

Antennen Messtechnik IV

**Messtechnische
Ermittlung der Feldstärken
im Nahbereich von KW-Antennen**

Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik, Nonnweiler-Saar
Dr. Walter Schau
DL3LH

Vorwort

Bei Errichtung einer Amateurfunkstelle ist **vor Betriebsaufnahme** eine Anzeige nach BEMFV an die zuständige Behörde zu schicken. Der Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern ist von jedem Funkamateurer uneingeschränkt und jederzeit zu gewährleisten. Es müssen bei ortsfesten Sendefunkanlagen mit einer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) von 10 oder mehr als 10 Watt die grundlegenden Anforderungen zur Sicherheit von Personen erfüllt werden. Nach aktuellen Unterlagen der Bundesnetz-Agentur senden 90 % der Funkamateure mit einer Leistung kleiner 10 W EIRP und benötigen keine Standortbescheinigung. Für Funkamateure, die mit größerer Leistung als 10 W EIRP senden, ergeben sich zwei Möglichkeiten um die gesetzlichen Grenzwerte einzuhalten – Rechnen oder Messen.

Die Ermittlung der Schutzabstände gestaltet sich mit dem Berechnungsverfahren für Nahfeld-Schutzabstände nach Prof. Wiesbeck relativ einfach, während Messungen mit großem Aufwand verbunden sind und genaue Kenntnisse der Vorgänge im Nahfeld voraussetzen. Es ist also nicht so einfach wie immer angenommen wird. Rechnen ist einfacher als messen, doch viele entscheiden sich für messen.

1. Verfahren bei der Bewertung ortsfester Amateurfunkanlagen

1.1 Nahfeldberechnung

Die Einhaltung der Grenzwerte kann durch numerische Nahfeldberechnung überprüft werden. Eine Berechnung erfordert umfangreiche mathematische Kenntnisse in der Maxwell'schen Feldtheorie.

1.2 Vereinfachtes Bewertungsverfahren nach Wiesbeck

Eine vereinfachte Bewertung der Feldstärken im Nahfeld ist nach der Studie „Wiesbeck“ zur vereinfachten Bestimmung der normierten Grenzfeldstärken bei Amateurfunkanlagen im Frequenzbereich von 1.8 MHz bis 250 GHz möglich und von der Behörde anerkannt. Die Berechnung gestaltet sich sehr einfach, erfordert aber die Kenntnis der tatsächlich abgestrahlten Leistung.

1.3 Feldstärkemessung

Mit Feldstärkemessungen an den Grenzen zu den Bereichen, in denen die Grenzwerte einzuhalten sind, kann nachgewiesen werden, dass die zulässigen Feldstärkegrenzwerte nicht überschritten werden. Außer einem erheblichen apparativen Aufwand sind genaue Kenntnisse der Feldverteilung im Nahfeld notwendig. Messungen sind sehr aufwändig, vor allem weil Gegenstände im Nahbereich das Feld verzerren und Resonanzerscheinungen von im Feld vorhandenen metallischen Gegenständen immer vorhanden sind.

2. Nah- und Fernfeld

Das magnetische Feld eines wechselstromdurchflossenen Leitungsstückes setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, eine Wirk- und eine Blindkomponente. Die Blindkomponente ist immer mit dem Leitungsstück verkettet und liefert keinen Beitrag zum Energiestrom des Senders. Diese Feldkomponente nimmt mit dem Quadrat der Entfernung r ab und wirkt daher nur in der Nahzone. Das Nahfeld verursacht keine Energieströmung, da die elektrische und magnetische Feldstärke gegeneinander um 90 Grad phasenverschoben und nicht gleichzeitig vorhanden sind. Eine Energieentnahme über diese Blindkomponente ergibt eine Rückwirkung und eine Verstimmung der Antenne.

Die Wirkkomponente des magnetischen Feldes löst sich vom Leitungsstück ab und nimmt mit der ersten Potenz von r ab. In größeren Entfernungen, etwa ab 4λ , wird die Blindkomponente belanglos und wir befinden uns im Fernfeld. Hier sind elektrische und magnetische Feldstärke über den Feldwellenwiderstand des freien Raumes miteinander verbunden. Im Fernfeld genügt die Messung nur einer Feldkomponente, da sich die andere durch Rechnung ergibt.

Das elektrische Feld eines wechselstromdurchflossenen Leiters setzt sich aus drei Komponenten zusammen, eine Wirkkomponente und zwei Blindkomponenten, die mit $1/r$ und $1/r^2$ abfallen und im Fernfeld keine Rolle mehr spielen. Im Fernfeld der Antenne sind nur die beiden phasengleichen Feldstärken \underline{E} und \underline{H} , vorhanden. Beide sind über den Wellenwiderstand des freien Raumes ($Z_0 = 120 \pi \Omega$) verknüpft. \underline{E} und \underline{H}

liegen in der gleichen Ebene, sind aber räumlich um 90 Grad verschoben. Das Kreuzprodukt zeigt in Richtung der Energie und wird als Poynting-Vektor bezeichnet. Seine Dimension ist Leistung pro Fläche.

3. Messungen im Nahfeld

Die korrekte Messung der Feldstärken bzw. Leistungsflussdichten im Nahfeld von Sendeantennen ist schwieriger als im Fernfeld, da in diesem Bereich die Antenne nicht als punktförmige Quelle angenommen werden kann. Sie muss als flächiger Strahler angesehen werden, dessen verschiedenen Bereiche unterschiedlich stark am Ort des Betrachters einstrahlen. Erschwerend kommen dabei noch Einflüsse von leitenden bzw. reflektierenden Gegenständen in der Umgebung hinzu, die berücksichtigt werden müssen.

Der Weg zu genauen Werten - speziell dicht an der Antenne - führt nur über aufwändige Messungen. Aus diesem Grund sind in der Cenelec Norm EN 50383 getrennte Messungen der elektrischen und magnetischen Feldstärke oder des SAR-Wertes die bevorzugten Methoden zur Gewinnung der Werte zur Bestimmung des Sicherheitsabstandes. Dicht bei der Antenne werden die gesetzlichen Grenzwerte fast immer weit überschritten. Im Nahfeld müssen alle drei Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes und ihre Abhängigkeit vom Ort gemessen werden. Will man beurteilen wie " gut " eine Antenne wirklich ist, muss durch Messungen im Fernfeld der Gewinn bestimmt werden.

3.1 Feldvektoren

Zwischen den elektrischen und magnetischen Komponenten des Nahfeldes von Antennen besteht neben der bekannten Winkelabhängigkeit eine ortsabhängige Phasenverschiebung. Ab etwa 4λ befinden wir uns im Fernfeld mit einem kontinuierlichen Übergang zwischen Nah- und Fernfeld. Eine Aufteilung in „Reaktives Nahfeld“ und "Strahlendes" Nahfeld und Ähnliches ist wenig hilfreich und zeugt von einem tiefen Unverständnis der realen Gegebenheiten.

In jedem Bereich des elektromagnetischen Feldes befinden sich elektrische und magnetische Komponenten sowie ein Energiefluss. Im Nahfeld der Antenne treten beträchtliche Energieflüsse und elektrische sowie magnetische Feldstärken auf, die in komplizierter Form mit der abgestrahlten Energie zusammenhängen. Die auftretenden Maximal-Feldstärken werden oftmals an Orten erzeugt wo man sie nicht erwartet, weil Objekte im Feld die Feldverteilung stören. Die Impedanz des Feldes weicht selbst in großen Entfernungen von der Antenne beträchtlich vom Wellenwiderstand des freien Raumes ab und erreicht im Nahfeld extrem niedrige und auch hohe, stark ortsabhängig Werte, so dass eine Berechnung aller Komponenten aus der Messung einer einzelnen Komponente selbst bei Vernachlässigung der Phasenbeziehung kaum möglich ist.

3.2 Messungen

Im Fernfeld kann die elektrische oder die magnetische Feldstärke mit Referenzantennen gemessen. Die Energiedichte wird mit thermischen Sonden ermittelt. Messungen im Nahfeld sind sehr viel problematischer, da durch Kopplungen auf die Antenne Rückwirkungen vorhanden sind und ein Energieentzug stattfindet. Resonanzeffekte verzerren das Feld und können zu hohen Feldstärken führen. Daher muss mit sehr kleinen, nicht resonanten Feldstärkesensoren, gearbeitet werden. Geeignet sind ohmsch abgeschlossene kurze Dipole oder Schleifen, sowie einfache Diodendetektoren mit HF- Schottky-Dioden, Drahtstücken und Schleifen.

Personenschutzgrenzwerte sind an den Effektivwert der Leistung gebunden, während Herzschrittmachergrenzwerte an den maximalen Augenblickswert der hochfrequenten Leistung gekoppelt sind. Eine relative Messung der drei elektrischen und drei magnetischen Feldkomponenten ist immer möglich.

3.3 Messproblematik

Aus dem Gesagten kann abgelesen werden, dass die Messung elektromagnetischer Felder im Nahfeld von Antennen sehr schwierig ist. Die vereinfachende Annahme, dass man sich im Fernfeld einer Punktquelle befindet, ist bei den interessierenden, relativ hohen Feldstärken fast nie zulässig. Die Einfallsrichtung des Feldes ist ebenfalls meist nicht vorhersehbar. Das Messgerät selbst und die messenden Personen beeinflussen das zu messende Feld. Daher ist das Auslesen der Messergebnisse nur über eine optische Schnittstelle sinnvoll. Diese verhindert auch die Gefährdung des Bedienpersonals. Für die Messtechnik bedeutet dies, dass sowohl E- als auch H-Feld-Messgeräte gleichzeitig zur Verfügung stehen müssen, da im Nahfeld kein fester Zusammenhang zwischen beiden Feldgrößen besteht. Isotrope Messsonden vereinfachen die Messungen durch gleichzeitiges Erfassen aller drei Raumkomponenten. Alle Messgeräte benötigen einen großen Dynamikbereich, da die Spanne der zu erwartenden Feldstärkewerte sehr groß ist.

3.4 Messgeräte

Jedes Messgerät und jedes Messverfahren weist systematische, absolute und zufällige Fehler auf. Nur ein sorgfältiges Durchdenken der gesamten Prozedur gewährleistet ernstzunehmende Messwerte. Berücksichtigt werden müssen Nebenbedingungen wie die Eigenschaften von Kabeln, Steckverbindern und Adaptern, die zulässige Anzahl von Steckzyklen, die Kalibrierung und die Konstanz der Umgebungstemperatur.

Ist eine Antenne über mehrere Meter Kabel und diverse Adapter mit dem Messgerät verbunden, so sollte die Reaktion des Messgeräts beim Entfernen der Antenne beobachtet werden, um einen Eindruck von der Größenordnung des untersuchten Effekts zu erhalten. Nicht selten spielen Kabel und passive Bauelemente eine Haupt-, die Antenne eine absolute Nebenrolle.

In der Praxis muss berücksichtigt werden, dass die Antennenimpedanz an der Antenne sowie die relative Leistung im Fernfeld vom Ort abhängen. Es muss sorgfältig gemessen werden, wozu auch die Aufnahme mehrerer Messreihen und die Anwendung der Fehlertheorie gehört. Anfänglich ist eine Grundsatzmessung über die zu erwartenden, ortsabhängigen Feldstärken zu unternehmen und die Feldstärkemaxima zu ermitteln.

3.5 Funktion der E- und H- Sonden

Ein H- Feld-Sensor besteht im Prinzip aus einer Draht-Spule mit der Induktivität L . Die induzierte Leerlaufspannung U_0 ist bis auf eine Konstante proportional zur zeitlichen Ableitung des H-Feldes. Wird die Spule mit einem reellen Widerstand R belastet, dann ist die Spannung U_{eff} am Widerstand oberhalb der Grenzfrequenz der Messanordnung direkt proportional zur magnetischen Feldstärke H_{eff} . Ein E- Feld-Sensor ist ein Dipol. Die Leerlaufspannung des Dipols ist direkt proportional zum Betrag der elektrischen Feldstärke E .

Dreikanalige Sonden für E_x , E_y , E_z und H_x , H_y , H_z haben drei Auswertekanäle, die getrennt im Hauptgerät verarbeitet werden. Aus diesen drei Komponenten wird die Ersatzfeldstärke E bzw. H berechnet. Alle drei Raumkomponenten müssen gleichzeitig verfügbar sein, um eine Abschätzung des Feldverlaufs zu bekommen.

Die Einheiten der Feldstärken sind Volt pro Meter bzw. Ampere pro Meter (V/m, A/m). Die Energiedichte wird in W/m^2 oder mW/m^2 angezeigt. Die Umrechnung zwischen den Einheiten erfolgt meist unter der Annahme einer ebenen Welle im Vakuum und ist daher mit Vorsicht zu betrachten. Unter Nahfeldbedingungen ist nur die Anzeige der Feldstärken am Messort - direkt am Sensor - korrekt.

3.6 Kalibrierung

Geräte zur Messung von Feldstärken müssen in regelmäßigen Abständen kalibriert werden. Das Kalibrierungsprotokoll ist dem Messprotokoll beizufügen. Für die Kalibrierung wird oftmals die Frequenz $f = 27.12 \text{ MHz}$ und eine mittlere Feldstärke verwendet. Magnetische Sensoren werden in der Helmholtz-Spule kalibriert. Professionellen Geräten liegt ein Kalibrierschein bei, wobei der Frequenzgang, die Linearität und die Isotropie vermerkt ist. Die Bilder 1 - 4 zeigen professionelle Messgeräte der Firma Narda /Wandel & Goltermann/Wavetek.



Bild 1: E- Feld Sonde für die isotrope Messungen in Frequenzbereich 1 MHz bis 3 GHz



Bild 2: H-Feld Sonde für die isotrope Messungen im Frequenzbereich 300 KHz bis 30 MHz



Bild 3: E- Sonde für elektrische Felder in 3 Achsen, Ex, Ey, Ez



Bild 4: Beispiel für ein einfaches Messequipment zur Messung von E- und H- Feldern

Messungen können im Frequenzbereich von 0.001 Hz bis 300 GHz durchgeführt werden. Dabei reicht die Bandbreite der Messungen vom Infraschallbereich bei Windkraftanlagen über Schwingungsmessungen bei Einsatz von Rüttelplatten und Rammen bis hin zu Handy - Netzen und Radaranlagen im GHz Bereich. Bild 5 zeigt z.B. das berechnete Nahfeld einer Antenne bei $f = 156$ MHz.

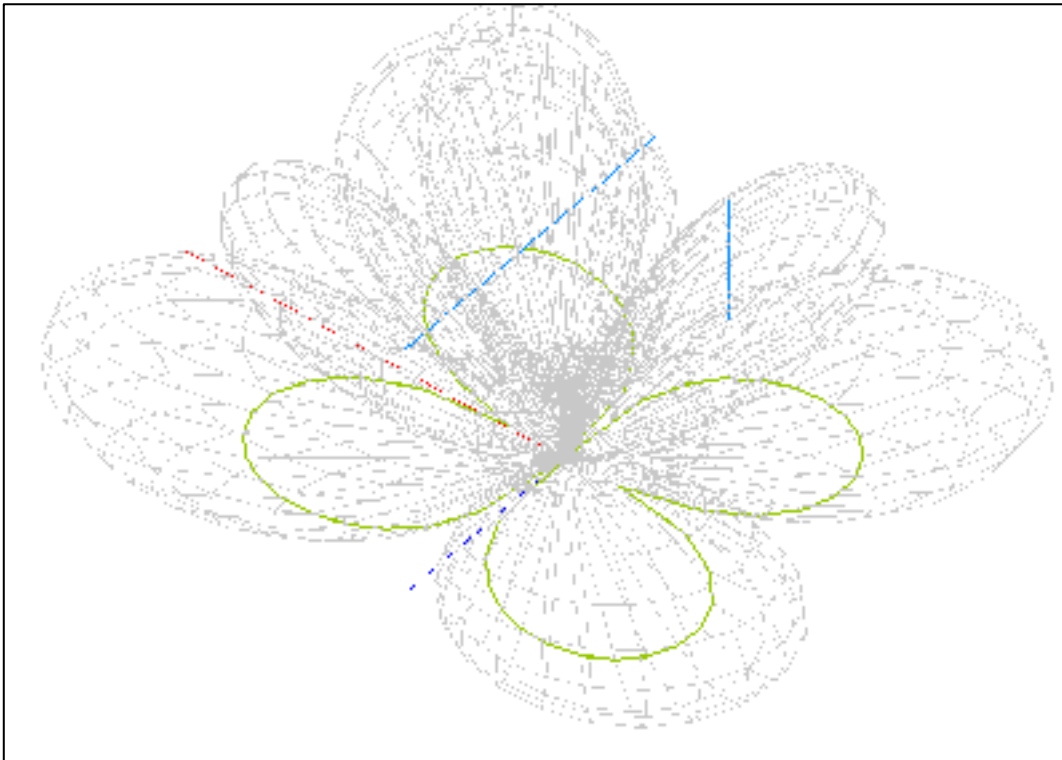


Bild 5: So „wild“ kann das magnetische Nahfeld einer UKW-Antenne aussehen. Außerhalb des grünen Bereiches werden die Herzschrittmachergrenzwerte überschritten.

Im freien Raum sind elektrische und magnetische Feldstärke über den Feldwellenwiderstand verknüpft. Daher kann zwischen den Komponenten leicht umgerechnet werden. Das Produkt beider Feldstärkewerte ist der Poynting-Vektor und beschreibt die Leistung pro Flächeneinheit. Um eine Vorstellung von der Größenordnung zu bekommen hilft Tab. 1 zur Übersicht.

Leistungsdichte mW/cm^2	Elektrische Feldstärke V/m E	Magnetische Feldstärke A/m H
1000	1940.0	5.1550
500	1372.0	3.6440
200	867.6	2.3050
100	613.5	1.6300
50	433.8	1.1520
20	274.0	0.7290
10	194.0	0.5155
5	137.0	0.3644
2	86.7	0.2305
1	61.3	0.1630
0.5	43.4	0.1152
0.2	27.4	0.0729
0.1	19.4	0.0515
0.05	13.7	0.0364
0.02	8.67	0.0230
0.01	6.13	0.0163

Tab 1: Leistungsdichte, elektrische und magnetische Feldstärke im freien Raum

Zusammenfassung:

Uns Funkamateuren ist vom Gesetz auferlegt eine sogenannte „Selbsterklärung“ abzugeben. Dieses vereinfachte Verfahren trägt dem „Versuchscharakter“ unseres Hobbys Rechnung. Wir können durch eine von uns initiierte Erklärung am Amateurfunk teilnehmen. Die Behörde glaubt zunächst unseren Angaben und behält sich vor durch Stichproben die Richtigkeit zu überprüfen. Nach Angaben des DARC werden von der Behörde in steigendem Maße Stichproben durchgeführt. Messungen seitens der Behörden sind kostenintensiv und überschreiten manchmal bei weitem die Kosten für eine komplette Funkanlage, wie einige von uns schmerzlich feststellen mussten.

Daraus resultiert, dass wir eine Selbsterklärung mit relevanten Daten der Behörde an die Hand geben sollten. Wertvoll und einfach ist das Rechen-Verfahren von Prof. Wiesbeck – eine ganz einfache, tolle Sache zur Ermittlung der Schutzabstände.

Messungen sind mit einem erheblichen Aufwand an Messequipment und theoretischen Kenntnissen verbunden und müssen nicht durchgeführt werden – wie bei den Kommerziellen!

Amateurfunk ist und bleibt Versuchfunk, wobei der Versuch sich heute fast nur noch auf die Antennenanlage beschränkt. Daher sollte diese wenigsten den modernen Erkenntnissen entsprechen und auch dem modernen Blitzschutz Rechnung tragen. Hier ist genügend Spielraum für Selbstbau und Bastelarbeit. Doch gerade die Antennenanlage wird oft als unwichtige „Nebensache“ betrachtet. Hauptsache das Equipment ist vom Feinsten und der Sound muss mindestens Studioqualität haben.

Die Digitaltechnik hält Einzug im Amateurfunk, sie ist nicht mehr aufzuhalten. Kleine Leistungen haben positiven Einfluss auf den Geldbeutel, da die Preise für die Energie weiter steigen werden. Gerade bei kleinen Leistungen sind optimierte Antennenanlagen mit hohem Wirkungsgrad gefragt. Sicherlich, die alte SSB-Technik wird noch einige Zeit bleiben. Doch wer würde sich heute noch einen Fernseher nach altem PAL-Standard kaufen, wenn der doch als Sperrmüll am Straßenrand billiger zu haben ist?

DL3LH, Walter
wa-schau@t-online.de

Literatur:

- /1/ IRPA/INIRC: Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in der Frequency Range from 100 KHz to 300 GHz, Health Physics Vol. 54 No. 1. 115 – 123, 1988
- /2/ DIN, VDE 0848, Teil 1: Sicherheit in elektromagnetischen Feldern (Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 KHz bi 300 GHz, Entwurf Oktober 1991, VDE Verlag, Berlin
- /3/ DIN, VDE 0848, Teil 2: Sicherheit in elektromagnetischen Feldern (Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 KHz bi 300 GHz, Entwurf Oktober 1991, VDE Verlag, Berlin
- /4/ BImSchV: Entwurf einer Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
- /5/ Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) vom 20. August 2002. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I, Nr. 60 ausgegeben zu Bonn am 27. August 2002
- /6/ Gesetz über Funkanlagen und Telekommunikationssendeinrichtungen (FTEG) vom 31. Januar 2001. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001 Teil I S. 170
- /7/ Gesetz über den Amateurfunk (Amateurfunkgesetz – AfuG (1997) vom 23. Juni 1997, Bundesgesetzblatt Jahrgang 1997 Teil 1 Nr. 41, ausgegeben zu Bonn am 27. Juni 1997
- /8/ Studie zur Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Bestimmung der Schutzabstände bei Amateurfunkanlagen im Frequenzbereich von 1.8 MHz bis 250 GHz, erstellt für die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post. Ausgabe Dezember 2002.
- /9/ DIN VDE 0848-1, Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren, August 2000
- /10/ „Antennen Messtechnik I“, W. Schau, DL3LH, ham-on-air.de
- /11/ „Die Antenne macht die Musik“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /12/ „Antennen Messtechnik II“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /13/ „Antennen Messtechnik III“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de

Dieses Dokument wurde mit Win2PDF, erhaeltlich unter <http://www.win2pdf.com/ch>
Die unregistrierte Version von Win2PDF darf nur zu nicht-kommerziellen Zwecken und zur Evaluation eingesetzt werden.