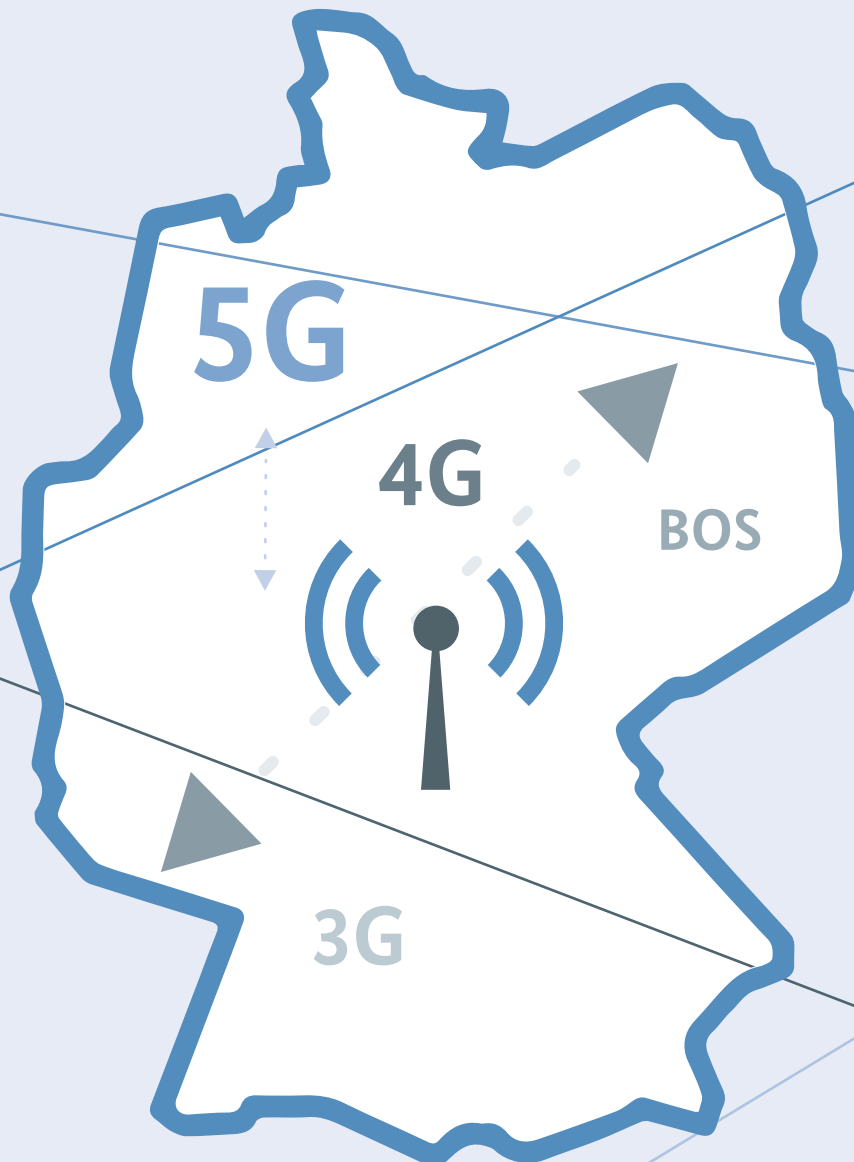




WattWächter –

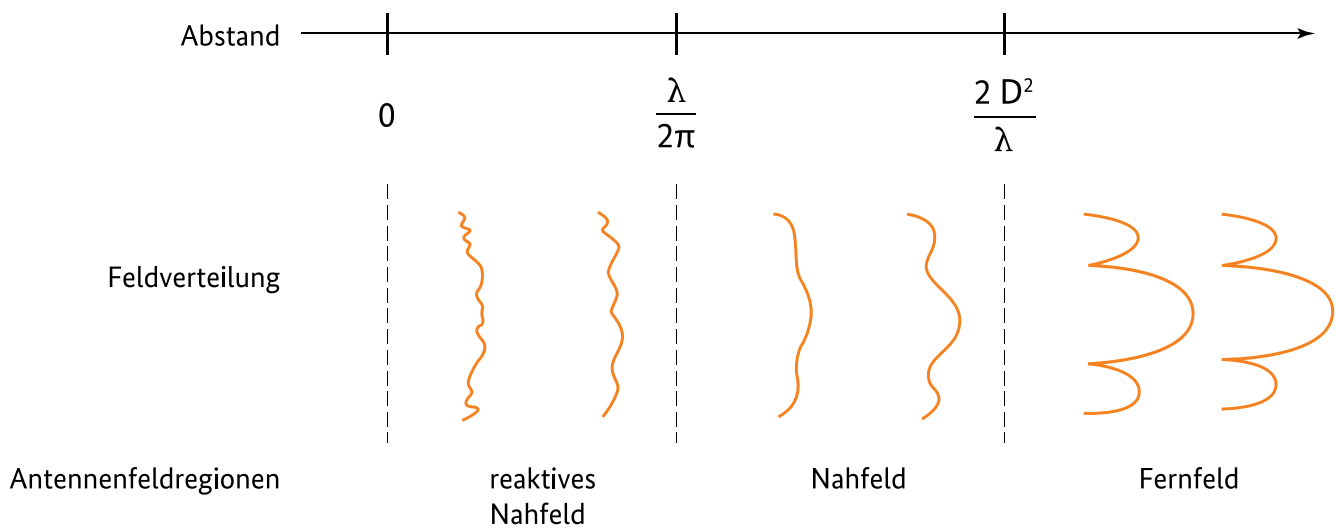
Elektromagnetische Felder (EMF)

Verfahren zur Bewertung von Funkanlagenstandorten (insbesondere 3G, 4G, 5G)



Inhalt

Bewertungsmethodik „WattWächter“	3
Berechnung des Schutzbereiches	3
Beschreibung des Verfahrens	4
5G Massiv MIMO Beamforming Antennen	6
Berechnungsbeispiele	7
Testantenne Kathrein 80010664	8
Testantenne Huawei ATR4518R14v06	9
Testantenne Commscope HWXXX-6516-DS-VTM	10
Verifikationsmessungen	11
Fazit	11



Bewertungsmethodik „WattWächter“

Zur besseren Abdeckung von Mobilfunkdiensten sowie zur Sicherstellung der erforderlichen Netzqualität besteht die Notwendigkeit, mehr Sendeantennen zu installieren. Unabhängig von der jeweiligen Funktechnik (3G, 4G, 5G, BOS usw.) muss dabei jedoch sichergestellt bleiben, dass die gesamte Exposition unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte bleibt.

Die Bundesnetzagentur hat hierzu das rechnerische Bewertungsverfahren zur Erteilung von Standortbescheinigungen mit einer Methodik ergänzt, dessen Genauigkeit mit einer Feldstärkemessung vergleichbar ist. Damit lassen sich insbesondere 5G Mobilfunkstandorte auch ohne zeitaufwändige und kostenintensive Feldstärkemessungen sicher bewerten.

Ähnliche Vorgehensweisen nutzen oft Näherungen basierend auf sehr einfachen Modellen zur Berechnung, welche nicht die tatsächlichen Eigenschaften der Antennen berücksichtigen. Diese vereinfachten Verfahren benötigen oftmals auch Parameter der Antenne, welche oftmals nur schwer abzuschätzen sind. Die geforderte hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit ist damit oft nicht zu erreichen.

Wattwächter basiert dagegen auf einer feldtheoretischen Berechnungsmethode und erreicht damit eine hohe Genauigkeit und Eindeutigkeit der Berechnung.

Damit bietet dieses Verfahren folgende Vorteile:

- Berücksichtigung der realen Antenneneigenschaften basierend auf Nahfeldmessungen der Hersteller
- Dreidimensionale Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder und daraus Bestimmung des Schutzbereiches (Exposition, Arbeitsschutz)
- Keine Verwendung von Näherungsformeln oder schwer zu definierenden Antennenparametern
- Erweiterbarer Antennenkatalog
- Integration bestehender Alt-Anlagen basierend auf Fernfeldmessungen der Hersteller
- **Massive MIMO-Tauglichkeit** basierend auf Einhüllenden-Daten der Hersteller
- Feldtheoretische Überlagerung umliegender Antennen am Standort
- Benutzerdefinierte Ausgabemöglichkeiten
- Plattformunabhängig

Berechnung des Schutzbereiches

Der Schutzbereich um eine Antenne oder einer Anordnung von Antennen ist der Bereich, in welchem die Grenzwerte für das elektrische oder magnetische Feld überschritten werden. Dieser ergibt sich damit direkt aus dem elektromagnetischen Feld. Über die Genauigkeit des Schutzbereiches entscheidet damit die Genauigkeit des zugrundeliegenden Berechnungsverfahrens für die elektromagnetische Feldstärke. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich daher auf das Verfahren zur elektromagnetischen Feldberechnung.

Der relevante Schutzbereich befindet sich gewöhnlich im Nahbereich der Sendeantenne. Für eine sehr große Anzahl

von Sendeantennen liegen Nahfeldmessdaten der Hersteller vor, für einige ältere Sendeantennen sind Fernfelddaten der Hersteller verfügbar. Wattwächter kann diese Fernfelddaten ebenfalls verarbeiten und basierend auf diesen auch im Nahbereich eine Feldberechnung durchführen und einen Schutzbereich ausweisen. Durch Vergleichsberechnungen mit Sendeantennen, für die sowohl Nahfeld- als auch Fernfelddaten vorliegen, wurden die Felder und Schutzbereiche im Nahbereich der Sendeantenne ausgewertet. Darauf basierend wurde die Fernfeldberechnung in den Nahbereich extrapoliert und darauf Wert gelegt, dass auch mit der Fernfeldberechnung Schutzbereiche nicht unterschritten werden.

Beschreibung des Verfahrens

Eine wesentliche Forderung an das in Wattwächter implementierte Verfahren ist, dass trotz einer verbesserten Berechnungsgenauigkeit keine detaillierten Kenntnisse über die Antenne erforderlich sind. Der genaue Aufbau der Sendeantenne ist in der Regel nur dem Hersteller bekannt. Folglich wäre ein Verfahren basierend auf einer detailgetreuen Simulation schwer umzusetzen und zudem sehr aufwändig.

Wattwächter basiert auf dem Äquivalenzprinzip. Demnach lässt sich das von einer Quelle abgestrahlte Feld auch ohne Kenntnis der Quelle (hier Sendeantenne) exakt berechnen, wenn das tangential elektromagnetische Feld auf einer geschlossenen Hülle um die Antenne bekannt ist. Diese Hülle wird dabei zweckmäßigerweise recht klein im Nahbereich der Antenne gewählt. Dieses kann zum Beispiel eine Kugeloberfläche sein, auf welcher das elektromagnetische Feld inklusive Polarisation und Phase durch Messung bestimmt wird (Nahfeldmessung). Entsprechende Messwerte sind beim Antennenhersteller in der Regel vorhanden. Die Wirkungsweise des Verfahrens beruht darauf, dass außerhalb dieser Hülle das Feld aus diesen gemessenen Nahfelddaten exakt rekonstruiert werden kann. Innerhalb dieser Hülle ergibt das rekonstruierte Feld stets null. Dadurch spielen die Randbedingungen im Inneren der Hülle und damit der Aufbau der Antenne selbst keine Rolle mehr. Wichtig ist nur, dass sich die gesamte Antennenstruktur innerhalb dieser Hüllfläche befindet.

Sind die tangentialen Feldstärkekomponenten von E und H auf der gesamten Kugeloberfläche bekannt, kann das

Feld außerhalb der Kugel durch Anwenden der Greenschen Funktion mittels Integration über die Kugeloberfläche bestimmt werden. Gemäß dem Eindeutigkeitssatz stimmt das so berechnete Feld mit dem originalen Feld der Antenne in jedem Punkt außerhalb der Kugel überein.

Im Inneren der Kugel wird eine Interpolation der gemessenen Daten auf der Kugeloberfläche und der Feldverteilung auf der Antenne durchgeführt. Die Sendeantenne wird dabei als linienförmiger Flächenstrahler angenommen, da dies einer realen Mobilfunkantenne am nächsten kommt. Innerhalb der Kugel muss damit eine Feldverteilung bestimmt werden, die die Feldverteilung auf der Messkugel hin zur Ersatzquelle approximiert. Hierfür lässt sich in der Regel keine exakte Lösung finden, es lässt sich jedoch eine bestmögliche Approximation bestimmen, so dass die erreichte Lösung das Feld auf der äußeren Hüllfläche bezüglich der geringsten Abweichung im Sinne der Euklidischen Norm approximiert. Zusätzlich wird eine Interpolationsvorschrift verwendet, so dass das Feld an allen Punkten der Hüllfläche stetig in den Außenbereich übergeht.

Die Anwendung der Fernfelddaten im Nahbereich der Antenne wird in Wattwächter mittels einer modifizierten Fernfeldberechnung realisiert. Die Abstandsgesetze zur Interpolation des Fernfeldes in den Nahbereich der Antenne sind abhängig von der gewählten Apertur der Antenne. Auch hier wird im Inneren der Kugel ein Linienstrahler angenommen. Dabei wird der Bereich der maximalen Feldstärke über die gesamte Länge der Apertur ausgedehnt und erst ab den Rändern dieses Bereiches mit der Richtcharakteristik gewichtet. Diese Abschätzung stellt über den Bereich der Aperturfläche im Allgemeinen eine eher großzügige Abschätzung dar.

Die berechneten Feldstärken werden mit einem Sicherheits- und Umgebungsfaktor multipliziert, bevor sie zur Bestimmung des Schutzbereiches eingesetzt werden. Die beiden Faktoren besitzen eine unterschiedliche Bedeutung und sind getrennt voneinander zu bestimmen. Die Beeinflussung der Feldstärke erfolgt jedoch von beiden Faktoren in gleicher Weise, indem die berechneten Felder E_{eff} und H_{eff} mit einem Faktor > 1 multipliziert werden. Der Sicherheitsfaktor dient der Absicherung gegenüber Ungenauigkeiten bei der Berechnung. Trotz der hohen Präzision bei der Berechnung können Abweichungen der berechneten Feldstärke zum korrekten Wert auftreten. Dies beginnt bei den Nahfeldmessungen, deren Messwerte zur

Modellierung der Ersatzquelle herangezogen werden und endet bei den Fehlern in der numerischen Berechnung. Daneben sind auch die Messwerte, welche zur Verifikation herangezogen werden, selbst mit einem Fehler behaftet. Daher müssen die Feldstärken mit einem geeigneten Sicherheitsfaktor versehen werden, der sicherstellt, dass die realen Feldstärkewerte die berechneten Werte nicht übersteigen. Bei Messungen im Bereich höherer Feldstärken -also im Bereich der Hauptstrahlrichtung- ist dies bereits ohne zusätzlichen Sicherheitsfaktor gegeben. Im Bereich kleinerer Feldstärken und damit höheren Unsicherheiten, kommt ein höherer Sicherheitsfaktor zum Ansatz. Daher wird der Sicherheitsfaktor nicht pauschal auf alle Punkte angewendet, sondern wird mit dem Antennengewinn wie folgt gewichtet:

- Winkelbereiche, in denen der Antennengewinn $G(\theta, \psi) < 1$ (0 dB) ist, erhalten einen Sicherheitsfaktor von 1,3
- Winkelbereiche mit einem Antennengewinn $G(\theta, \psi) > 1$ erhalten einen Sicherheitsfaktor von

$$1 + \frac{30\%}{G(\theta, \psi) \text{ (linear)}}$$

wobei der Wert für den Gewinn linear eingesetzt wird.

Die Umgebung kann aus Prinzip nicht exakt berücksichtigt werden, da die Modellierung sehr aufwändig wäre und sich der Berechnungsaufwand erheblich vergrößern würde. Aus praktischer Sicht steht dem nur ein geringfügiger Mehrnutzen gegenüber. Hinzu kommt, dass sich die Umgebung mit der Zeit verändern kann, sowohl durch bewegliche Objekte als auch durch die Änderung der Bebauung oder Vegetation, was jedes Mal eine Neuberechnung erfordern würde. Durch die exponierte Lage von Mobilfunk-Basisstationsantennen sowie durch die hohen Frequenzen in Verbindung mit Antennen hoher Richtwirkung spielt die Mehrwegeausbreitung und Interaktion mit der Umgebung im Nahbereich der Antennen nur eine untergeordnete Rolle. Daher wird diese durch einen Umgebungsfaktor berücksichtigt.

Normalerweise werden Mobilfunkantennen so aufgestellt, dass diese freie Sicht haben. Aufgrund der starken Bündelung des abgestrahlten Felds findet somit im Nahbereich in der Regel keine direkte Interaktion von Antenne und Umgebung statt. Das abgestrahlte Feld trifft dann erstmals

auf die Umgebung, wenn dieses schon relativ weit abgeklungen ist und für den Schutzbereich keine Rolle mehr spielt. Hier wäre allenfalls die Nebenstrahlung der Antenne zu berücksichtigen. Liegen die Nebenmaxima ca. 10 dB unter der Hauptkeule und erfahren eine ideale Reflexion, so wäre eine Erhöhung der Feldstärke um 30% zu erwarten. Dies entspricht einem Umgebungsfaktor von 1,3. Aus den oben genannten Bedingungen und bei einer Nebenkeulendämpfung von > 10 dB, wie sie bei Mobilfunkantennen üblich ist, kann bei ordnungsgemäßer Installation der Antennen ein Umgebungsfaktor von 1,3 für den Bereich abseits der Hauptstrahlrichtung festgesetzt werden. Innerhalb der Hauptstrahlrichtung bzw. in Bereichen mit einem Antennengewinn $G > 1$ wird der Zuschlag ebenfalls mit dem Gewinn gewichtet, analog zum Sicherheitsfaktor. Das bedeutet für den Umgebungsfaktor:

- Winkelbereiche, in denen der Antennengewinn $G(\theta, \psi) < 1$ (0 dB) ist, erhalten einen Umgebungsfaktor von 1,3
- Winkelbereiche mit einem Antennengewinn $G(\theta, \psi) > 1$ erhalten einen Umgebungsfaktor von

$$1 + \frac{30\%}{G(\theta, \psi) \text{ (linear)}}$$

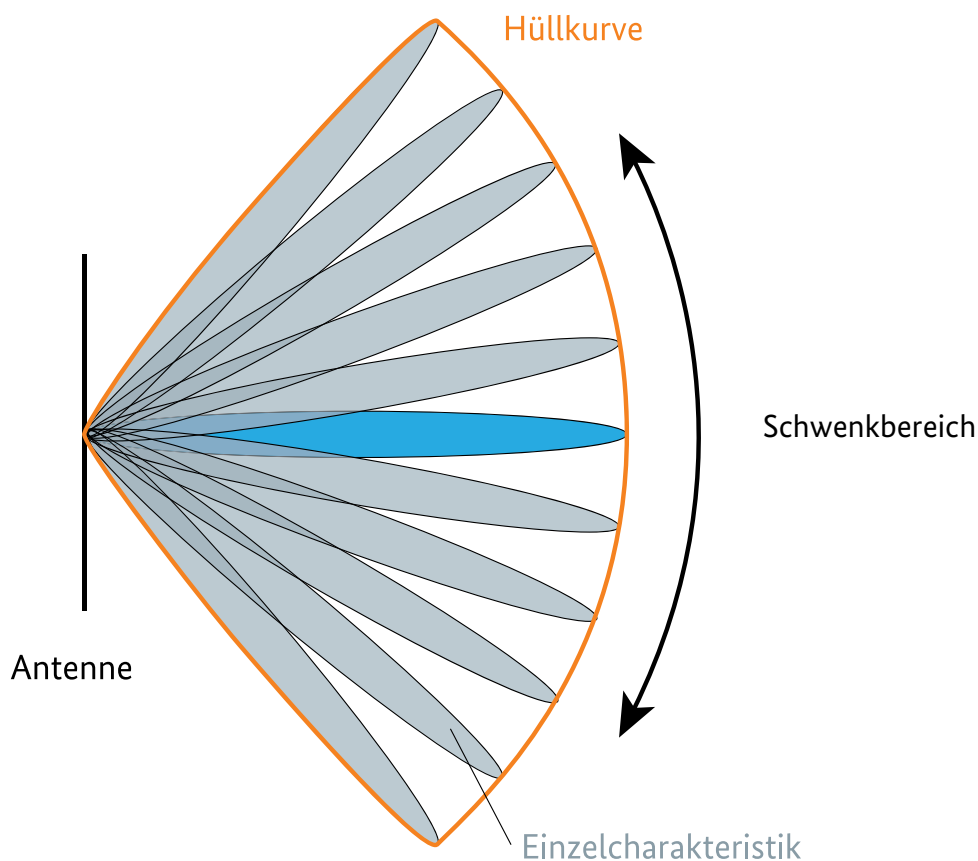
wobei der Wert für den Gewinn linear eingesetzt wird.

5G Massiv MIMO Beamforming Antennen

Zusätzlich erlaubt Wattwächter die Berechnung des Schutzbereichs bei 5G massive MIMO (mMIMO) Standorten. Diese Sendeantennen rekonfigurieren sich im Betrieb ständig selbst, um sich dem Nutzungs- bzw. Ausbreitungsverhältnisse der Umgebung anzupassen (Beamforming). Der Betriebszustand ist also abhängig vom Nutzer- und Umgebungsszenario und damit zeitvariant und nicht vorher-sagbar. Das bedeutet, es müssen alle möglichen Betriebs-zustände berücksichtigt werden. Für den Schutzabstand ist maßgebend, wie hoch die Feldstärke in einem bestimmten

Raumpunkt maximal werden kann, wenn alle möglichen Betriebszustände betrachtet werden. Der Schutzbereich wird daher anhand einer Worst-Case-Abschätzung ermit-telt. Hierzu wird eine Single User / Single Beam Zustand angenommen, bei dem die Sendeleistung maximal in einen einzigen Beam, also in einen schmalen Winkelbereich, gebündelt wird. Dieser schmale Beam wird anschließend über den gesamten technisch möglichen Schwenkbereich der Antenne ausgedehnt (Hüllkurvenbetrachtung). Dieses Verfahren ist anschaulich in Bild 1 dargestellt.

Bild 1: Entstehung der Worst-Case Hüllkurven-Richtcharakteristik aus den Einzelcharakteristiken des Single-User / Single-Beam Modes



Berechnungsbeispiele

Der Nachweis der Funktion und der praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens erfolgt anhand häufig verwendeter Mobilfunkantennen verschiedener Hersteller. Für alle Antennen liegen sowohl Nahfeld- als auch Fernfeldmessdaten der jeweiligen Hersteller vor. Damit wird ein Vergleich der Schutzbereiche basierend auf Nahfelddaten und auf Fernfelddaten im Nahbereich um die Antenne möglich.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Eingabebereich von Wattwächter, mit den hier vorgestellten Sendantennen.

Alle gezeigten Antennen befinden sich in einer Höhe von 10m und werden jeweils mit einer Leistung von 100 W gespeist. Der elektrische Downtilt beträgt bei allen Antennen 2°, ein mechanischer Downtilt ist nicht eingestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils einen Vertikalschnitt des elektrischen Feldes und des daraus abgeleiteten Schutzbereiches. Der Fußpunkt der Antenne (Unterkante der Antenne) ist durch den türkisfarbigen Punkt in der Mitte des linken Bildrandes dargestellt.

Bild 2: Konfiguration der Antennen

	1	2	3	4	5	6
System name:						
Manufacturer:	Kathrein	Huawei	Commscope	Add new ...	Add new ...	Add new ...
Antenna model:	80010664	ATR4518R14v06	HWXXX-6516DS			
Port:	M45_Y1	yL-	N45_Y1			
x-Position (m):	0.00	0.00	0.00			
y-Position (m):	0.00	0.00	0.00			
Height (z):	10.00	10.00	10.00			
Direction (°):	0.0	0.0	0.0			
Mech. downtilt (°):	0.0	0.0	0.0			
Frequency (MHz):	2690	2670	2655			
Tx Power (W):	100.0	100.0	100.0			
Attenuation (dB):	0.00	0.00	0.00			
El. downtilt (°):	2.0	2.0	2.0			
Enable	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Loaded file 'test_config_2020_03.wwmobil'. Calculate

Testantenne Kathrein 80010664

In Abbildung 3a ist zu erkennen, dass bei Anwendung der Fernfeldberechnung (rechtes Bild) die Feldstärken im Nahbereich der Antennen etwas größer sind als die Feldstärken, die basierend auf den Nahfelddaten (linkes Bild) berechnet wurden. Entsprechend ergibt sich ein etwas vergrößerter

Schutzbereich in der Umgebung der Antenne bei Verwendung der Fernfelddaten, wie in Abbildung 3b rechts dargestellt. Bei größerem Abstand, z.B. in der Hauptkeule, wirkt sich dies jedoch kaum aus. Ebenfalls deutlich zu erkennen sind hier die Nebenkeulen der Antenne.

Bild 3a: Berechnete E-Feldstärke im Vertikalschnitt (Kathrein 80010664) links aus Nahfelddaten, rechts aus Fernfelddaten des Antennenherstellers

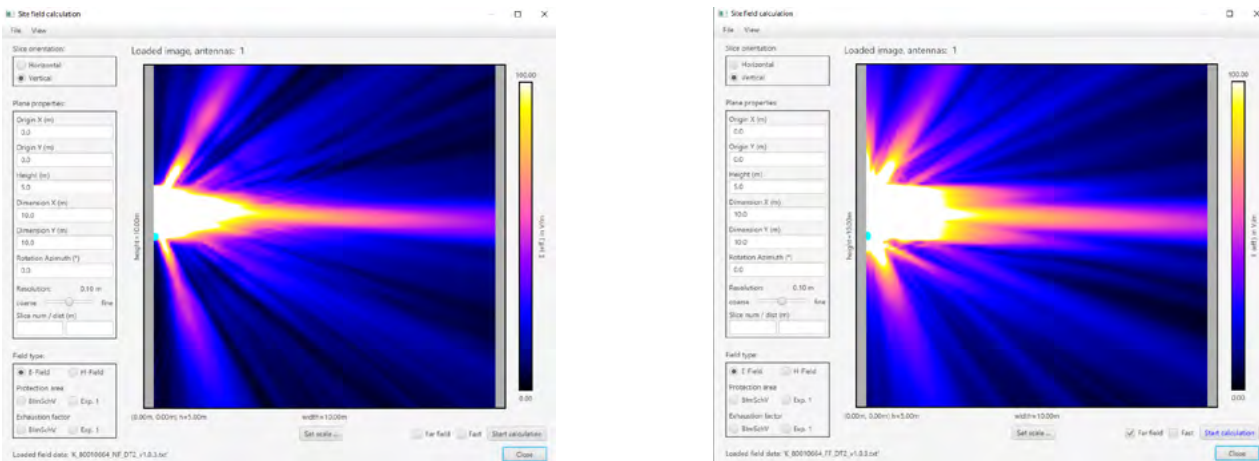
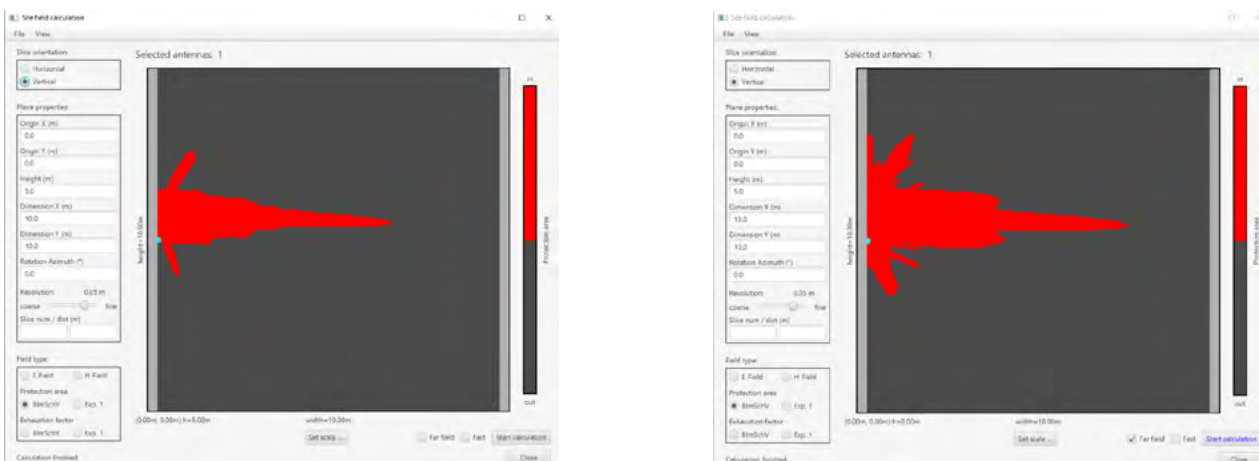


Bild 3b: Berechnete Schutzbereiche im Vertikalschnitt (Kathrein 80010664) links aus Nahfelddaten, rechts aus Fernfelddaten des Antennenherstellers



Testantenne Huawei ATR4518R14v06

In Abbildung 4a ist zu erkennen, dass bei Anwendung der Fernfeldberechnung (rechtes Bild) die Feldstärken im Nahbereich der Antennen etwas größer sind als die Feldstärken, die basierend auf den Nahfelddaten (linkes Bild) berechnet wurden. Entsprechend ergibt sich auch hier ein etwas vergrößerter Schutzbereich in der Umgebung der Antenne bei

Verwendung der Fernfelddaten, wie in Abbildung 4b rechts dargestellt. Bei größerem Abstand, z.B. in der Hauptkeule, wirkt sich dies weniger aus. Während hier der Schutzbereich bei der Nahfeldberechnung keine Nebenkeule nach unten aufweist, ist bei der Fernfeldnäherung eine Ausdehnung im Bereich der unteren Nebenkeule zu erkennen.

Bild 4a: Berechnete E-Feldstärke im Vertikalschnitt (Huawei ATR4518R14v06) links aus Nahfelddaten, rechts aus Fernfelddaten des Antennenherstellers

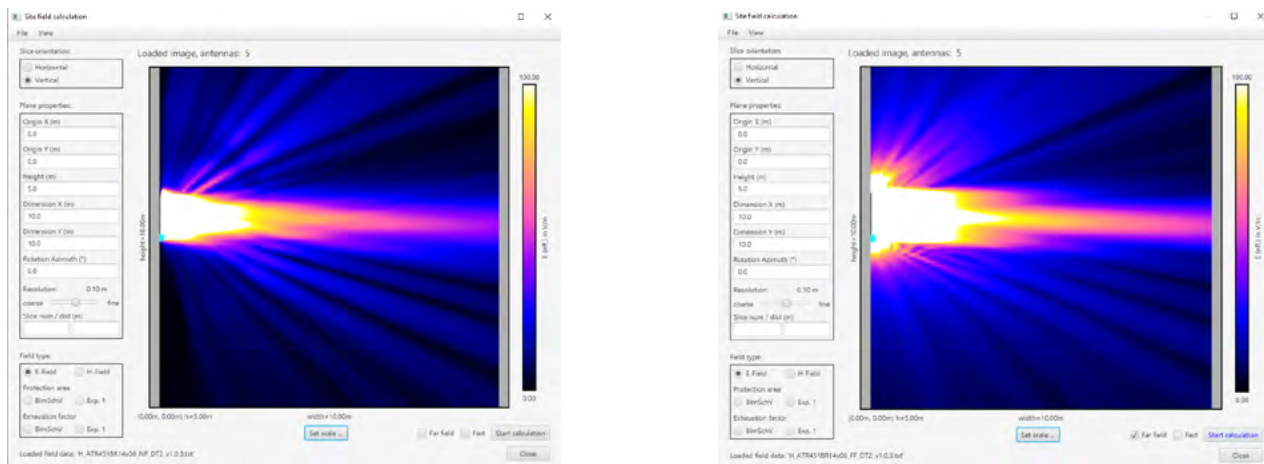
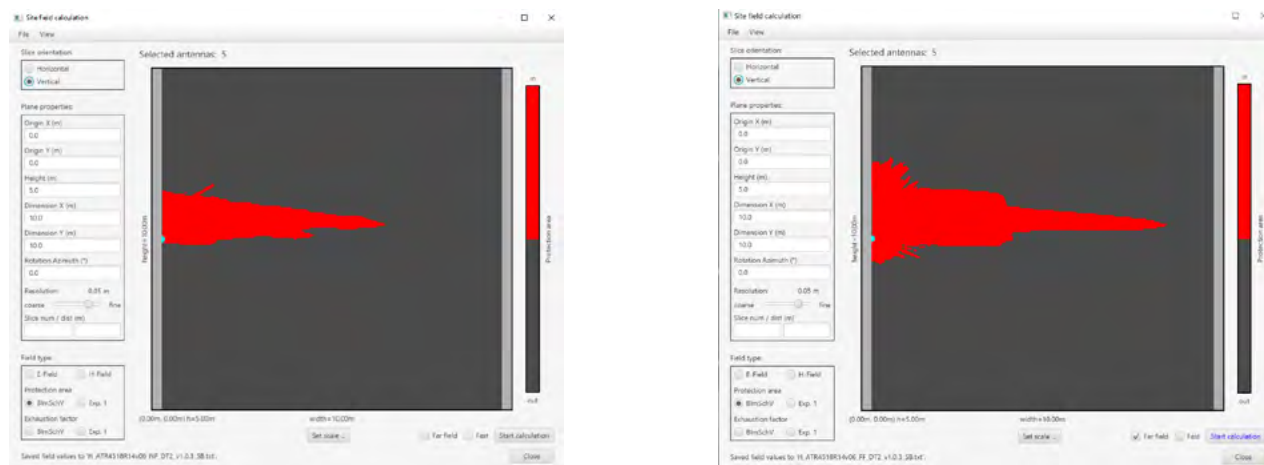


Bild 4b: Berechnete Schutzbereiche im Vertikalschnitt (Huawei ATR4518R14v06) links aus Nahfelddaten, rechts aus Fernfelddaten des Antennenherstellers



Testantenne Commscope HWXXX-6516-DS-VTM

Auch hier ist in Abbildung 5a zu erkennen, dass bei Anwendung der Fernfeldberechnung (rechtes Bild) die Feldstärken im Nahbereich der Antennen etwas größer sind als die Feldstärken, die basierend auf den Nahfelddaten (linkes Bild) berechnet wurden. Entsprechend ergibt sich auch hier ein etwas vergrößerter Schutzbereich in der Umgebung der

Antenne bei Verwendung der Fernfelddaten, wie in Abbildung 5b rechts dargestellt. Bei größerem Abstand, z.B. in der Hauptkeule wirkt, sich dies jedoch weniger aus. Während der Schutzbereich hier bei der Nahfeldberechnung keine Nebenkeule nach unten aufweist, ist bei der Fernfeldnäherung eine Ausdehnung im Bereich der unteren Nebenkeule zu erkennen.

Bild 5a: Berechnete E-Feldstärke im Vertikalschnitt (Commscope HWXXX-6516-DS-VTM) links aus Nahfelddaten, rechts aus Fernfelddaten des Antennenherstellers

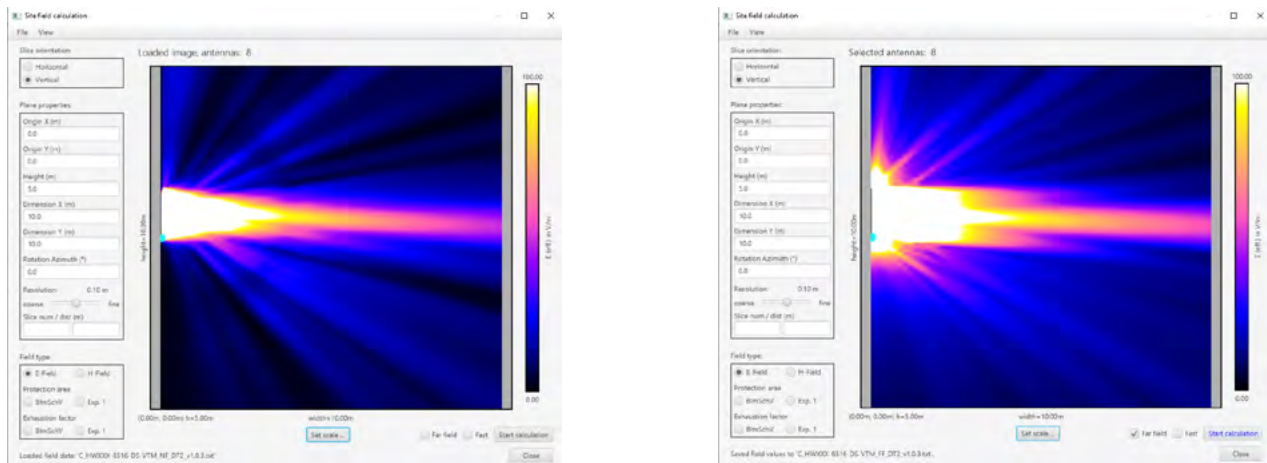
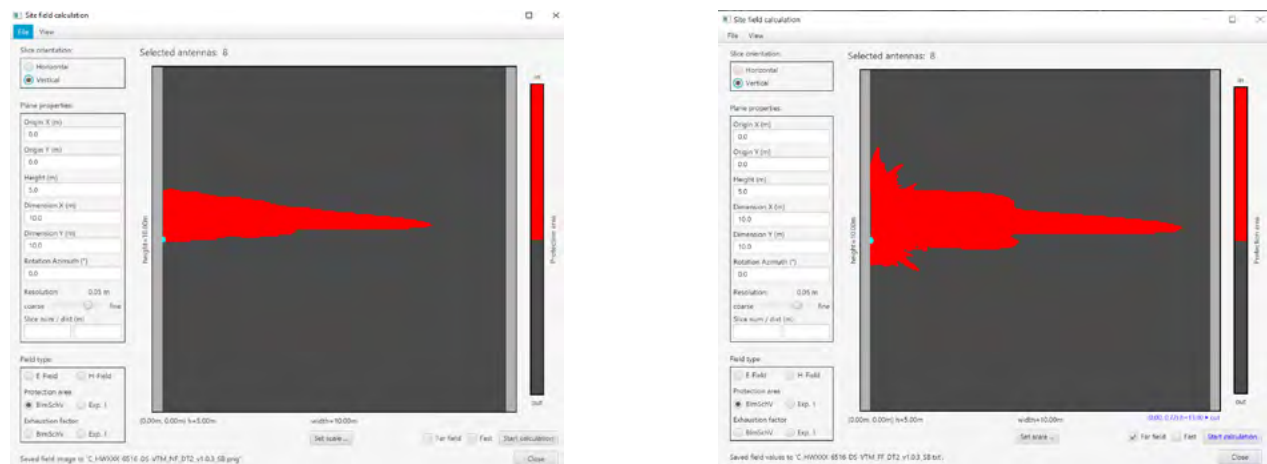


Bild 5b: Berechnete Schutzbereiche im Vertikalschnitt (Commscope HWXXX-6516-DS-VTM) links aus Nahfelddaten, rechts aus Fernfelddaten des Antennenherstellers



Verifikationsmessungen

Zur Verifikation der Berechnungsergebnisse basierend auf den vom Hersteller zur Verfügung stehenden Daten wurden an verschiedenen Testantennen Vergleichsmessungen durchgeführt. Dies erfolgte sowohl in einem Testlabor, bei dem lediglich die Antenne ohne äußere Umgebungseinflüsse vermessen wurde als auch in realen Einsatzbedingung, d.h. an existierenden Standorten. Bei der Messung im Testlabor und auch bei Messungen an realen Funkanlagenstandorten konnte sowohl die Funktionsweise von Wattwächter verifiziert als auch die Höhe des Sicherheitsfaktors abgeleitet werden.

Fazit

Die von der Bundesnetzagentur eingeführte Methodik zur Berechnung des Schutzbereiches einer Mobilfunkantenne basiert auf einem feldtheoretischen Verfahren und erreicht damit eine hohe Genauigkeit und Eindeutigkeit der Berechnung. Damit steht eine Methode zur Verfügung, um das elektromagnetische Feld im Nahbereich der Sendeantenne mit hoher Genauigkeit zu berechnen und daraus den Schutzbereich bzw. den Ausschöpfungsgrad der Exposition abzuleiten.

Das Verfahren funktioniert prinzipiell für beliebige Sendeantennen, ohne dass der Aufbau oder Details der Sendeantenne bekannt sein müssen. Es wird lediglich ein Datensatz mit den Nahfelddaten der Sendeantenne auf einer Hüllfläche (z.B. Kugel) benötigt bzw. die vom Hersteller bereitgestellte Fernfeldrichtcharakteristik und der Gewinn. Es eignet sich damit sowohl für derzeitige als auch zukünftige Antennenformen.

Die vorgestellte Methode hat den Vorteil, dass sie den Schutzbereich in alle Raumrichtungen gleichartig berechnen und darstellen kann. Dies ist insbesondere bei der Überlagerung mehrerer eng beieinanderliegender Antennen von Vorteil.

Diese Methode lässt sich zudem einfacher anwenden und ist nicht darauf angewiesen, einen komplexen Schutzbereich anhand nur einiger weniger Parameter, welche sich in der Regel auch nur auf das Fernfeld beziehen, berechnen zu müssen. Die Bereitstellung des notwendigen Nahfeld-Datensatzes durch den Hersteller garantiert eine unzweideutige Berechnung des Schutzbereiches ohne auf Schätzungen angewiesen zu sein.

**Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas,
Telekommunikation, Post und Eisenbahnen**

Tulpenfeld 4

53113 Bonn

Telefon+49 228 14-0

Telefax +49 228 14-8872

E-Mail: info@bnetza.de

www.bundesnetzagentur.de/emf