

# 3D Berechnung der Antennencharakteristik und Exposition von Amateurfunkstationen

T. Kayser, M. Pauli, W. Wiesbeck  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

## 1 Einführung

Zum Schutz von Personen vor elektromagnetischen Feldern, welche durch den Betrieb von Funkanlagen entstehen, werden national sowie international Expositionsgrenzen festgelegt. Diese Grenzen müssen von allen Funkanlagen wie z.B. Mobilfunk, Rundfunk, Fernsehen oder Amateurfunk eingehalten werden. In Deutschland gilt hierzu die Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) [1].

Laut der Verordnung wird für jede feste Funkanlage mit einer Leistung über 10 W EIRP eine Standortbescheinigung benötigt, welche von der Bundesnetzagentur (BNetzA) nach einer Überprüfung der einzuhaltenden Expositionsgrenzen erteilt wird. Eine Ausnahme hierzu sind die Amateurfunkanlagen, für welche lediglich eine Anzeigepflicht besteht. In der Anzeige muss der Amateurfunkbetreiber rechnerisch oder messtechnisch nachweisen, dass die von seiner Funkanlage abgestrahlten elektromagnetischen Felder außerhalb des von ihm kontrollierbaren Bereichs (Grundstücks) unterhalb der gültigen Expositionsgrenzen liegen.

Zur Berechnung des Schutzbereiches, d.h. jenen Bereichs um die Funkanlage, in welchem diese Grenzen nicht eingehalten werden, müssen die Geometrie des Standorts (Höhe, Abstände zwischen den einzelnen Antennen), die Eigenschaften der Antennen sowie die Sendeleistung und Betriebsart der Funkstation berücksichtigt werden. Auch die Beschaffenheit des Bodens, sowie der Objekte in der Nähe der Antenne können diese Abstände beeinflussen. Ein spezielles Problem bei der Berechnung ist die korrekte Berücksichtigung der Nahfeldeffekte, da es hierzu keine analytischen Lösungen gibt. Da im Amateurfunk auch relativ niedrige Frequenzen und entsprechend große Antennen verwendet werden, kann das Nahfeld sehr weit ausgedehnt sein. Damit kann die genaue Berechnung der notwendigen Schutzabstände um die Antenne sehr komplex werden.

Bisher war für die Berechnung der Schutzabstände bei Amateurfunkanlagen kein Verfahren, bzw. keine Software verfügbar, welche eine effiziente 3D Berechnung der elektromagnetischen Felder um die Amateurfunkstationen unter Berücksichtigung aller vorgenannten Einflüsse ermöglichte. Um das Durchführen der für die Anzeige benötigten Berechnungen für die Funkamateure zu vereinfachen und gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Angaben zu verbessern, wurde im Auftrag der BNetzA durch Prof. Wiesbeck vom Karlsruher Institut für Technologie hierfür ein Software Paket entwickelt, welches mittlerweile die Bezeichnung „Watt-Wächter“ führt. Diese Software wird den Funkamateuren auf den Internetseiten der BNetzA frei zur Verfügung gestellt. Die dabei verwendeten Berechnungsverfahren berücksichtigen

das Nahfeld der Antennen sowie die Bodenreflexionen und unterstützen die Erstellung der Anzeige, so dass nur noch die Angaben über den Funkanlagenstandort und die Senderdaten durch den Anwender bereit gestellt werden müssen.

In diesem Beitrag wird die Watt-Wächter Software vorgestellt und anhand von berechneten Beispielen werden die Ergebnisse erläutert. Zunächst werden im Abschnitt 2 die in Deutschland gültigen Expositionsgrenzen näher gezeigt. Die Abschnitte 3 und 4 beschreiben die in Watt-Wächter eingesetzten Berechnungsverfahren und die Eigenschaften der Software. Im Abschnitt 5 werden einige Berechnungsbeispiele diskutiert. Abschnitt 6 gibt eine Zusammenfassung.

## 2 Expositionsgrenzen

Beim Betrieb von ortsfesten Sendeanlagen müssen die Feldstärkegrenzen für den Personenschutz eingehalten werden. Diese Feldstärkegrenzen werden auf den Effektivwert bzw. den Spitzenwert bezogen. Der Effektivwert ist maßgeblich für Erwärmungseffekte in der Umgebung und im menschlichen Gewebe. Der zugehörige Mittelungszeitraum erstreckt sich über ein Zeitintervall von 6 Minuten. Dieser Wert ist maßgeblich für den Personenschutzgrenzwert.

Die einzuhaltenden Personenschutzgrenzwerte sind in der 26. Bundesimmissionschutzverordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) [2] bzw. in der Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz) [3] definiert. In Tabelle 1 sind die für den Amateurfunk relevanten Grenzwerte beider Verordnungen aufgeführt.

Frequenz $f$ in MHz	1 - 10	10 - 400	400 - 2000	2000 - 300000
elektrische Feldstärke in V/m	$87/\sqrt{f}$	27,5	$1,375\sqrt{f}$	61
magnetische Feldstärke in A/m	$0,73/f$	0,073	$0,0037\sqrt{f}$	0,16

*Tabelle 1: Grenzwerte für Personenschutz (Effektivwerte der Feldstärke, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle). Für  $f$  wird die Frequenz in MHz eingesetzt.*

Aus diesen Feldstärkegrenzen ergibt sich ein Schutzbereich um die Antenne, definiert dadurch, dass innerhalb dieses Schutzbereiches mindestens einer der Grenzwerte überschritten wird. Dieser Schutzbereich muss vollständig innerhalb des vom Funkamateur kontrollierbaren Bereichs liegen, damit Personen außerhalb dieses Bereiches keiner unzulässigen Exposition ausgesetzt werden.

Bei der Berechnung der Schutzabstände muss eine Reihe von Parametern der Funkanlage berücksichtigt werden, wodurch die Berechnungen unter Umständen komplex ausfallen können. Das Watt-Wächter Softwarepaket bietet hierzu eine Hilfe – anhand von nur wenigen Angaben über die Funkanlagekonfiguration berechnet die Software die Schutzbereiche für den Personenschutz und stellt sie grafisch und

numerisch dar. Dabei kommt das im nächsten Absatz erläuterte Berechnungsverfahren zum Einsatz, welches auch das komplexe Nahfeldverhalten der Antennen berücksichtigt.

### 3 Berechnungsverfahren

Die Berechnung der Schutzbereiche in Watt-Wächter erfolgt direkt aus dem elektromagnetischen Feld der Sendeantenne. Daher werden im ersten Schritt das elektrische Feld (E-Feld) und das magnetische Feld (H-Feld) im Raum um die Antenne berechnet. Diese hängen ab von:

- der Sendeleistung
- der verwendeten Antenne
- deren Höhe und Ausrichtung relativ zum Boden
- den Bodeneigenschaften.

Für eine exakte Berechnung des Feldes ist eine (numerische) Lösung der Maxwell-Gleichungen unter den jeweiligen Randbedingungen erforderlich. Dies ist jedoch aufgrund des hohen Aufwandes bei der Modellierung der Umgebung der Antenne und langen Rechenzeiten nicht praktikabel. Daher wird bei Watt-Wächter eine vereinfachte Betrachtung unter Berücksichtigung der Antenne und des Erdbodens implementiert.

Dabei wird der Einfluss der Komponenten getrennt betrachtet: Zunächst erfolgt die Berechnung des Feldes der Antenne unter Annahme eines freien Raumes. Der Bodeneinfluss wird anschließend durch Addition eines bodenreflektierten Pfades, der mittels Spiegelungsmethode berechnet wird, berücksichtigt.

#### 3.1 Modellierung des abgestrahlten Feldes

Die von einer Antenne abgestrahlten Felder ändern sich charakteristisch als Funktion des Abstands. Hierbei lassen sich drei charakteristische Feldregionen um eine Antenne unterscheiden:

– Das **reaktive Nahfeld**, in welchem sehr hohe Blindleistungsanteile auftreten. Die reaktiven Komponenten sind groß im Vergleich zum Strahlungsfeld, nehmen aber schnell ( $1/R^3$  bis  $1/R^2$ ) mit der Entfernung  $R$  von der Quelle ab. Als Grenze des reaktiven Nahfelds wird oft die Entfernung  $R = \lambda/2\pi$  angesetzt. Abhängig von der Stromverteilung an der Antenne kann aber diese Entfernung auch kürzer ausfallen.

– Das **strahlende Nahfeld** – hier ist das Richtdiagramm abhängig vom Abstand und Beobachtungswinkel einer Antenne.

– Das **strahlende Fernfeld**, in welchem die Feldstärken  $E$  und  $H$  des Strahlungsfeldes monoton mit  $1/R$  abnehmen und die winkelabhängige Strahlungscharakteristik der Antenne unabhängig vom Abstand ist. Das Strahlungsfeld einer Antenne im Fernfeld kann lokal als ebene Welle betrachtet werden, was sowohl die mathematische Analyse als auch die Messtechnik erheblich vereinfacht. Für elektrisch große Antennen, die eine Apertur  $D$  mit konstanter Phasenbelegung besitzen, wird allgemein der Beginn des Fernfeldes  $R_{ff}$  angesetzt zu:

$$R_{ff} = \max\left(1, 6\lambda; \frac{2D^2}{\lambda}\right) \quad (1)$$

wobei  $D$  die größte Ausdehnung der Strombelegung bzw. der Apertur darstellt und  $\lambda$  die Wellenlänge.

### 3.1.1 Berechnung des Fernfeldes

Das elektrische Fernfeld  $E$  und das magnetische Feld  $H$  lassen sich im Fernfeld für jede Antenne in einen Abstandsfaktor ( $1/R$ ) und einen nur von der betrachteten Raumrichtung abhängigen Richtcharakteristik-Faktor aufspalten. Für die Effektivwerte eines unmodulierten Signals gilt:

$$E = \sqrt{\frac{P_{Tx} \cdot G \cdot Z_{F0}}{4\pi}} \cdot \frac{1}{R} \cdot C(\theta, \psi), \quad H = \sqrt{\frac{P_{Tx} \cdot G}{4\pi \cdot Z_{F0}}} \cdot \frac{1}{R} \cdot C(\theta, \psi) \quad (2)$$

Der Gewinn  $G$  und die winkelabhängige Richtcharakteristik  $C(\theta, \psi)$  genügen für eine vollständige Beschreibung des Fernfeldes. Das Programm Watt-Wächter betrachtet dabei die vollständige räumliche Charakteristik über den Elevationswinkel  $\theta$  ( $0^\circ$  bis  $180^\circ$ ) und den Azimutwinkel  $\psi$  ( $0^\circ$  bis  $360^\circ$ ).  $Z_{F0}$  ist der Feldwellenwiderstand des freien Raumes,  $120\pi \, \Omega$ .

### 3.1.2 Berechnung des Nahfeldes

Im Gegensatz zum Fernfeld existiert für das Nahfeld einer Antenne keine vergleichbar einfache Möglichkeit der Beschreibung. Diese ist sehr stark von der Form der Antenne abhängig. Die Bestimmung des Nahfeldes ist nur durch (numerische) Lösung der Maxwellgleichungen unter den durch die Antenne bestimmten Randbedingungen möglich. Deshalb greift Watt-Wächter bei der Nahfeldberechnung auf eine Datenbasis mit NEC-Simulationen zu. NEC ist ein frei erhältliches Programm zur Berechnung der Nah- und Fernfelder von Antennen mittels der Momentenmethode auf Basis der Maxwellschen Gleichungen. Die Antenne wird dabei mit ihren korrekten Abmessungen durch eine Drahtstruktur modelliert. Dieses Programm liefert für reale Antennen deutlich genauere Werte als analytische Approximationen oder Abschätzungen. Die so berechneten Felder werden von Watt-Wächter eingelesen und in einem kompakten Format in einer Bibliothek gespeichert. Bei der Berechnung der Felder für derart modellierte Antennen greift Watt-Wächter direkt auf diese Felddaten zurück. Diese Datenbasis umfasst momentan über 250 verschiedene Antennen und wird zusammen mit der Watt-Wächter Software den Funkamateuren zur Verfügung gestellt.

Für Antennen, welche nicht in der Datenbasis enthalten sind, hat der Watt-Wächter Benutzer die Möglichkeit, eigene NEC-Simulationen einzulesen, oder falls die geometrischen Eigenschaften der Antenne nicht bekannt sind, mit einer einfachen Worst-Case-Annahme für das Nahfeld abzuschätzen. Dabei werden das  $E$ - und das  $H$ -Feld auf Grundlage des Feldes eines elektrischen bzw. magnetischen Hertzschen Dipols angenähert. Diese Näherung gilt aber nur, wenn die Abmessungen der Antenne im Vergleich zur Wellenlänge nicht zu groß sind.

### 3.1.3 Übergangsbereich

Da Fernfeld und Nahfeld mit verschiedenen Ansätzen berechnet werden, kann es auf der Grenzfläche der beiden Berechnungsgebiete zu einer Unstetigkeit des Feldes kommen. Deshalb wird im Watt-Wächter um den Fernfeldabstand  $R_{ff}$  ein Übergangsbereich von  $R_{ff}$  bis  $1,2 \cdot R_{ff}$  definiert. In diesem Übergangsbereich werden sowohl die Nahfeldbeschreibung als auch die Fernfeldbeschreibung verwendet und mittels einer Übergangsfunktion, die auf einer abstandsabhängigen, gewichteten arithmetischen Mittelung beruht, stetig ineinander überführt.

### 3.1.4 Sicherheitsfaktor

Um die aus den Näherungen möglicherweise resultierenden Ungenauigkeiten der Feldberechnung zu berücksichtigen, werden das  $E$ - und  $H$ -Feld der Antenne mit einem Sicherheitsaufschlag versehen. Dieser beträgt für die Nahfeldberechnung 10% und für die Fernfeldberechnung 5%.

## 3.2 Kabeldämpfung und Modulation

Die für die vorher beschriebene Feldberechnung benötigte Sendeleistung ist i.d.R. nicht exakt bekannt. Die von der Funkanlage zur Verfügung gestellte Leistung wird durch Dämpfung in Kabeln, Steckern etc. verringert. Bei gegebener Eingangsleistung sinken die Effektivwerte des  $E$ - und  $H$ -Feldes mit der Wurzel aus der Kabeldämpfung.

Auch die Modulationsart beeinflusst die tatsächlich abgestrahlte Leistung. Daher werden, anhand der in Absatz 0 erläuterten Vorgehensweise, die Effektivwerte zusätzlich noch mit einem Faktor  $\sqrt{F_{\text{mod}_{\text{eff}}}}$  multipliziert, der in DIN 0848 Teil 1 [4] spezifiziert ist. Für alle Modulationsarten bis auf Amplitudenmodulation (AM) gilt  $F_{\text{mod}_{\text{eff}}} = 1$  und für AM gilt  $F_{\text{mod}_{\text{eff}}} = 0,38$ . Für modulierte Signale ist die Sendeleistung bei maximaler Aussteuerung der Hüllkurve (engl. *peak envelope power*, PEP) anzugeben.

Zusätzlich ist der Effektivwert vom Sende-Empfangszyklus abhängig. Dieser wird über ein Intervall von 6 Minuten ermittelt. Für den zugehörigen Faktor gilt:

$$F_{\text{Tx}} = \frac{T}{6 \text{ min}}$$

wobei  $T$  die gesamte Betriebszeit des Senders in dem 6 Minuten Intervall angibt. Damit gilt für die Effektivwerte:  $E_{\text{eff}} = E \sqrt{F_{\text{mod}_{\text{eff}}} \cdot F_{\text{Tx}}}$  und  $H_{\text{eff}} = H \sqrt{F_{\text{mod}_{\text{eff}}} \cdot F_{\text{Tx}}}$ . Diese Effektivwerte werden für den Schutzbereich für Personen herangezogen.

## 3.3 Bodeneinfluss

Der Boden wird durch einen zusätzlichen am Boden reflektierten Ausbreitungspfad berücksichtigt. Grundlage dafür bildet die Zweistrahletheorie. Demnach ergeben sich  $E$ - und  $H$ -Feld an einem Punkt durch Superposition des direkten Pfades der reinen Freiraumausbreitung mit dem am Boden reflektierten Pfad. Dadurch entsteht, je nach

Phasenunterschied der beiden überlagerten Pfade, eine ortsabhängige Verteilung von Feldstärkeminima und -maxima. Ist der Boden ideal leitfähig, sind die Amplituden der beiden Pfade annähernd gleich. Bei konstruktiver Überlagerung verdoppelt sich deshalb die Amplitude des resultierenden Feldes gegenüber der reinen Freiraumausbreitung. Daraus resultiert ein maximaler Multiplikator von 2 für die Feldstärken in Bodennähe, welcher als Bodenfaktor bezeichnet wird.

Watt-Wächter berechnet den bodenreflektierten Pfad mittels der sogenannten Spiegelungsmethode. Dazu wird die Sendeantenne an der Ebene des Bodens gespiegelt. Aus der geraden Verbindung zwischen Spiegelsender und Beobachtungspunkt entsteht ein virtueller Ausbreitungspfad, der dem physikalischen Reflexionspfad äquivalent ist, aber noch mit dem Reflexionsfaktor am Boden gewichtet wird. Für einen ideal reflektierenden Boden ist dieser Reflexionsfaktor 1, was gemäß der obigen Betrachtung einem Bodenfaktor von  $F_{\text{Boden}} = 2$  entspricht. Der Reflexionsfaktor wird reell und positiv angenommen. Die Überlagerung mit dem direkten Pfad erfolgt stets konstruktiv, dies entspricht einer worst-case Annahme.

Der Bodenfaktor kann vom Anwender über die Programmoberfläche eingestellt werden, wobei die empfohlene Vorgabe der Wert 2 ist. Für Böden mit geringeren Reflexionseigenschaften (z.B. trockene Böden) kann dieser Wert reduziert werden. Es gilt Reflexionsfaktor =  $F_{\text{Boden}} - 1$

#### **4 Merkmale der Watt-Wächter Software**

Das Watt-Wächter Programm wurde vollständig in der Programmiersprache Java implementiert und läuft somit auf jeder Plattform, welche eine Java 6 Standard-Laufzeitumgebung (JRE6) zur Verfügung stellt. Es bietet zwei Nutzungsmodi an, den Assistenten-Modus, in welchem besonders die einfache Bedienung im Vordergrund steht und den erweiterten Modus, welcher zusätzliche Funktionalität für fortgeschrittene Anwender bietet.

Im Assistenten-Modus wird die Berechnung in 5 Schritten durchgeführt:

1. Wahl der Antenne und des Frequenzbereichs aus der Datenbasis
2. Eingabe der relativen Position und Ausrichtung der Antenne
3. Wahl der Sendebetriebsart und der Leistung
4. Eingaben über Kabeltyp, Kabellänge und zusätzliche Dämpfung
5. Berechnung für Personenschutz

Im erweiterten Modus können zusätzlich Berechnungen von mehreren, gleichzeitig betriebenen Antennen durchgeführt werden, eigene NEC-Antennensimulationen eingelesen werden, oder die Werte der elektrischen und magnetischen Feldstärken in einer beliebigen Ebene ausgegeben werden.

Die Feldberechnungsverfahren sind in beiden Modi gleich. Beide Modi bieten auch eine Unterstützung beim Ausfüllen der Anzeige-Unterlagen. Nach erfolgter Berechnung können die eingegebenen Daten der Funkanlage und die resultierenden Schutzabstände in ein Anzeige-Formular übertragen werden.

Der modulare Aufbau der Software ermöglicht eine einfache Einbindung weiterer Feldberechnungsverfahren für die Antennen wie z.B. einfache analytische Modelle, empirische oder geometrisch-optische Verfahren.

Am präzisesten für reale Antennen sind die Antennenmodelle, welche direkt auf feldtheoretischen Simulationen mit NEC basieren. Dabei wird die Antenne vorab mit dem Programm NEC simuliert und das berechnete Nahfeld für  $E$  und  $H$  sowie die Fernfeldcharakteristik abgespeichert. Diese können von Watt-Wächter eingelesen und anschließend in einem besonders kompakten Format (sog. Field-Dateien) gespeichert werden. Aus diesen Field-Dateien rekonstruiert Watt-Wächter das elektromagnetische Feld, wobei dieses automatisch auf die korrekte Sendeleistung skaliert wird. Die Rekonstruktion erfolgt jedoch nicht völlig verlustfrei, hier wurde ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und dem Bedarf an Speicher und Rechenzeit gefunden. Auf diese Weise wurde eine Bibliothek der laut einer Liste von RTA und DARC am meisten verwendeten Antennen erstellt.

Optimiert ist dieses Verfahren für Antennen welche als „punktförmig“ angenommen werden können, da das Feld intern vereinfacht als Kugelwelle, angenommen wird. Diese Beschreibung ist an das Fernfeld angelehnt, wobei jedoch im Nahfeld die Richtungsabhängigkeit mit dem Abstand variiert und die Entfernungsabhängigkeit beliebig sein darf. Der Vorteil ist, dass diese Darstellung einen stetigen Übergang von der Modellierung des Nahfeldes auf das Fernfeld erlaubt, sowie eine schnelle und effiziente Berechnung der Feldstärken. Für die meisten Antennen, wie Yagi-Antennen, Dipole und Monopole mit Masseebene ist diese Annahme erfüllt.

Probleme bereiten jedoch zunächst Antennen, welche sehr große Abmessungen aufweisen. Dies betrifft Langdrahtantennen und Antennen für sehr niedrige Frequenzen ( $< 10$  MHz). Hier ergibt sich durch die Vereinfachung ein Informationsverlust, so dass der Fehler bei der Berechnung des Feldes in unmittelbarer Umgebung der Antenne zu groß wird. Als Beispiel sei eine Antenne bei 1,875 MHz betrachtet. Die Wellenlänge beträgt also 160 m. Eine Diskretisierung von  $1/20$  der Wellenlänge bedeutet eine räumliche Abtastung von 8 m. Dies ist zu grob, um das Feld in unmittelbarer Umgebung der Antennen zu berechnen, obwohl dieses für den Schutzbereich relevant ist.

Daher wurde die Möglichkeit geschaffen, ein mit NEC berechnetes Nahfeld direkt in Watt-Wächter einzulesen. Die Daten dafür können im Raum einen beliebigen quaderförmigen Bereich abdecken und sind nicht an die Forderung zentrischer Würfel um das Phasenzentrum der Antennen gebunden. Dies ermöglicht eine feinere Diskretisierung. Befindet sich ein Aufpunkt innerhalb dieses Nahfeldes, so wird statt der vereinfachten Darstellung mittels Kugelwellen, der Feldstärkewert direkt aus den Daten des Feldes interpoliert. Der Vorteil ist hier, dass die gleiche Genauigkeit erreicht wird, wie in der zugehörigen NEC Berechnung. Das abgedeckte Raumgebiet ist jedoch durch den zur Verfügung stehenden Speicherplatz begrenzt. Ein nahtloser Übergang auf das Fernfeld ist nicht möglich, daher kommt diese Möglichkeit nur bei ausgewählten Antennen und als Ergänzung zum voranstehend beschriebenen Verfahren zum Einsatz.

## 4.1 Berechnung des Schutzbereichs vs. Schutzabstand

Neu an der Berechnung mit Watt-Wächter ist auch, dass hier ein dreidimensionaler Schutzbereich berechnet wird. Dieser ergibt sich direkt aus jenen Punkten im Raum an denen die zulässigen Grenzwerte für das elektrische oder magnetische Feld überschritten werden. Die Form dieses Bereiches ist im Allgemeinen recht komplex und ist auch nicht notwendigerweise zusammenhängend.

Die Darstellung der Bereiche erfolgt zweidimensional in Form geeigneter Schnittebenen. Es obliegt der Verantwortung des Anwenders diese Schnittebenen repräsentativ und sinnvoll zu wählen, da diese von der speziellen Situation des Grundstückes, der zugänglichen Bereiche und der Umgebung abhängen. Diese Darstellungen bilden die Grundlage für eine Beurteilung, ob der exponierte Bereich vollständig in dem vom Anwender kontrollierbaren Gebiet liegt.

Watt-Wächter bietet darüber hinaus eine Berechnung des Schutzabstandes an. Es ist jedoch im Allgemeinen nicht möglich, die komplizierte Geometrie eines räumlichen Schutzbereiches oder auch nur eines ebenen Schnittes hiervon mit nur einer Zahl hinreichend zu charakterisieren. Standardmäßig berechnet Watt-Wächter hier die größte Ausdehnung des Schutzbereiches bezogen auf den Referenzpunkt der Antenne (Einspeisung). Watt-Wächter erlaubt es dem Anwender aber auch, diese Zahl aus einer Darstellung des Schutzbereiches zu bestimmen.

Der Grund für die Bestimmung eines Schutzabstandes liegt ausschließlich in dem zum gegenwärtigen Zeitpunkt gültigen Anzeigeverfahren der BNetzA, bei dem die Angabe eines Schutzabstandes in Form einer einzigen Zahl erforderlich ist. Es gibt unterschiedliche Definitionen wie diese Zahl zu gewinnen ist, jeweils mit ihren Vor- und Nachteilen. Gemeinsam ist jedoch, dass abgesehen von ganz einfachen Fällen, der *Schutzabstand* (im Gegensatz zum *Schutzbereich*) keine Aussagekraft hat. Das Potential von Watt-Wächter kann sich daher nur dann sinnvoll entfalten, wenn die mit Watt-Wächter generierte Darstellung eines Schutzbereichs, die Angabe des Schutzabstandes im Anzeigeverfahren ersetzen darf.

## 5 Berechnungsbeispiele

### 5.1 Yagi Antenne

Im Folgenden wird ein Berechnungsbeispiel für eine 6-Elemente Yagi Antenne (Optibeam OB6-10) gezeigt. Die Frequenz sei  $f = 28,85$  MHz und die Sendeleistung  $P_{TX} = 100$  W. Es wird Einseitenbandmodulation (engl. *Single-Side-Band Modulation*, SSB) und der Sendezyklus Tx6-Rx0 (6 Minuten Senden, 0 Minuten Empfangen) genutzt. Die Antenne befindet sich in einer Höhe  $h = 10$  m und ihre Hauptstrahlrichtung ist nach Norden (oben im Bild) orientiert. Zusätzlich wird ein 10 m langes Kabel mit einer Dämpfung von  $a = 1,2$  dB berücksichtigt. Abbildung 1 zeigt die berechneten  $E$ - und  $H$ -Felder, Abbildung 2 zeigt den Schutzbereich für Personenschutz in einer horizontalen Ebene auf Antennenhöhe. Bei der Schutzbereichsdarstellung ist der Bereich, in dem eines der EM-Felder höher als die Expositionsgrenzwerte (27,50 V/m und 0,073 A/m) ist, eingefärbt.



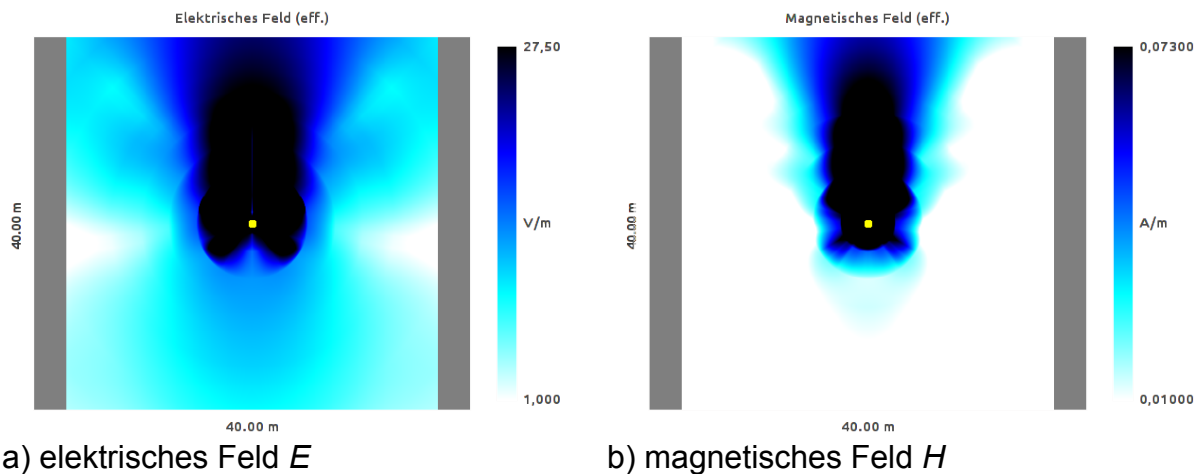


Abbildung 1: Elektrisches und magnetisches Feld um eine OB6-10 Antenne (horizontaler Schnitt durch die Antenne in der Höhe von 10 m)

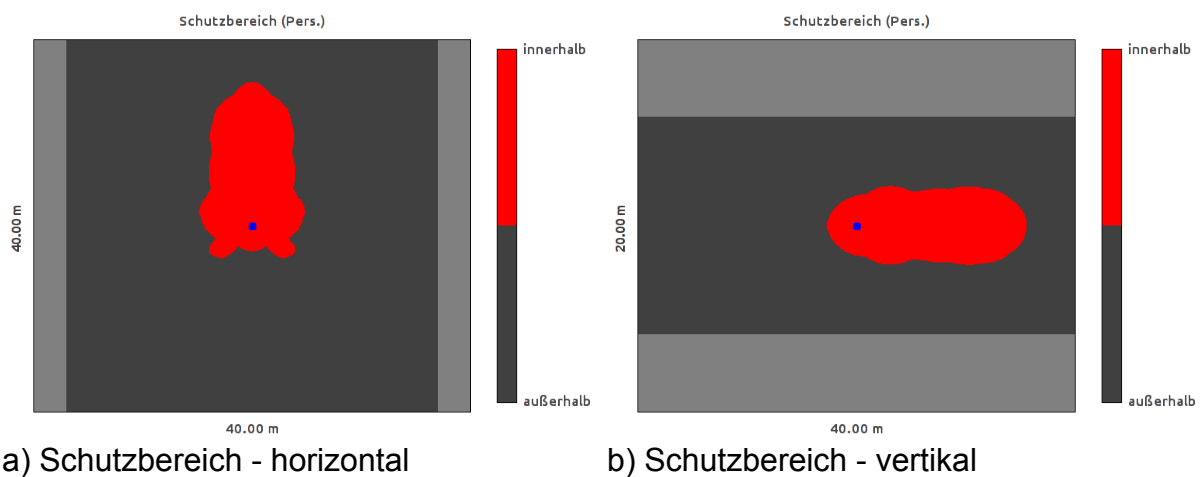


Abbildung 2: Schutzbereich um eine OB6-10 Antenne (horizontaler Schnitt durch die Antenne in der Höhe von 10 m)

Für die OB6-10 Antenne mit der Boomlänge von 11,3 m beträgt der Fernfeldabstand bei der Frequenz  $f = 28,85$  MHz ca. 25 m. Deshalb kann hier die Fernfeld-Approximation des Schutzabstandes nach (2) nicht herangezogen werden.

Die Kantenlänge des dargestellten Gebiets kann beliebig gewählt werden, um den Schutzbereich bequem auf die Größe des kontrollierbaren Bereichs beziehen zu können. Die Software bietet auch die Möglichkeit das Bild abzuspeichern, um den dargestellten Schutzbereich einer Grundstückzeichnung überlagern zu können.

## 5.2 Halbwellendipol

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen eine Berechnung für einen Halbwellendipol bei einer Frequenz von 14,175 MHz und Sendeleistung von 500 W. Die Antennenhöhe, Modulation und Sendezyklus sind identisch wie im vorherigen Beispiel, es wurde lediglich keine Kabeldämpfung berücksichtigt. In dem Schutzbereich mit der Ausdehnung von ca. 9 m in beide Richtungen können in der horizontalen Richtung (x-Richtung) die Bereiche identifiziert werden, in welchen der  $E$ -Feld Grenzwert von 27,5 V/m überschritten wird und in der vertikalen Richtung (y-Richtung) die Bereiche, in welchen die  $H$ -Feld Grenze von 0,073 A/m überschritten wird. In dem vertikalen Schnitt ist der Einfluss der Bodenreflexion sehr gut erkennbar.

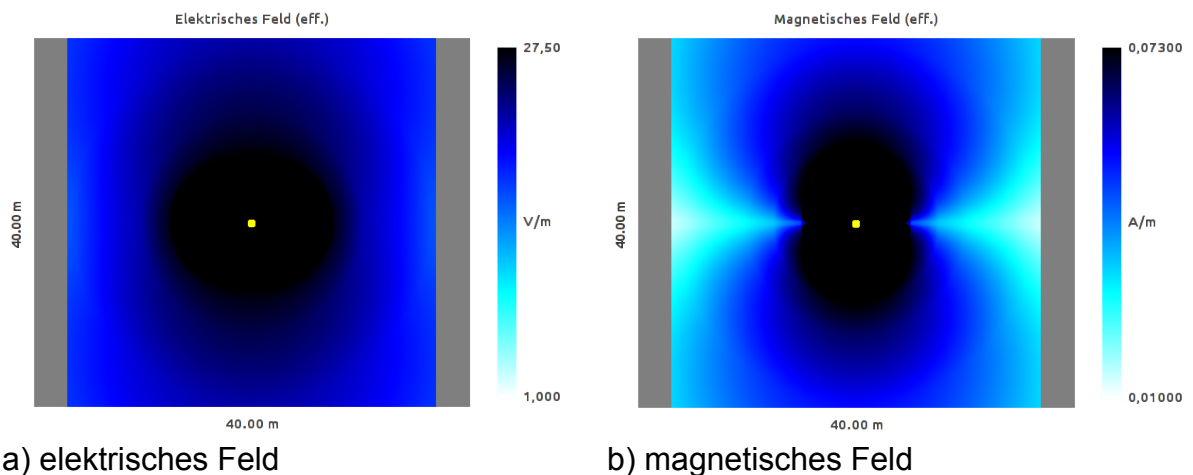


Abbildung 3: Elektrisches und magnetisches Feld um eine Halbwellendipol Antenne (horizontaler Schnitt durch die Antenne in der Höhe von 10 m)

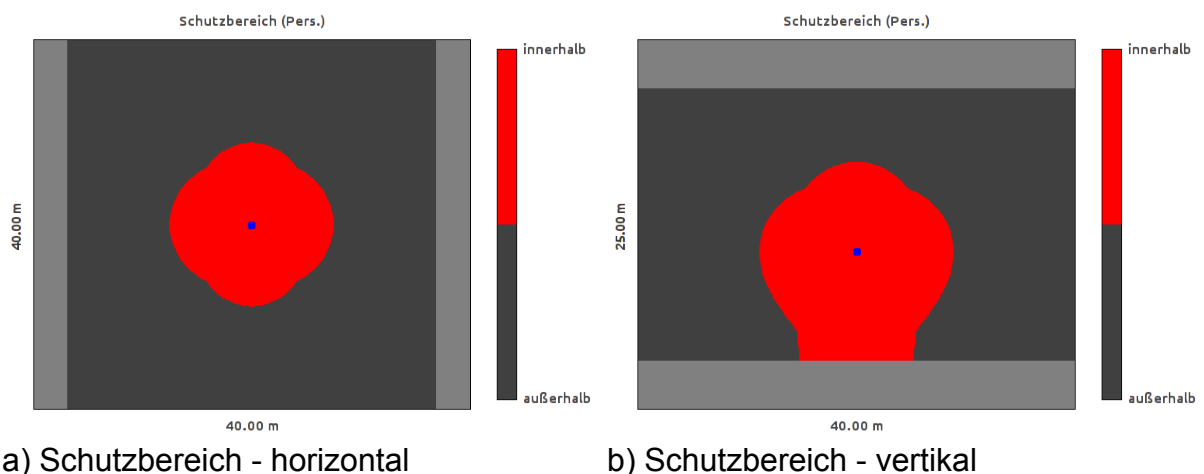


Abbildung 4: Schutzbereich um eine Halbwellendipol Antenne (horizontaler Schnitt durch die Antenne in der Höhe von 10 m)

### 5.3 Langdraht Antenne

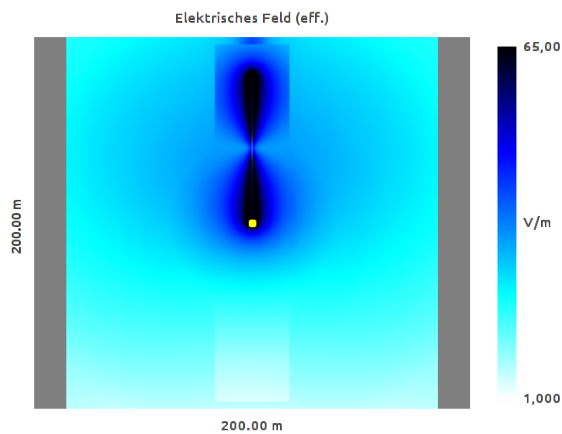
Bei sehr langen Antennen muss der mit NEC abgetastete Bereich sehr groß sein, bei einer begrenzten Anzahl an Simulationspunkten wird damit zwangsläufig die Diskretisierung gröber. Durch die Interpolation der Daten bei der Watt-Wächter Berechnung werden dann unter Umständen die schmalen Spitzen des Feldes, welche am Ende der Antenne auftreten, nicht erfasst. Unter anderem können dadurch für gleiche Antennen bei unterschiedlichen Auflösungen der NEC-Daten stark abweichende Schutzbereichsgrößen berechnet werden.

Da dies, wie sich gezeigt hat, bei Langdraht-Antennen zu Problemen führen kann, wurde für diese Antennen eine zusätzliche NEC-Berechnung eingeführt, welche die unmittelbare Umgebung der Drahtantenne mit hoher Auflösung erfasst. Diese Berechnung ist im Gegensatz zu den NEC-Daten anderer Antennen nicht würfelförmig, sondern quaderförmig. Damit reduziert sich die Anzahl der Berechnungspunkte und ermöglicht eine hohe Auflösung im Antennennahbereich. Zusätzlich wird in diesem Bereich auf die Interpolation und Mittelung mit der Fernfeld-Richtcharakteristik verzichtet. Dadurch entstehen unter Umständen zwar leichte Unstetigkeiten in dem berechneten  $E$ - und  $H$ -Feld, der Schutzbereich wird aber direkt aus der NEC-Simulation abgeleitet.

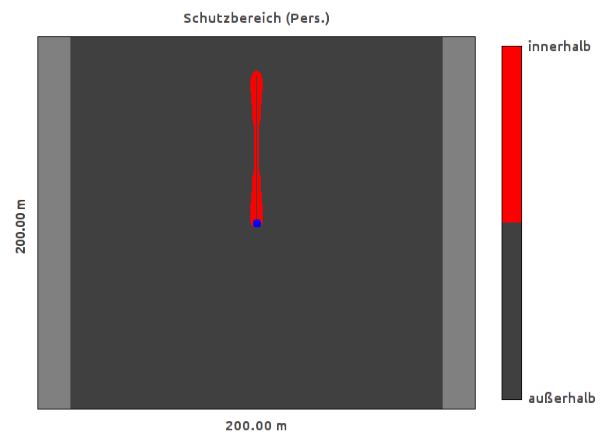
Abbildung 5 zeigt das  $E$ -Feld und den Schutzbereich einer 80 m langen Langdrahtantenne bei 1,83 MHz. Die Sendeleistung beträgt 750 W, es wird SSB Modulation und der Sendezyklus Tx6-Rx0 verwendet. Die Antennenhöhe beträgt hier  $h = 50$  m, um den Einfluss des Bodens zu minimieren. Im  $E$ -Feld sind die Übergänge zum grober abgetasteten Bereich auf beiden Seiten der Antenne sichtbar. Die Größe der quaderförmigen Felder für die Langdrahtantennen wurde so gewählt, dass sie bei der maximal zulässigen Leistung den gesamten Schutzbereich abdecken (Abb. 5b). Somit sind die Unstetigkeiten für die Schutzabstandsberechnung unkritisch.

Da NEC auf den metallischen Objekten -also auf der Antenne selbst- eine Feldstärke von 0 ausgibt, wird auch der von Watt-Wächter berechnete Schutzbereich je nach Diskretisierung der NEC-Simulationen eine Lücke an der Position der Antenne aufweisen. Dies ist besonders gut in Abbildung 6 sichtbar. Die Berechnung wurde hier für die gleiche Antenne bei einer geringeren Leistung von  $P_{TX} = 100$  W durchgeführt.

Bei dieser Leistung werden die Bereiche mit hohen Feldstärken um die Antenne sehr klein so dass sie bei der Auflösung von 1-2% der Antennenlänge auch in der NEC-Simulation nicht mehr sichtbar sind. In Abbildung 7 ist ein Ergebnis der NEC-Simulation, die in Watt-Wächter verwendet wurde bei  $P_{TX} = 100$  W gezeigt. Auch hier liegen nur wenige Punkte am Anfang und Ende der Antenne über dem Grenzwert von ca. 65 V/m. Der angezeigte Punkt entspricht der Koordinate ( $x=61$ ) ab welcher der Schutzbereich am Ende der Antenne identifiziert werden kann. Auch der mit Watt-Wächter simulierte Schutzbereich ist ab ungefähr gleicher Entfernung sichtbar.

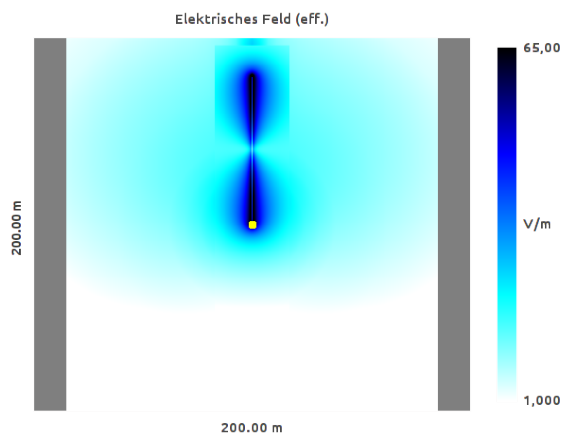


a) elektrisches Feld

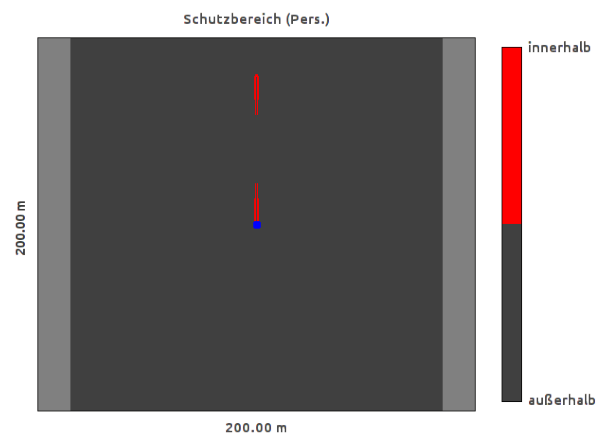


b) Schutzbereich

Abbildung 5: Elektrisches Feld und Schutzbereich um eine 80 m Langdraht-Antenne bei 750 W Sendeleistung (horizontaler Schnitt durch die Antenne in der Höhe von 50 m)

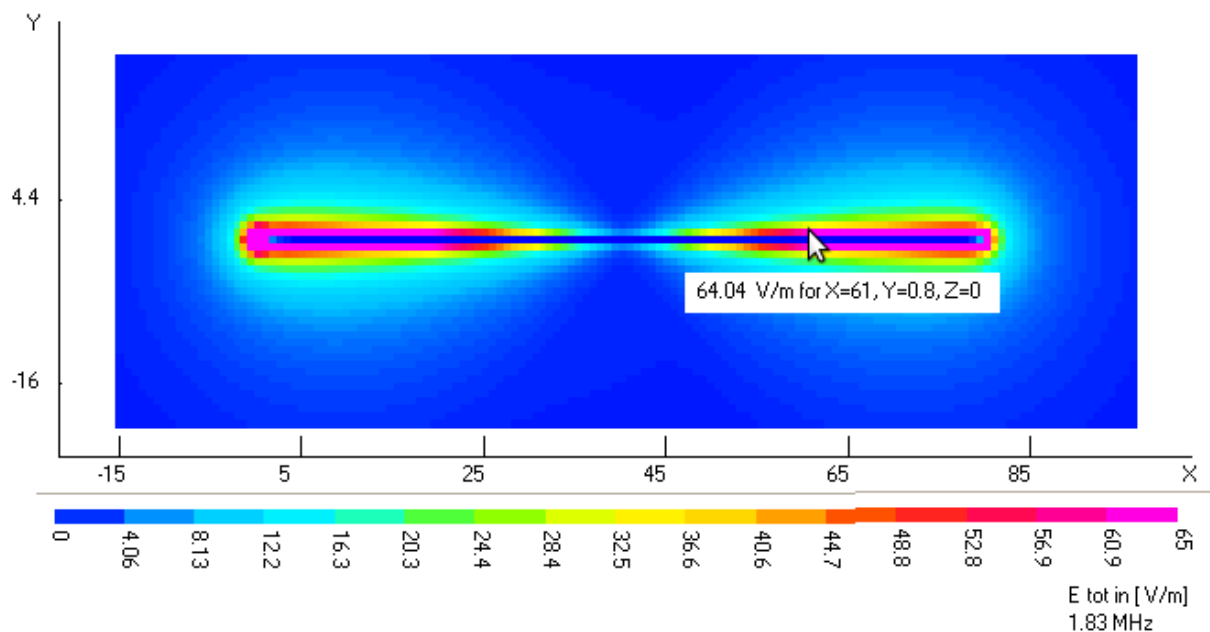


a) Schutzbereich - horizontal



b) Schutzbereich - vertikal

Abbildung 6: Elektrisches Feld und Schutzbereich um eine 80 m Langdraht-Antenne bei 100 W Sendeleistung (horizontaler Schnitt durch die Antenne in der Höhe von 50 m)



*Abbildung 7: Elektrisches Feld um eine 80 m Langdraht-Antenne bei 100 W Sendeleistung simuliert mit NEC2 (horizontaler Schnitt durch die Antenne im Freiraum)*

## 6 Zusammenfassung

Mit der Watt-Wächter Software wird dem Funkamateurl ein wertvolles Werkzeug an die Hand gegeben, welches ihn dabei unterstützt, seine ortsfeste Amateurfunkstelle hinsichtlich der Einhaltung der geltenden Grenzwerte zum Schutz vor elektromagnetischen Feldern selbst zu testen, die sich ergebenden Schutzbereiche zu ermitteln und bei Bedarf entsprechend der BEMFV anzuzeigen.

Das Programm beinhaltet eine einzigartige Kombination der Berechnung des Schutzbereiches um Amateurfunkantennen inkl. Nahfeldberechnung mit der Unterstützung bei der Erstellung der Unterlagen für das Anzeigeverfahren. Eine einfache Bedienung und eine große Datenbasis an verfügbaren Antennen erlauben verschiedenste Konfigurationen im Rahmen der zulässigen Personenschutzgrenzwerte auf einfachste Weise zu testen.

## Referenzen

- [1] Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) vom 20.08.2002
- [2] 26. BImSchV - Verordnung über elektromagnetische Felder vom 16. Dezember 1996
- [3] Empfehlung des Rates der Europäischen Union zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300GHz) vom 12. Juli 1999 (1999/519/EG)
- [4] DIN VDE 0848-3-1, Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz, Entwurf, Mai 2005