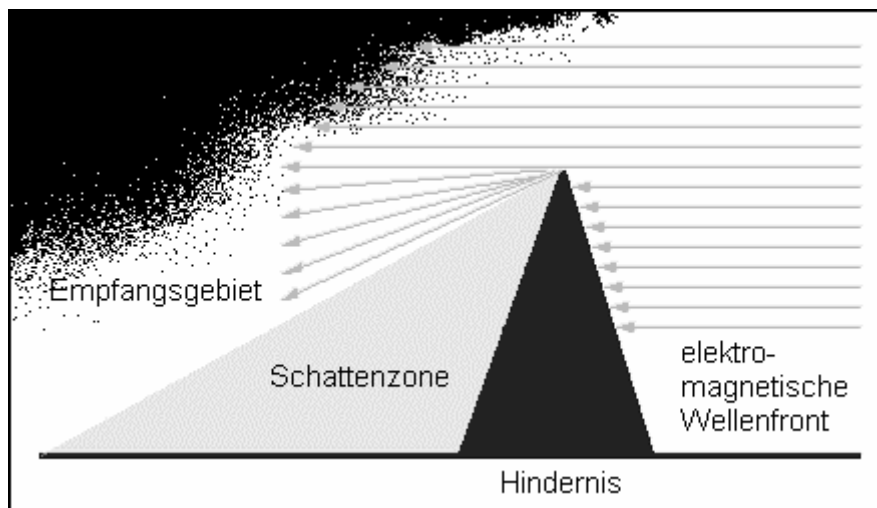


Abbildung 4-3 Beugung (Quelle: [40])

4.3 Streuung

Ein dritter Ausbreitungsweg ist die „Streuung“. Dieser Fall tritt ein, wenn eine elektromagnetische Welle auf ein Objekt trifft und eine diffuse „Streuwellen“ entsteht. In der Regel gibt es unendlich viele Streuobjekte, beispielsweise Bäume, Staubwolken oder eine Regenfront. Eine Person kann die Überlagerung von mehreren Wellen wahrnehmen, wenn diese die gleiche Wellenlänge, die gleiche Amplitude und die gleiche Phase haben. Die Welle verstärkt sich. Ein Ausnahmefall besteht dann, falls die vorhandenen Streuobjekte in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind, d.h. dass die Welle um eine halbe Wellenlänge verschoben wird und sie sich gegenseitig auslöschen können. Durch Wärme z.B. kann diese Regelmäßigkeit wieder aufgehoben werden und die Streustrahlung ist wieder messbar. [17, 18]

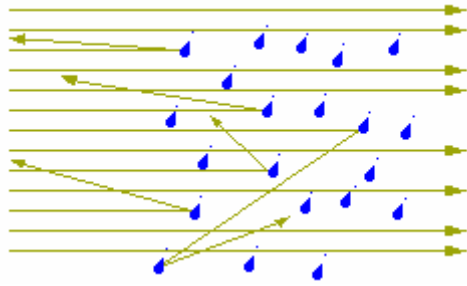


Abbildung 4-4 Streuung an Regentropfen (Quelle: [37])

5 Schirmung elektromagnetischer Wellen

Es gibt drei verschiedenen Arten der Feldbeeinflussung:

- Elektrisches Störfeld
- Magnetische Störfeld
- Störstrahlung

In diesem Fall wird die *Störstrahlung* näher betrachtet.

Eine Hauswand oder ein Raum beispielsweise können durch geeignete Baustoffe, Fenster- oder Wandbeschichtungen, um nur einige zu nennen, gegen eine Störstrahlung abgeschirmt, zumindest abgeschwächt werden. Problematisch sind jedoch oftmals Durchbrüche oder Schlitze in der Abschirmhülle, zum Beispiel wenn Fenster oder Türen nicht sachgemäß und „dicht“ eingebaut worden sind. Diese „Problemstellen“ verringern die Abschirmmaßnahmen erheblich.

Die Schirmwirkung eines Materials lässt sich durch die Schirmdämpfung bestimmen:

$$\text{Schirmdämpfung} = 10 \times \log_{10} \frac{\text{Leistungsflussdichte}_{\text{einf allende_Welle}}}{\text{Leistungsflussdichte}_{\text{durchgelassene_Welle}}} \quad [\text{dB}] \quad (\text{Gleichung 5-1})$$

Neben der Schirmdämpfung gibt es noch den Schirmwirkungsgrad, der die Schirmdämpfung in % (Prozent) angibt. Der Zusammenhang zwischen der Dämpfung in dB und dem Wirkungsgrad in % ist in der folgenden Tabelle ersichtlich:

Dämpfung		Dämpfung	
[dB]	[%]	[dB]	[%]
5	68	35	99,97
10	90	40	99,99
15	97	45	99,997
20	99	50	99,999
25	99,7	55	99,9997
30	99,9	60	99,9999

Tabelle 5-1 Schirmdämpfung (Quelle: [34])

In der Tabelle sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einige wichtige Werte zu finden.

Im Folgenden wird die Wirkung der Schirmung anhand von *Strahlungsschirmen* näher betrachtet: Die elektromagnetische Welle, die von einer Störquelle, wie einer Mobilfunksendeanlage, ausgeht breitet sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus. Sie besitzt eine elektrische Feldkomponente E und eine magnetische Feldkomponente H (siehe Kapitel 3.3 und 3.4). Im Fernfeld (siehe Kapitel 10) spielen die einzelnen Komponenten keine Rolle, da das Verhältnis E/H gleich dem Wellenwiderstand des freien Raumes ist. Im Nahfeld (siehe Kapitel 10) dagegen bestimmen die Eigenschaften der Störquelle, welche der beiden Komponenten überwiegt. [29]

Besonders geeignet für die Abschirmung elektromagnetischer Wellen eignen sich *Strahlungsschirme*. Es werden zwei verschiedene Arten unterschieden: Einstrahlschirme, die von außen schützen oder Abstrahlschirme, die den Austritt von elektromagnetischen Wellen verhindern.

Einstrahlschirme, die aus gut leitendem Material hergestellt werden, haben eine gute Schirmwirkung ähnlich wie bei Wirbelstromschirmen (diese werden hier nicht näher betrachtet), solange ihre Abmessungen kleiner als etwa die Hälfte der Wellenlänge bleiben. [30,31]

Abstrahlschirme wirken, indem sie die Störquelle in einem bestimmten Abstand r umhüllen. Nach der Theorie von Schelkunoff [31, 32, 33] können diese Art Schirme berechnet werden. Um die Theorie anzuwenden, muss die Laufzeit der Welle im ganzen Verlauf gleich sein, so dass der Schirm eine Isophasenfläche bilden kann, d.h., dass bei ebenen Wellen der Schirm eine ebene Fläche, bei Kugelwellen eine Kugel, bei Zylinderwellen ein Zylinder sein muss. [29]

Unabhängig von der Art des Schirmes ist die Wirkungsweise der Schirmdämpfung, sie setzt sich aus Reflexion und Absorption zusammen. Während die Absorptionsdämpfung für alle Feldtypen gleich ist, ist die Reflexionsdämpfung abhängig vom Feldtyp. Im Nahfeld zusätzlich vom Abstand r.

Um die Schirmdämpfung optimal ausnutzen zu können, muss der Schirm geerdet werden. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für eine Erdung: Schutzplatte *La Vita* (Firma Knauf):

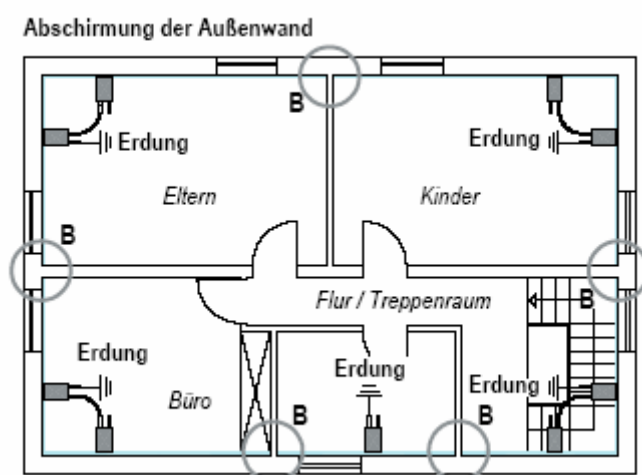


Abbildung 5-1 Abschirmung Schutzplatte *La Vita* (Einstrahlschirm) (Quelle: Knauf)

6 „Elektrosmog“

„Der Begriff „Elektrosmog“ ist Ende der siebziger Jahre entstanden. Sein Wortbestandteil „smog“ setzt sich aus den beiden englischen Worten „smoke“ (Rauch) und „fog“ (Nebel) zusammen. Parallel zu dem „normalen“ Smog bedeutet Elektrosmog also die zunehmende „Verunreinigung“ der menschlichen Umgebung mit elektromagnetischer Strahlung. Hierbei werden jedoch die unterschiedlichsten Strahlungsarten von Feldern und Wellen in einen Topf geworfen, was eine Unterscheidung nötig macht....“ [22]

„...Im Gegensatz zu „normalen“ Smog ist Elektrosmog jedoch nicht zu sehen oder zu riechen. Er läßt sich nur mit besonderen Elektrosmog-Messgeräten aufspüren und nachweisen. Für den Laien ist Elektrosmog gleich Elektrosmog, der Experte unterscheidet jedoch zwischen verschiedenen Arten von Elektrosmog. Überall, wo elektrische Leitungen und Elektrogeräte am Stromnetz angeschlossen sind, verursachen sie in der näheren Umgebung elektrische Wechselfelder. Es muß dabei gar kein Strom verbraucht werden....“ [23]

„**Elektrosmog** ist die populärwissenschaftliche Bezeichnung für potenziell gesundheitsschädliche elektromagnetische Strahlung bzw. elektromagnetische Felder (Quelle: Microsoft Encarta 2002).“ [24]

„..., aber jüngst auch der sogenannte Elektrosmog. Hierunter werden elektromagnetische Felder verstanden, die z.B. durch Hochspannungsleitungen verursacht werden können aber auch durch Sende- und Empfangsanlagen von Mobilfunkbetreibern. Gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse zur Gesundheitsgefährdung liegen bisher nicht vor,...“ [25]

„Elektrosmog – das sind künstlich erzeugte elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder, die um elektrische betriebene Geräte, Sendemasten, Strom- und Hochspannungsleitungen herum entstehen....“ [26]

Die dargestellten Zitate verdeutlichen, dass der Begriff „Elektrosmog“ in der Gesellschaft viele Definitionen besitzt. Dieser Begriff wird immer dann eingesetzt, wenn es um Strahlung, Wellen oder Felder geht, wobei diese Begriffe eigentlich sorgfältig getrennt werden müssten.

Bei dem Wort „Elektrosmog“ weiß der Leser nicht, ob es sich um niederfrequente elektrische oder magnetische Felder oder aber um hochfrequente elektromagnetische Felder handelt, d.h. er kann daraus nicht ableiten, ob es sich um den „gleichen“ Elektrosmog handelt, von dem er in einem anderen Bericht gelesen hat.

Deutlich soll werden, dass es nicht „den“ Elektrosmog gibt. Es gibt Wirkungen niederfrequenter elektrischer oder magnetischer Felder, sowie hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den menschlichen Körper, aber wie groß diese und in welchem Umfang sie für den Körper schädlich sind, ist derzeit noch recht „umstritten“. Im Zuge der anschließenden Diplomarbeit soll auf dieses Thema noch näher eingegangen werden.

7 Frequenzen und Funkdienste

In der Bundesrepublik Deutschland gilt seit dem 26. April 2001 die *Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung* (FreqBZPV). Diese Verordnung regelt die Zuweisung von Frequenzbereichen an einzelne Funkdienste und an andere Anwendungen elektromagnetischer Wellen. (§1)

In einem Frequenzbereich werden die technisch genutzten elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge und Schwingungszahl eingeteilt. Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Frequenzen und deren Anwendungsgebiete:

Frequenzbereich	Anwendungsgebiet
5 Hz - 2 kHz	TCO-Band I
$16 \frac{2}{3}$ Hz	Bahnstromanlage
50 Hz	elektrische Haushaltsgeräte
2 kHz - 400 kHz	TCO-Band II
150 - 285 kHz	Langwellensender
0,525 - 1,605 MHz	Mittelwellensender
6 - 26 MHz	Kurzwellensender
27 - 433 MHz	Babyphone
88 - 108 MHz	UKW-Sender
174 - 223 MHz	Fernsehen (VHF)
223 - 230 MHz	T-DAB, Digitaler Rundfunk *
230 - 329 MHz	Flugfunk, Richtfunk
380 - 383 MHz	TETRA, digitaler Bündelfunk, Uplink*
390 - 393 MHz	TETRA, digitaler Bündelfunk, Downlink*
430 - 440 MHz	Amateurfunk 70 cm-Band
451 - 456 MHz	C-Netz, Mobilfunk, Uplink (Ende 2000 abgeschaltet)
461 - 466 MHz	C-Netz, Mobilfunk, Downlink (Ende 2000 abgeschaltet)
470 - 790 MHz	Fernsehen (UHF)
864 - 868 MHz	Schnurlose Telefone CT-2*
885 - 887 MHz	Schnurlose Telefone CT-1+, Uplink (nicht gepulst)
890 - 915 MHz	D-Netz, Mobilfunk, Uplink*
930 - 932 MHz	Schnurlose Telefone CT-1+, Downlink (nicht gepulst)
935 - 960 MHz	D-Netz, Mobilfunk, Downlink*
960 - 1.215 MHz	IFF, SSR, Flugnavigationdienst
1.215 - 1.240 MHz	Satellitennavigationsdienst GPS (militärische Nutzung)
1.240 - 1.400 MHz	ARSR, Flugsicherungsradar*
1.492 - 1.525 MHz	Fester und beweglicher Funkdienst, Richtfunk
1.559 - 1.610 MHz	Satellitennavigationsdienst GPS (zivile Nutzung)
1.616 - 1.626 MHz	IRIDIUM, Satelliten-Mobilfunk*
1.710 - 1.785 MHz	E-Netz, Mobilfunk, Uplink*
1.805 - 1.880 MHz	E-Netz, Mobilfunk, Downlink*
1.880 - 1.900 MHz	Schnurlose Telefone DECT*
1.920 - 2.170MHz	UMTS, 3 Mobilfunkgeneration*
2.290 - 2.300 MHz	Fester Funkdienst; Richtfunk; Beweglicher Funkdienst
2.320 - 2.400 MHz	Drahtlose Fernsehkameras; Beweglicher Funkdienst; Radar*
2.320 - 2.450 MHz	Bluetooth, häusliches Datentelekommunikationssystem*; Funkbewegungsmelder, Fernwirkfunkanlagen, WLAN
2.450 MHz	Mikrowellenherd*
2.500 - 2.670 MHz	Richtfunk, Radioastronomiefunkdienst
2.540 - 2.670 MHz	PMP, Punkt zu Multipunkt-Richtfunk*
2.700 - 3.400 MHz	TAR/ASR, Nahbereichsradar von Flughäfen, Reichweite bis 100km*
3.600 - 4.200 MHz	Fester Funkdienst; Richtfunk, Nichtnavigatorischer Ortungsfunkdienst

4.400 - 5.000 MHz	Richtfunk
5.225 - 5.850 MHz	Wetterradar; Flugzeug-Bordradar, Reichweite bis 350 km*
5.650 - 5.850 MHz	Amateurfunk 5 cm-Band
6.439 - 6.443 MHz	Beweglicher Funk- und Notfunkdienst über Satelliten
7.300 - 8.400 MHz	Funkdienst über Satelliten, Richtfunk
8.500 - 10.400 MHz	ASDE, Rollfeldüberwachungsradar von Flughäfen, Reichweite einige Kilometer*; PAR, Präzisionsflugradar von Flughäfen, Reichweite 10-40 km*; Wetterradar*
9.500 MHz	Flugzeug-Bordradar*
10.000 MHz	Industrielle Anwendungen für Telemetrie, Sensorik

Tabelle 7-1 Frequenzübersicht (Quelle: [28, 34])

* gepulste Frequenz

Uplink = Verbindung vom Mobilteil zur Basisstation

Downlink = Verbindung von der Basisstation zu den mobilen Handys

SELF	Sub-extremely low frequencies	LF	Low frequencies	UHF	Ultra high frequencies
ELF	Extremely low frequencies	MF	Medium frequencies	SHF	Super high frequencies
VF	Voice frequencies	HF	High frequencies	EHF	Extremely high frequencies
VLF	Very low frequencies	VHF	Very high frequencies		

Wie Tabelle 7-1 zeigt, haben die unterschiedlichen Frequenzen verschiedene Anwendungsgebiete. So nutzt beispielsweise das D-Netz den Frequenzbereich um 900 MHz und das E-Netz den Bereich um 1800 MHz. Um eine flächendeckende Versorgung zu ermöglichen, werden die zu versorgenden Gebiete in so genannte Funkzellen eingeteilt. Damit mehrere Gespräche in einer Funkzelle gleichzeitig geführt werden können, wird unter anderem das *Zeitschlitzverfahren* angewendet. Dabei wird ein Zeitrahmen von 4,62 Millisekunden (ms) in 8 Zeitslitze von je 0,577 ms unterteilt. Ein bestimmtes Handy sendet während eines Telefonats nur in einem dieser Zeitslitze Informationen an die Basisstation. Die anderen 7 Zeitslitze können von anderen Handys verwendet werden. Für das einzelne Handy ergibt sich somit ein gepulstes Signal mit einem Puls pro 4,62 ms, was einer Frequenz von 217 Hz entspricht. Daher spricht man von einem niederfrequent gepulsten HF-Signal. [10]

Die verschiedenen Frequenzen haben unterschiedliche Wellenlängen, dieses zeigt die folgende Tabelle:

Frequenz	Wellenlänge	
> 0 Hz - 30Hz	> als 10^4 km	NF
30 Hz - 300 Hz	10^4 km - 10^3 km	NF
300 Hz - 3 kHz	10^3 km - 100 km	NF
3 kHz - 30 kHz	100 km - 10 km	NF
30 kHz - 300 kHz	10 km - 1 km	HF
300 kHz - 3 MHz	1 km - 100 m	HF
3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m	HF

30 MHz - 300 MHz	10 m - 1 m	HF
300 MHz - 3 GHz	1 m - 10 cm	HF
3 GHz - 30 GHz	10 cm - 1 cm	HF
30 GHz - 300 GHz	1 cm - 1 mm	HF

Tabelle 7-2 Frequenz und Wellenlänge (Quelle: [34])

8 Grenz- und Richtwerte

Das Thema der Grenz- und Richtwerte soll hier nur kurz angesprochen werden, da es zu einem späteren Zeitpunkt näher untersucht wird.

Grenzwertempfehlungen für den Aufenthalt in elektrischen und magnetischen Feldern werden von internationalen und nationalen Gremien veröffentlicht. Als internationale Kommission ist die ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) zu nennen, die in Zusammenarbeit mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und anderen Kommissionen Empfehlungen für Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung und besonders von Arbeitnehmern vor der Einwirkung nichtionisierender elektromagnetischer Felder aufgestellt hat. Diese Vorschläge wurden von internationalen und nationalen Institutionen aufgegriffen und im eigenen Geltungsbereich eingeführt. Somit ist auch die deutsche Verordnung über elektromagnetische Felder [26. BImSchV], die in weiten Teilen mit den Empfehlungen der Europäischen Union zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder [EU, 1999] übereinstimmt, entstanden. Von der deutschen Strahlenschutzkommission wird die Gültigkeit dieser Grenzwerte regelmäßig überprüft.

Es wird differenziert zwischen der Empfehlung der Europäischen Union und der Regelung in Deutschland. [41]

Um eine Darstellung der Grenz- und Richtwerte vornehmen zu können, müssen zuerst einige Begriffe nach DIN VDE 0848 Teil 2 (Oktober 1991) erläutert werden:

Grenzwert:

Der in einer Festlegung enthaltene größte oder kleinste zulässige Wert einer Größe (aus DIN 40200/10.81).

Basisgrenzwerte:

Aufgrund der biologischen Wirkungen festgelegter zulässiger Wert für:

- die spezifische Absorption (SA)
- die spezifische Absorptionsrate (SAR)
- die elektrische Stromdichte im Körper
- den Körperstrom

und als gerätetechnischen Wert die Beeinflussungsschwelle von Körperhilfen.

Im niederfrequenten Bereich sind dies beispielsweise Kontaktströme oder induzierte Körperstromdichten im Gewebe, die bestimmte Effekte im Körper hervorrufen können (siehe oben).

Im Hochfrequenzbereich ist es meistens der vom Gewebe aufgenommene Energieanteil, der zur Erwärmung des Gewebes und somit zu einer Schädigung führen kann.

Basisgrenzwerte sind auf der Grundlage ausreichend abgesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse entstanden.

Abgeleiteter Grenzwert:

Aus Basisgrenzwerten abgeleiteter zulässiger Wert für Feldstärken, Leistungsflussdichte und Berührungsspannung.

Anmerkung: Die abgeleiteten Grenzwerte werden angegeben, um ein für die Praxis anwendbares Verfahren zur Beurteilung der Feldeinwirkungen anzubieten. Diese Grenzwerte wurden so festgelegt, dass selbst unter Zugrundelegung der ungünstigsten Einwirkungsbedingungen der Felder die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden.

In der Empfehlung der Europäischen Union [EU, 1999] wird zwischen beruflich exponierten Personen und der allgemeinen Bevölkerung unterschieden. Für die berufliche Exposition wurden höhere Grenzwerte festgelegt, da diese Personen aus Erwachsenen bestehen, die unter weitgehend kontrollierten Bedingungen für maximal die Dauer eines Arbeitstages elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind. [41]

Die folgende Tabelle zeigt die nach EU, 1999 empfohlenen Basisgrenzwerte:

Frequenzbereich	Magnetische Flussdichte [mT]	Stromdichte [mA/m²]	Mittlere Ganzkörper-SAR [W/kg]	Lokale SAR (Kopf, Rumpf) [W/kg]	Lokale SAR (Gliedmaßen) [W/kg]	Leistungsflussdichte [W/m²]
0 Hz	40	-	-	-	-	-
bis 1 Hz	-	8	-	-	-	-
1 – 4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4 Hz – 1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1000 Hz – 100 kHz	-	f/500	-	-	-	-
100 kHz – 10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz – 10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 GHz – 300 GHz	-	-	-	-	-	10

Tabelle 8-1 Basisgrenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 0 Hz bis 300 GHz [EU, 1999]

Anmerkung: Die Schwellen sind in unterschiedlichen Frequenzbereichen als Funktion der Frequenz f angegeben. Die SAR-Werte beziehen sich auf 6-Minuten-Intervalle und 10 g eines beliebigen zusammenhängenden Körpergewebes. Die allgemeine Bevölkerung umfasst alle Menschen unterschiedlichen Alters und Gesundheitsstatus, die bis zu 24 Stunden pro Tag exponiert sein können.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die dazugehörigen abgeleiteten Grenzwerte:

Frequenzbereich	Stärke des E-Feldes [V/m]	Stärke des H-Feldes [A/m]	Stärke des B-Feldes [μ T]	Leistungsflussdichte [W/m ²]
0 – 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 – 8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8 – 25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	-
50 Hz	5.000	80	100	-
0,025 kHz – 0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8 kHz – 3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3 kHz – 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 MHz – 1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1 MHz – 10 MHz	$87/\sqrt{f}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10 MHz – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 MHz – 2.000 MHz	$1,375 \times \sqrt{f}$	$0,0037 \times \sqrt{f}$	$0,0046 \times \sqrt{f}$	$f/200$
2 GHz – 300 GHz	61	0,16	0,2	10

Tabelle 8-2 abgeleitete Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 0 Hz bis 300 GHz [EU, 1999]

In Deutschland wurde im Jahre 1996 zum Schutz der Bevölkerung die Verordnung über elektromagnetische Felder [26. BImSchV] erlassen. Die Verordnung enthält Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb von Niederfrequenz- und Hochfrequenzanlagen. Sie gilt für ortsfeste Anlagen, die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden und nicht einer Genehmigung nach §4 des Bundes-Immissionsgesetzes [BImSchG] bedürfen. D.h., dass alle Anlagen, die solchen Zwecken nicht dienen, beispielsweise der Amateurfunk, nicht unter die 26. BImSchV fallen. Sowie „nicht ortsfeste“ Anlagen wie elektrische Geräte und Handys. [41] Die nachfolgenden Tabellen zeigen die entsprechenden Grenzwerte gemäß der 26. BImSchV:

Frequenz[Hz]	Elektrische Feldstärke [V/m]	Magnetische Flussdichte [μ T]
50	5.000	100
$16\frac{2}{3}$	10.000	300

Tabelle 8-3 Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen gemäß der 26. BImSchV

Frequenz [MHz]	Elektrische Feldstärke [V/m]	Magnetische Feldstärke [A/m]
10 – 400	27,5	0,073
400 – 2.000	$1,375 \sqrt{f}$	$0,0037 \sqrt{f}$

2.000 – 300.000	61	0,16
-----------------	----	------

Tabelle 8-4 Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen gemäß der 26. BImSchV

9 Begriffsbestimmungen

nach [6, 9, 19, 20, 21, 28]

Elektrische Ladung: [Coulomb = Amperesekunde]

In der Natur sind positive und negative Ladungen vorhanden, die sich in ihren Wirkungen gegenseitig aufheben. Gleichgerichtete Ladungen stoßen sich ab, ungleiche ziehen sich an.

Elektrisches Feld:

Die Kräfte werden mit Hilfe des elektrischen Feldes vermittelt, das jede Ladung um sich herum aufbaut und das durch Feldlinien erläutert werden kann.

Elektrische Feldstärke: [Volt pro Meter]

In Längsrichtung einer Feldlinie wirkt die elektrische Feldstärke.

Elektrische Spannung: [Volt]

Zwischen zwei Punkten einer Feldlinie entsteht eine elektrische Spannung, die Spannung in einem Feldpunkt gegen einen Leiter, z.B. Erde, heißt dessen Potential. Eine Spannung zwischen zwei Feldpunkten wird als Potentialdifferenz bezeichnet.

Magnetisches Feld:

Neben dem elektrischen Feld hat jede bewegte Ladung auch ein magnetisches Feld, dessen Feldlinien die Bewegungsrichtung der Ladung kreisförmig umschließen. Fließender Strom in einem geschlossenen Kreislauf verhält sich wie ein Magnet: Kreisströme ziehen sich an, wenn die Ströme gleichgerichtet sind, oder stoßen sich ab, wenn die Ströme entgegengesetzt gerichtet sind.

Magnetische Feldstärke: [Ampere pro Meter]

Ändert sich die Geschwindigkeit einer bewegten Ladung, so ändert sich auch die magnetische Feldstärke, wodurch ein zusätzliches elektrisches Feld entsteht, das die magnetischen Feldlinien ringförmig umgibt.

Magnetische Flussdichte: [Tesla]

Die Feldlinien nehmen die Richtung der anziehenden und abstoßenden Kräfte an, und ihre Dichte ist proportional der magnetischen Induktion oder Kraftflussdichte.

Elektromagnetische Welle: [Mikrowatt pro Quadratmeter]

Bei schnellen hin- und herschwingenden Ladungen, wie sie in einem Wechselstrom vorhanden sind, lassen sich elektrische und magnetische Felder nicht mehr eindeutig trennen. Sie verschmelzen zu einer elektromagnetischen Welle.

Modulation:

Bei der Modulation werden die Parameter physikalischer Größen gezielt verändert. Es wird unterschieden zwischen analoger Modulation, wenn die physikalische Größe analog ist und somit in gewissen Grenzen *unendlich* viele Werte annehmen kann und zwischen diskreter Modulation, wenn die Größe nur *endlich* viele Werte annehmen kann.

Elektromagnetische Wellen haben drei zu verändernde Parameter:

- Amplitude
- Frequenz (bzw. Wellenlänge)
- Phasenlage

Somit unterscheidet man nach der Art der Informationsparameter Amplituden-, Frequenz- und Phasenmodulation. [39]

Absorption:

Eine Welle vermindert durch Wechselwirkung mit der Materie ihre Energie. Abhängig ist die Absorption von der durchstrahlten Schichtdicke und den Eigenschaften des vorhandenen Mediums.

Spezifische Absorptionsrate (SAR): [Watt pro Kilogramm]

Hochfrequenz Felder (HF-Felder) haben, in Abhängigkeit von der Frequenz, unterschiedliche Eindringtiefen in das biologische Gewebe. Überwiegend wird diese absorbierte Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt. Die spezifische Absorptionsrate (SAR) ist die Energie, die pro Kilogramm Körpergewicht in einem bestimmten Zeitraum aufgenommen wird. Gemessen in Watt pro Kilogramm (W/kg). In der Regel beträgt der Grundumsatz des Menschen ca. 1 W/kg, bei Leistungssport können auch 20 W/kg erreicht werden.

Stromdichte: [Milliampere pro Quadratmeter (mA/m²)]

Die Stromdichte ist die Ladungsmenge, die pro Sekunde durch eine bestimmte Fläche fließt.

Leistungsflussdichte: [Watt pro Quadratmeter]

Die Leistungsflussdichte S wird im Zusammenhang mit elektromagnetischen Wellen, neben den elektrischen (E) und magnetischen (H) Feldstärken angegeben. Ihre Einheit ist Watt pro Quadratmeter (W/m²). Die elektrische und die magnetische Feldstärke stehen im Verhältnis: $E = 377 H$; daraus ergibt sich, dass die Leistungsflussdichte S das Produkt aus E und H ist. ($377 \text{ Ohm} \equiv \text{Feldwellenwiderstand des freien Raumes}$)

Einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsflussdichte hat der Abstand zu einer Sendeanlage, denn sie nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.

Wellenfläche:

Die geometrische Wellenfläche entsteht, indem benachbarte Punkte mit gleichartigem Schwingungszustand, beispielsweise Wellenberge, miteinander verbunden werden. Die Form ist abhängig von dem erregenden Zentrum und den Eigenschaften des Übertragungsmediums.

Feldwellenwiderstand: [Ohm (Ω)]

Quotient aus elektrischer und magnetischer Feldstärke.

Nahfeld:

Auch Kondensatorfeld genannt, ist der Teil des Feldes, der unmittelbar an der Quelle ist. Der Feldwellenwiderstand ist sehr komplex und je nach Frequenz und Art der Quelle kann dieser Bereich das 5-100fache der Wellenlänge betragen.

Fernfeld:

Auch Strahlungsfeld genannt ist der Teil des Feldes, der in größerer Entfernung zur Quelle ist. Der Feldwellenwiderstand ist in diesem Bereich eine reelle Größe. Im freien Raum beispielsweise 377Ω .

Phase:

Durch Frequenz und Anfangszustand bestimmter Zustand einer Welle.

10 Quellenverzeichnis

Normen/Richtlinien:

- [36] DIN VDE 0848 Teil 2
- [42] EU, 1999; Empfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder
- [43] 26. BImSchV (1996); Verordnung über elektromagnetische Felder

Literatur:

- [1] Maes, Wolfgang (Baubiologie Maes): *Baubiologie-Umwelt fängt zu Hause an*, 1995
- [3] Breuer, Hans: *dtv-Atlas zur Physik* Band 2, 1988
- [4] Hering, Bressler und Gutekunst: *Elektronik für Ingenieure*, Springer Verlag 2001
- [5] Land Salzburg: *Elektrosmog und Gesundheit - Was jeder selbst tun kann*
- [6] Hering, Martin und Stohrer: *Physik für Ingenieure*, Springer Verlag 2004
- [7] World Health Organization (WHO): *Was sind elektromagnetische Felder*
- [9] Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): *Elektromagnetische Felder – Einwirkungen auf den Menschen*, Fachinformation Umwelt und Entwicklung Bayern
- [11] Deutsche Strahlenschutzkommission (SSK): *Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetische Feldern* 2001
- [16] Oberfeld, Dr. med. univ. Gerd: Land Salzburg – Umweltmedizin, *Gesundheitliche Beeinträchtigung durch Elektrosmog*, 2004
- [20] Pauli, Moldan: *Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld* (Bayrisches Landesamt für Umweltschutz)
- [21] *Der Brockhaus in einem Band* 4., aktualisierte Auflage, F:A: Brockhaus Mannheim/Leipzig 1992
- [24] *mikado-Lexikon*, mikado Ausgabe 5/2004
- [28] Frucht, Krause, Nitz und Schäfer: *Die Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den Menschen (1 kHz... 100 GHz)*, Medizinisch-Technischer Bericht 1984 (Köln)
- [29] Stoll, Dieter: *Schirmung in der Elektronik* (Der Elektroniker 8-1984)
- [30] Kaden, H.: *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*, 2.Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg (Springer-Verlag 1959)
- [31] Höring, C.: *Elektromagnetische Schirmung*. In: Rint, C. (Hrsg.), *Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker*. Bd.2, 12.Aufl. München/Heidelberg: Hüthig & Pflaum Verlag 1978
- [32] Schelkunoff, S.A.: *The Impedance Concept and its Application to Problems of Reflection, Refraction, Shielding and Power Absorption*. BST3 17 (1938), p.17...49
- [33] White, D.R.I.: *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility*. Vol3 (EMI Control Methods and Techniques), 1st ed. Germantown, Maryland, USA: Publ. by Don White Consultants, Inc. 1973
- [34] Pauli, Moldan: *Reduzierung hochfrequenter Strahlung, Baustoffe und Abschirmmaterialien*, 2.komplett überarbeitete und deutlich erweiterte Auflage 2003

- [35] Stamm, A.: *Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme*, Band 3 *Untersuchungen zur Magnetfeldexposition der Bevölkerung im Niederfrequenzbereich*, VDE-Verlag 1993
- [41] Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg Abteilung 3 – Industrie und Gewerbe, Kreislaufwirtschaft: *Elektromagnetische Felder im Alltag*, 1. Auflage Karlsruhe 2002