

Einfache Antennenmodelle zur Berechnung von Sicherheitsabständen an Small Cells im 5G-Netz

Dr. rer. nat. Karsten Menzel, EMF fx Consulting & Simulation
Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf

1 Übersicht

Mit dem weiteren Ausbau moderner Mobilfunknetze kommen Sendestationen mit kleiner Sendeleistung, sog. "Small Cells", in unmittelbarer Nähe zu den Nutzern zum Einsatz. Der Betreiber muss dabei sicherstellen, dass Menschen in der Nachbarschaft solcher Anlagen keinen Expositionen ausgesetzt werden, die über den zulässigen Grenzwerten [1] liegen. Neben einer messtechnischen Überprüfung, die nur exemplarisch erfolgen kann, stellt der rechnerische Nachweis der Einhaltung der Referenzwerte mit einfachen Antennenmodellen eine effiziente Alternative dar, um die erwarteten großen Stückzahlen von Small Cells in der nächsten Mobilfunkgeneration (5G) bewältigen zu können. In dem Beitrag werden drei Antennenmodelle vorgestellt, von denen zwei Modelle in dieser Form noch keinen Einzug in die Normung [2] gefunden haben. Die Modelle wurden zur Expositionsberechnung an einem Musterstandort verwendet und mit vor Ort durchgeführten Feldstärkemessungen verglichen. Der Musterstandort ist eine öffentliche Telestation in einer Fußgängerzone, in deren Kopf zwei LTE-Antennen (Halbwellendipole) eingebaut sind.

2 Stand der Normung zur Bestimmung der Sicherheitsabstände

Die zu diesem Thema maßgebliche Norm IEC62232 [2] wird weltweit als Referenz für Berechnungs- und Messmethoden verwendet. Hierin sind verschiedene Berechnungsmethoden zur Expositionsermittlung aufgeführt. U.a. ist dort angegeben, wie mittels Fernfelddaten der Antennen eine Expositionsermittlung erfolgen kann. Dieses Modell wird hier als "auf Fernfelddaten basierend" bezeichnet. Des Weiteren wird dort das "Synthetische Modell" erläutert, welches aber abseits der Hauptsenderichtung zu einer Unterschätzung der Exposition führen kann [3]. Um diese Unterschätzung zu beseitigen, wurde ein "optimiertes Synthetisches Modell" entwickelt, welches hier vorgestellt wird. Weitere Berechnungsmethoden der Norm werden nicht betrachtet, da diese entweder für kleine Antennen ungeeignet sind oder der Aufwand für die Anwendung dieser Modelle unverhältnismäßig groß ist.

3 Untersuchungsgegenstand

Die Analyse erfolgt an einem typischen Small Cell-Standort. Dies ist eine Telestation, in deren Kopf (30 cm breit, 22 cm tief) neben zwei WLAN Antennen zusätzlich auch zwei LTE-Antennen in MIMO-Technik installiert sind. Betrachtet wird im Folgenden nur die Abstrahlung der LTE-Antennen. Die vom WLAN-System emittierten Felder können aufgrund der um etwa den Faktor 100 geringeren Sendeleistung vernachlässigt werden.

3.1 LTE-Antennen und Sendeparamter

Bei den Antennen handelt es sich um den Typ K80010431 der Firma Kathrein. Dies sind 115 mm lange Antennen für den Frequenzbereich 1710 MHz bis 2700 MHz. Der Antennengewinn entspricht mit 2 dBi in etwa dem eines Halbwellendipols. Laut Angaben des Antennenherstellers handelt es sich bei der Antenne um einen Dipolstrahler, der am Fuß und am Kopf jeweils einen Topfkreis besitzt. Da Topfkreise üblicherweise eine Länge von einem Viertel der Wellenlänge haben, ergibt sich der Antennenaufbau in etwa gemäß Bild 1.

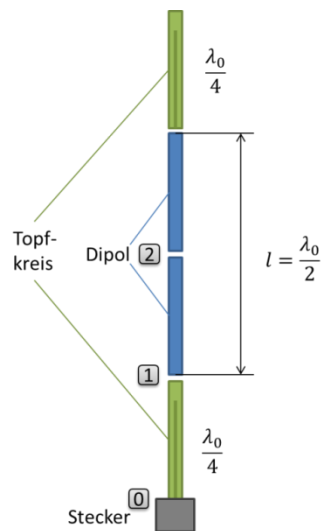


Bild 1: Aufbau der Antenne K80010431 bestehend aus einem Halbwellendipol und zwei Topfkreisen.

Die Abstrahlung erfolgt aus zwei baugleichen Antennen dieses Typs im Abstand von 23,7 cm. Jede Antenne wird mit 35 dBm abzüglich der Kabelverluste von 0,8 dB gespeist. Damit ergibt sich eine Antenneneingangsleistung von ca. 2,63 W bzw. eine EIRP von 4,17 W pro Antenne. Die räumliche Ausdehnung der aktiven Antennenteile ist etwa $\lambda/2$, woraus sich als Übergang zwischen strahlendem und reaktivem Nahfeld ein Abstand zwischen $\lambda/2$ und $\lambda/6$ und zwischen Nah- und Fernfeld von 2λ ergibt [4]. Damit lässt sich bei einer Betriebsfrequenz von 2,65 GHz ab einem Abstand von ca. 5 cm zur Antenne mit einem Feldwellenwiderstand von 377Ω und ab etwa 22 cm in Hauptsendrichtung mit Fernfeldbedingungen rechnen.

3.2 Messungen

Um einen Eindruck bezüglich der Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit der realen Feldverteilung in der Umgebung der Telestation zu erhalten, wurden an zwei baugleichen Telestationen Feldstärkemessungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten codeselektiv mit einem Feldanalysator (SRM-3006 von Narda STS), so dass die für den Vergleich zwischen Berechnung und Messung notwendige Hochrechnung der Messergebnisse auf die bei maximaler Anlagenauslastung (d.h. maximaler Sendeleistung) herrschenden Feldstärkewerte verlässlich möglich wird. Die Ergebnisse der Messungen werden in Kapitel 6 vorgestellt und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

4 Modelle zur Beschreibung des Antennenfeldes

Folgende drei Modellansätze wurden zur Analyse des Antennenfeldes betrachtet:

4.1 Modell auf Grundlage der Fernfelddaten des Herstellers

Die Antennenhersteller liefern typischerweise für verschiedene Frequenzen das horizontale und das vertikale Antennendiagramm. Bild 2 zeigt das originale vertikale Diagramm in Blau und zusätzlich in Rot das an der vertikalen Achse gespiegelte Vertikaldiagramm. Da sich theoretisch ein vom Azimut unabhängiges Diagramm ergeben müsste, vermittelt Bild 2 einen Eindruck über baulich bedingte Abweichungen und auftretende Messfehler. In der unteren Halbebene (und diese ist im Wesentlichen relevant für die Sicherheitsabstände) ergeben sich Abweichungen zwischen beiden Diagrammen von bis zu 1,5 dB. Eine erste einfache Abschätzung über den Sicherheitsabstand liefert Gl. (1) unter der Annahme, dass beide Antennen in einem Punkt vereint wären.

$$r_{\text{lim}} = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{E_{\text{lim}}} = \frac{\sqrt{30 \cdot \text{EIRP}}}{E_{\text{lim}}} \quad (1)$$

Mit dem für die Betriebsfrequenz anzuwendenden Grenzwert $E_{\text{lim}}(f = 2,6 \text{ GHz}) = 61 \text{ V/m}$ ergibt sich bei der EIRP der Anlage von 8,34 W ein Sicherheitsabstand von 25,9 cm in Hauptsenderichtung. In einem Winkel von 45° nach unten zeigt Bild 2 Werte des Antennengewinns, die um etwa 3 dB gegenüber der Hauptsenderichtung reduziert sind. Daraus folgt, dass in diese Richtung der Sicherheitsabstand etwa um den Faktor 1,41 geringer ausfällt, woraus sich ein Sicherheitsabstand von 18,3 cm bezogen auf die Antennenmitte bzw. einen vertikalen Sicherheitsabstand von 13 cm bezogen auf den Antennenfuß ergeben würde. Daraus könnten sich für die Praxis unnötige Einschränkungen für die Montagehöhe der Antennen ergeben. Deshalb ist eine dezidierte Betrachtung notwendig, bei der das Feld jeder einzelnen Antenne und deren räumliche Anordnung betrachtet werden. Wird das Fernfelddiagramm als Ausgangspunkt verwendet, ist der Bezugspunkt, auf den sich das Diagramm bezieht, wichtig.

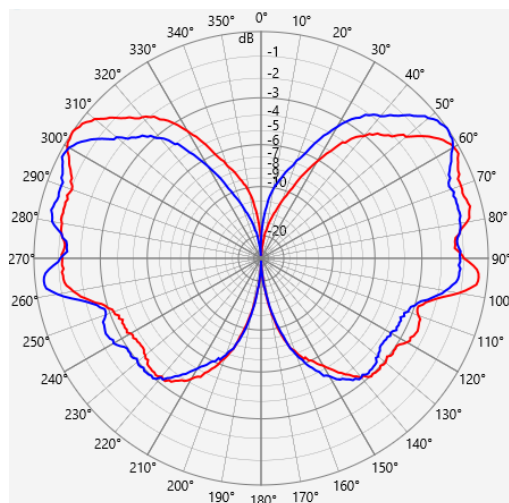


Bild 2: Vertikaldiagramm im Fernbereich der Antenne bei 2600 MHz. Blau: Messdaten des Herstellers. Rot: an der vertikalen Achse gespiegelten Messdaten.

Im Folgenden wird die Dipolmitte als Bezugspunkt für das Modell "auf Fernfelddaten basierend" gewählt. Beim Einsatz dieses Modells in der Praxis (Referenzpunkt sollte unterhalb der Antenne liegen) müsste dieser Sachverhalt durch einen entsprechenden Aufschlag im Sicherheitsabstand in vertikaler Richtung berücksichtigt werden.

4.2 Optimiertes synthetisches Modell

Beim "Synthetischen Modell" (siehe Kap. B.4.4.1 in [2]) wird vereinfachend die Antenne als ein Vektor aus Punktstrahlern angenommen. Eine phasenrichtige Summation liefert dann die elektrische Feldstärke im Raum. Das Modell wurde folgendermaßen optimiert: Um eine omnidirektionale Antenne nachzubilden, erhalten die einzelnen Punktstrahler in horizontaler Richtung eine Kreischarakteristik (d.h. keine Azimutabhängigkeit der Abstrahlung) und in vertikaler Richtung eine Charakteristik, die einer Gaußfunktion mit einer Halbwertbreite von 3° bis 60° folgt. Die Parameter Amplitude, Phase und vertikaler Öffnungswinkel werden mit einem Non-Linear-Least-Square-Fitting so optimiert, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Fernfelddaten des Herstellers ergibt. Bild 3 zeigt den Vergleich zwischen Fernfelddaten des Herstellers und den mittels des optimierten synthetischen Modells errechneten Fernfelddaten. Die Abweichung zwischen gemessenem Fernfelddiagramm und dem mit diesem Modell berechneten Diagramm beträgt maximal etwa 1 dB und ist damit kleiner als die Asymmetrie des gemessenen Diagramms.

Dieses Modell würde es auch ermöglichen, mittels Ray-Tracing die Abschirmung bzw. Reflexionen durch den Gehäusedeckel der Telestation, auf dem die Antennen montiert sind, zu berücksichtigen. Jedoch besteht der Deckel aus verschiedenen Erhebungen und Kanten, so dass eine genaue Modellierung sehr aufwendig ist. Da der erwartete Einfluss des Deckels vermutlich nicht sehr groß ist, wurde er vernachlässigt.

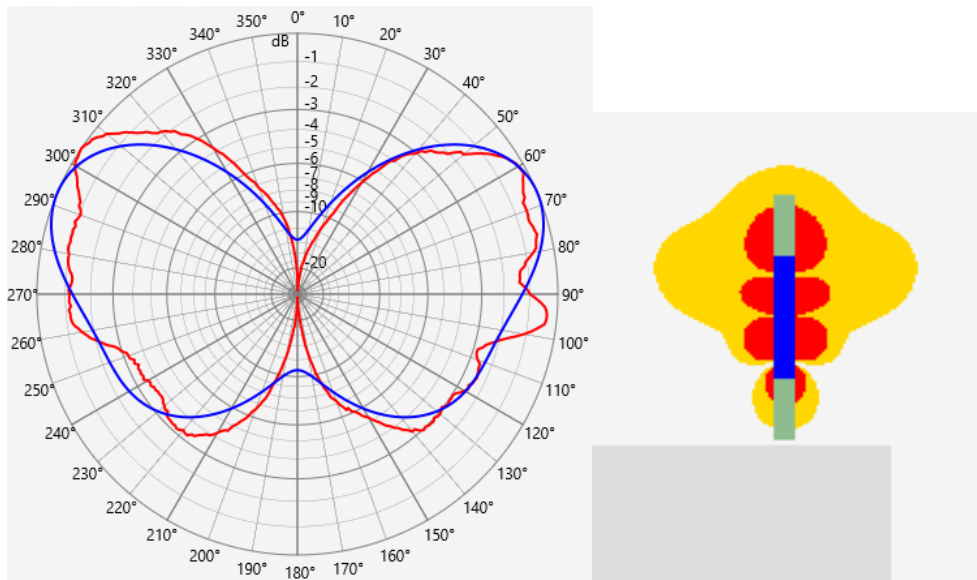


Bild 3: Links: Vergleich der Fernfelddaten des Herstellers (rot) und der Fernfelddaten mittels des optimierten synthetischen Modells (blau) bestehend aus 4 Einzelstrahlern mit einer Gesamthöhe von 54 mm. Rechts: Zur Illustration der Leistungsverteilung wird der Halbwellendipol mit 1 W Leistung in der Seitenansicht gezeigt (Rot: Grenzwertüberschreitung für berufliche Exposition, Gelb: Grenzwertüberschreitung für die Allgemeinbevölkerung).

4.3 Arraymodell aus Hertzschen Dipolen

Mobilfunkantennen können auch als ein 3D-Array von Hertzschen Dipolen nachgebildet werden. Dieses Modell wurde mit einem 1x1x6-Array auch zur Nachbildung des vorliegenden Halbwellendipols verwendet, für den eine sinusförmige Amplitudenverteilung zu wählen ist (aus der Literatur ist dies umfänglich bekannt [4]). Damit ergibt sich die gewünschte Halbwertsbreite von 78° und der Gewinn von etwas über 2 dB. Bild 4 zeigt im Vergleich mit den Herstellerdaten, dass das Arraymodell zu einer deutlich verschiedenen Richtcharakteristik gegenüber den Messdaten führt. Die Abweichungen in der unteren Halbebene erreichen 6 dB und sind im Vergleich mit dem gemessenen Diagramm im Fernfeld deutlich größer als mit dem Modell aus Abschnitt 4.2.

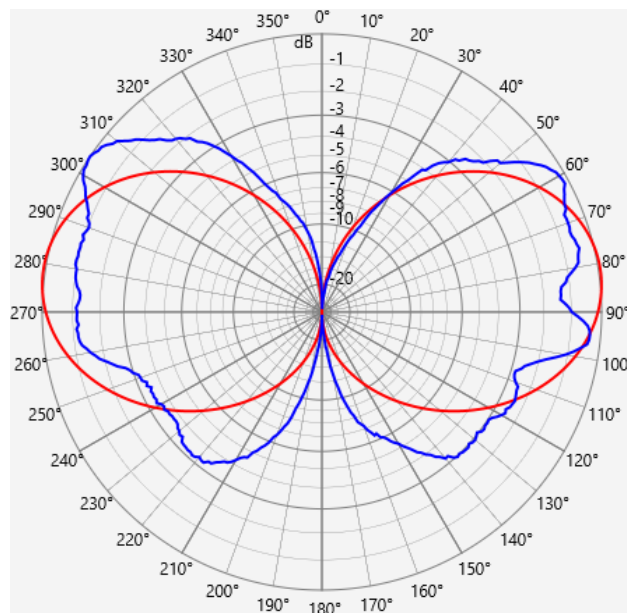


Bild 4: Vertikales Richtdiagramm des 1x1x6-Array aus Hertzschen Dipolen mit kleinem Phasenshift zum Uptilt (rot) im Vergleich mit dem Fernfelddaten des Herstellers (blau). Die Dipole bilden eine Gesamthöhe von 5 cm (ohne die äußeren Dipole mit Amplitude 0), so dass sich ein vertikaler Öffnungswinkel von 78° ergibt.

5 Anwendung der drei Modelle auf die Telestation

Zur Bestimmung der räumlichen Bereiche, in denen die Referenzwerte nicht mehr eingehalten werden, wurden gemäß der Normung die von den beiden Antennen abgestrahlten elektrischen Feldstärken quadratisch summiert und auf den Grenzwert bezogen. Ist die so ermittelte Summe in einem Raumpunkt größer 1 wird dort der Referenzwert nicht mehr eingehalten. In Bild 5 wird beispielhaft in zwei Schnitten (jeweils durch den Mittelpunkt der Telestation) in Front- und Seitenansicht die Modellierung mit dem optimierten synthetischen Modell gezeigt. Dabei sind die Bereiche Orange gekennzeichnet, bei denen der Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung überschritten wird. In Rot wurden die Bereiche gekennzeichnet, für die der Grenzwert für berufliche Exposition überschritten wird. Zusätzlich ist in Gelb gekennzeichnet, wo der Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung bei einer zusätzlich vorhandenen Hintergrundimmission mit einer

Grenzwertausschöpfung von 20% nicht eingehalten wird. Messungen zeigen regelmäßig, dass die Umgebungsfelder typischerweise den Grenzwert mit weniger als 15% ausschöpfen. In Einzelfällen treten auch etwas größere Umgebungsfelder auf, so dass die angenommenen 20% ein konservativer Ansatz sind. In Bild 5 sind die Positionen mit X markiert, bei denen die Messungen durchgeführt wurden.

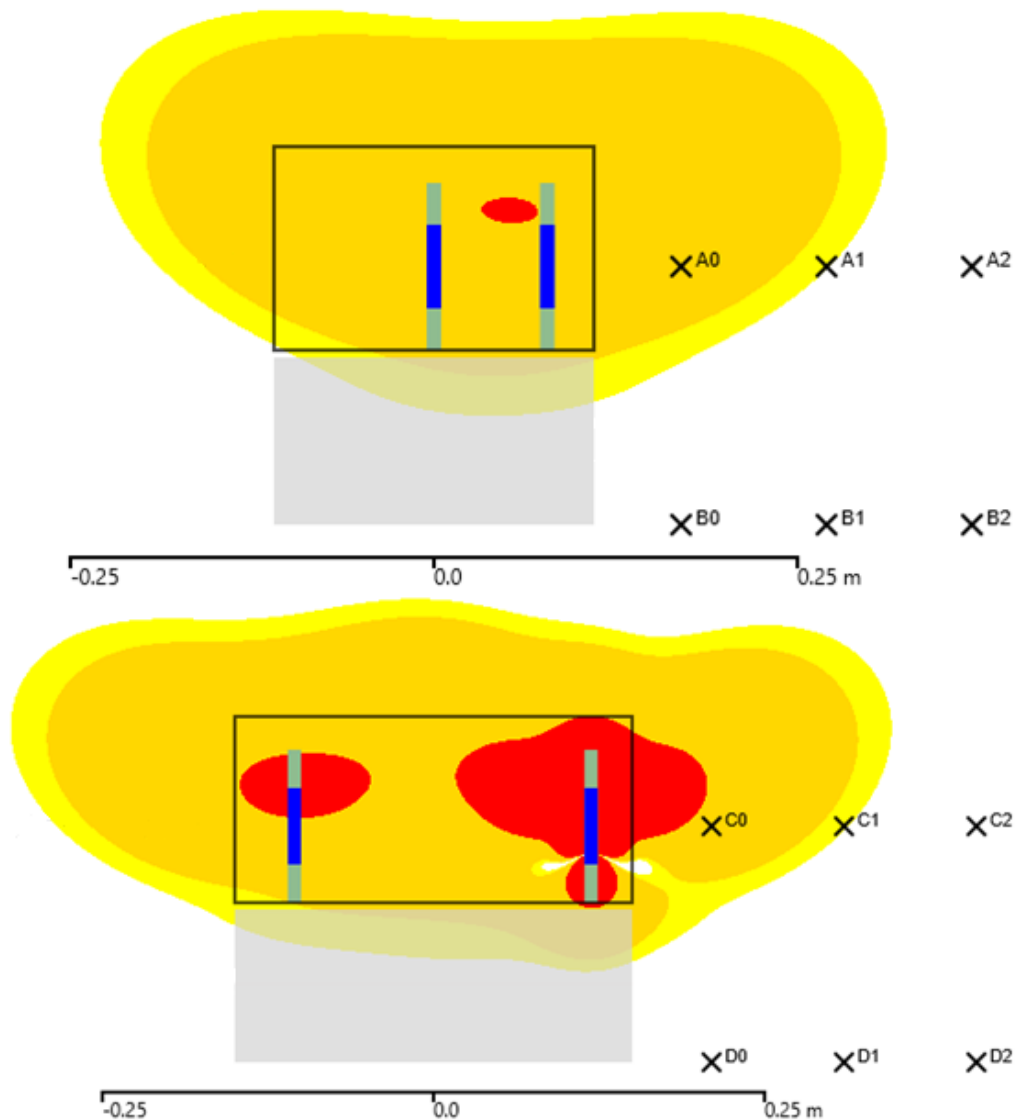


Bild 5: Oben Seitenansicht, unten Frontansicht des Kopfbereichs der Telestation mit den berechneten Feldern mittels des optimierten synthetischen Modells. In Grün-Blau sind die beiden LTE-Antennen eingezeichnet. Rot illustriert ist die Überschreitung des Grenzwertes bei beruflicher Exposition. Orange illustriert die Überschreitung des Grenzwertes für die Allgemeinbevölkerung (Gelb mit zusätzlich vorhandenen Umgebungsfeldern in Höhe von 20%). Der Ursprung des Koordinatensystems liegt genau in der Mitte des Kopfbereichs der Telestation.

6 Ergebnisse

Die Tabelle 1 zeigt an jeweils den drei nächsten Punkten zu den betrachteten Small Cell-Standorten den Vergleich zwischen Messergebnissen und berechneten Werten. Die größten Abweichungen ergeben sich in der Ebene C beim Abstand 0 von bis zu 11 dB. An allen anderen Vergleichspunkten ergeben sich Abweichungen von unter 4 dB. Damit

liegen diese im Bereich von typischen Messfehlern. Die größeren Abweichungen in der Ebene C bei kleinem Abstand sind erwartungsgemäß, da der Feldgradient im Vergleich mit den anderen Punkten am größten ist und die Berechnung punktgenau erfolgt, während bei der Messung über einen größeren Raumbereich integriert wird.

Tabelle 1: Vergleich der Messdaten von zwei Standorten (Standort 1 und Standort 2) mit den berechneten Punkten senkrecht zum Gehäuse in den Ebenen A, B und C. Die Werte geben den Prozentsatz bezogen auf den Grenzwert an. Rot markiert sind Werte über 100%, was einer Grenzwertüberschreitung entspricht. Die Entfernungsangaben beziehen sich auf die Oberfläche des Gehäuses der Telestation.

Ebene	Nr.	Entfernung	Messwert Standort 1	Messwert Standort 2	Fernfelddaten	Synth. Model	Array aus Hertzischen Dipolen
A	0	0,06 m	156,2	111,9	234	205	223
A	1	0,16 m	87,9	72,2	108	101	110
A	2	0,26 m	78,3	47,2	66	63	68
B	0	0,06 m	48,3	52,3	61	55	37
B	1	0,16 m	65,9	60,8	46	49	39
B	2	0,26 m	55,4	54,8	37	41	37
C	0	0,06 m	100,9	103,2	381	332	347
C	1	0,16 m	74,8	69,0	112	103	111
C	2	0,26 m	63,6	49,4	63	59	63
D	0	0,06 m	47,2	62,9	75	48	34
D	1	0,16 m	33,8	58,0	55	46	37
D	2	0,26 m	30,1	58,0	42	39	35

7 Diskussion und Ausblick

Die hier vorgestellten einfachen Rechenmodelle zur Beschreibung der elektrischen Feldstärke eines einfachen Halbwellendipols sind grundsätzlich geeignet, eine Bewertung über die Einhaltung der Grenzabstände durchzuführen. Es zeigt sich, dass im vorliegenden Fall das optimierte synthetische Modell die besten Ergebnisse liefert. Dieses Modell gibt die Fernfelddaten der Antenne sehr gut wieder, beschreibt aber auch im Nahbereich das Feld der Antenne erwartungsgemäß. Ebenso zeigt dieses Modell die beste Übereinstimmung mit den Messdaten (Mittelwert über die Abweichungen zwischen allen Mess- und Berechnungspunkten: Optimiertes Synthetisches Modell: 2,5 dB; Hertzsche Dipole: 2,8 dB; Fernfeldmodell: 3,1 dB).

Gegenüber Messungen haben Berechnungen, wie im vorliegenden Fall, den Vorteil, dass eine umfassende Bewertung in alle Richtungen möglich ist, was in der Praxis bei Messungen aufgrund von räumlichen Gegebenheiten nicht immer gegeben ist. So er-

folgten die Messungen beispielsweise aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit der Stationen nicht in allen vier seitlichen Richtungen. Aufgrund der unsymmetrischen Anordnung der Antennen im Kopf der Telestation ist jedoch mit unterschiedlichen Feldstärkewerten in den einzelnen Richtungen zu rechnen. Somit kann der Fall auftreten, dass bei Messungen nicht immer der Worst-Case-Fall betrachtet wird. Die Berechnungen hingegen erfassen sehr einfach den ganzen Raum.

Ebenso kann die Berechnung an andere Umfeldexpositionen angepasst werden. Damit ist eine Übertragung auf andere Standorte sehr einfach möglich.

Die Berechnungen mit allen drei Modellen liefern in horizontaler Richtung in guter Übereinstimmung Sicherheitsabstände von bis zu 18 cm zum Gehäuse der Telestation. In vertikaler Richtung ergeben sich je nach verwendetem Modell Sicherheitsabstände von 2 bis 7 cm zur Höhe des Antennenfußpunktes. Alle drei Modelle sind also grundsätzlich geeignet, die Sicherheitsbereiche ausreichend konservativ zu berechnen.

Insbesondere mit dem optimierten synthetischen Modell steht ein Werkzeug zur Verfügung mit dem eine Expositionsbewertung von verschiedensten Small Cells gerade im Hinblick auf das zukünftigen 5G-Netz erfolgen kann.

Literatur

- [1] ICNIRP Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics, vol. 74 no. 4, S. 494-522, 1998
- [2] IEC 62232 (2011): Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radio communication base stations for the purpose of evaluating human exposure; 2011
- [3] Menzel, K.: Calculation of the exclusion zones for workers and the public at radio base station antennas. A comparison between the novel NF-Huygens approach and the Vector Point Source method. Proceedings of the BioEM2016; Abstract Collection; Page 237-240; 2016
- [4] Kark, K.: Antennen und Strahlungsfelder; Vieweg; 2.Auflage; 2004