

## FORSCHUNG

Stefan Cecil, Georg Neubauer

# UNTERSUCHUNG DER SICHERHEITSABSTÄNDE VON LTE-BASISSTATIONEN



Um die Sicherheit von Personen in der unmittelbaren Umgebung von Basisstationen zu gewährleisten, müssen Sicherheitsabstände definiert werden. Dies ist z. B. für Arbeiten an den Stationen oder auf dem Dach vor einer Station wichtig. Im Frequenzbereich der Mobilkommunikation wird der Grenzwert durch die Leistungsaufnahme des menschlichen Körpers im elektromagnetischen Feld definiert, die als „Spezifische Absorptionsrate“ (SAR) mit der Einheit Watt pro Kilogramm angegeben wird (Basisgrenzwert). Die Grenzwerte dafür sind von der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) festgelegt.

Üblicherweise wird die Einhaltung der SAR-Grenzwerte durch die Einhaltung der sogenannten Referenzwerte gewährleistet. Diese Referenzwerte sind Werte für das elektrische oder magnetische Feld, bei deren Einhaltung sichergestellt ist, dass auch die Basisgrenzwerte eingehalten werden. Die Referenzwerte werden an der zu untersuchenden Position ohne Einfluss des menschlichen Körpers gemessen. Die Korrelation zwischen den Referenzwerten und den Basisgrenzwerten unterliegt jedoch einer großen Schwankungsbreite. Besonders bei sehr inhomogenen Feldverteilungen, wie in unmittelbarer Nähe von Basisstationen, könnte die Festlegung eines Sicherheitsabstandes

auf Basis der Referenzwerte sehr große Distanzen ergeben. Deswegen werden hier direkt die SAR-Basisgrenzwerte für die Bewertung herangezogen. Diese können aber nur mittels numerischer Simulationen bestimmt werden. Für die Bestimmung von SAR-Werten im Inneren des Körpers verwendet man numerische Modelle, also Computermodelle des Menschen und der Basisstationen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden für die numerischen Simulationen das FDTD-Simulationswerkzeug SEMCAD<sup>1</sup> (FDTD = Finite Differences in Time Domain) und als Körpermodelle die numerischen Modelle der „Virtual Family“<sup>2</sup> verwendet. Die Modelle der Basisstationen wurden für die Simulationen erstellt, wobei die für Mobilfunk in diesem Frequenzbereich typischen Sektorantennen verwendet wurden.

Für die Einhaltung der Sicherheitsabstände durch Monteure auf den Basisstationen wurde vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften in der Regel BGR B11<sup>3</sup> eine vereinfachte Richtlinie definiert. Die darin angegebenen

<sup>1</sup> SEMCAD X von SPEAG, Schmid Engineering & Partner AG; [www.speag.com](http://www.speag.com)

<sup>2</sup> Virtual Family, 4 Körpermodelle von IT'IS Foundation, Zürich Switzerland <http://www.itis.ethz.ch>

<sup>3</sup> <http://www.systonemv.de/NISV/BGR-B11.pdf>

Werte basieren auf den Erkenntnissen aus wissenschaftlichen Studien. Aufgrund der Ergebnisse dieser Studien kann angenommen werden, dass die Sicherheitsabstände bei Basisstationen nahezu unabhängig von der Frequenz und dem vertikalen Öffnungswinkel des Hauptstrahles sind. Aufgrund dieser Tatsache gehen für die Festlegung des Sicherheitsabstandes in BGR B11 nur der horizontale Öffnungswinkel und die Sendeleistung ein. Die vereinfachte Richtlinie gibt für vier verschiedene Abstände und einen Öffnungswinkel größer oder kleiner als 60° die maximal erlaubte Sendeleistung in Watt (W) an.

	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm
Horizontaler Öffnungswinkel $\geq 60^\circ$	70 W	120 W	180 W	250 W
Horizontaler Öffnungswinkel $< 60^\circ$	40 W	60 W	80 W	100 W

Definition der Sicherheitsabstände für Monteure von Basisstationen laut BGR B11

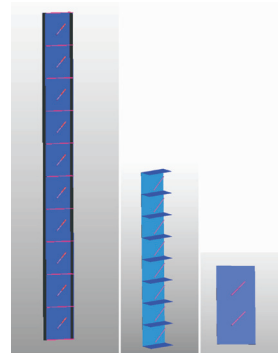
Die angegebenen Werte gelten für die Hauptstrahlrichtung der Basisstation, abseits der Hauptstrahlrichtung sinkt die Exposition sehr schnell. Deshalb sind in der BGR B11 die Sicherheitsabstände außerhalb der Hauptstrahlrichtung auf den halben Wert wie in der Hauptstrahlrichtung reduziert. Für die Definition dieser Sicherheitsabstände wurden die typischen Mobilfunkfrequenzen von GSM (900 MHz, 1800 MHz) und UMTS (2140 MHz) herangezogen. Es wird im Moment allerdings auch der neue Mobilfunkstandard LTE (Long Term Evolution) implementiert, der im Frequenzbereich um 2600 MHz arbeitet. Es gibt aber auch Pläne, den LTE-Standard im Frequenzbereich von 700 MHz einzusetzen, da diese Frequenzbänder durch die Digitalisierung des Fernsehens für den Mobilfunk frei geworden sind (Digitale Dividende). In dieser Untersuchung wurde die Tauglichkeit der bestehenden Sicherheitsabstandsregeln der BGR B11 für die Frequenzen 700 MHz und 2600 MHz untersucht.

FREQUENZ (MHZ)	HORIZONTALER ÖFFNUNGSWINKEL	DIPOL-AUSRICHTUNG	ANZAHL DIPOLE
700	60°	kreuzpolarisiert	10
700	90°	kreuzpolarisiert	8
700	120°	kreuzpolarisiert	2
900	60°	kreuzpolarisiert	10
2100	60°	kreuzpolarisiert	10
2600	60°	kreuzpolarisiert	10
2600	90°	kreuzpolarisiert	8
2600	120°	kreuzpolarisiert	2

Modellierte Antennen für die Simulation der Exposition der Körpermodelle

## Numerische Simulationen

Bei Mobilfunkbasisstationen sind kreuzpolarisierte Antennen sehr verbreitet. Aus diesem Grund wurden für die Frequenzen von 700 MHz und 2600 MHz kreuzpolarisierte Dipol-Antennen modelliert, die einen horizontalen Öffnungswinkel von 60°, 90°

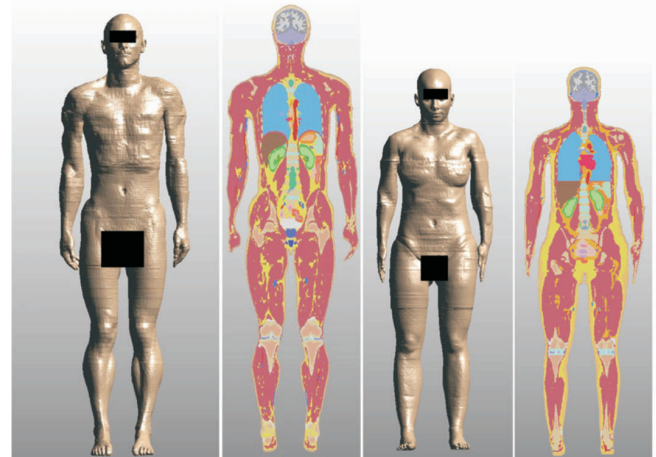


Antennenmodelle für die numerische Simulation mit verschiedener Anzahl von Dipolen

und 120° aufweisen. Um auch einen Vergleich mit den etablierten Frequenzen (GSM und UMTS) zu erhalten, wurden auch Antennen für 900 und 2100 MHz modelliert und in den Simulationen verwendet. Der zweite Dipol der kreuzpolarisierten Antenne blieb unberücksichtigt, da dieser im rechten Winkel zum anderen Dipol steht und somit einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Eigenschaften der Antenne hat.

Für die Simulationen des menschlichen Körpers wurden ein weibliches und ein männliches Körpermodell aus der „Virtual Family“ verwendet.

- „Ella“ (weiblich, 26 Jahre, 1,53 m, 48 kg)
- „Duke“ (männlich, 34 Jahre, 1,74 m, 70 kg)



Körpermodelle Duke (männlich, 34 Jahre, 70 kg) und Ella (weiblich, 26 Jahre, 1,53 m, 48 kg) für die numerische Simulation (aus der „Virtual Family“)

Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass Personen mit geringerem Gewicht eine höhere Ganzkörper-SAR aufweisen. Deshalb wurde das weibliche Körpermodell „Ella“ auf ein Gewicht von 48 kg skaliert, um in Hinsicht auf die Exposition einen „worst case“ zu erhalten.

Die Körpermodelle sind heterogen und bestehen aus ca. 85 verschiedenen Gewebetypen, welchen basierend auf den Gewebe-

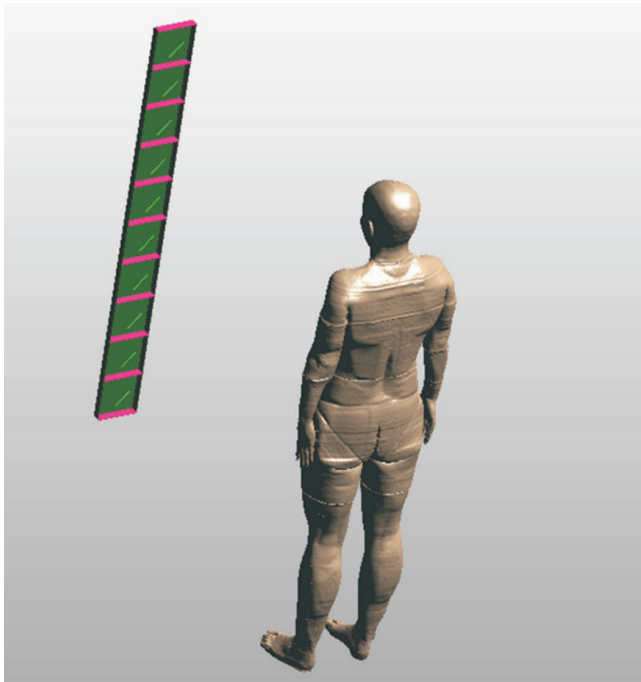
eigenschaftsdaten von C. Gabriel<sup>4</sup> die entsprechenden dielektrischen Eigenschaften zugeordnet wurden.

Aus den Ergebnissen der Simulation werden die entsprechenden SAR-Werte extrahiert. Dabei unterscheiden die ICNIRP-Basisgrenzwerte (Arbeitsschutz) zwischen drei verschiedenen SAR-Werten:

- SAR gemittelt über den gesamten Körper: 0,4 W/kg
- Maximum 10g-gemittelte SAR in Kopf und Rumpf: 10 W/kg
- Maximum 10g-gemittelte SAR in Gliedmaßen 20: W/kg

Diese drei Werte werden aus der Simulation extrahiert und jeweils mit den Basisgrenzwerten verglichen. Die Exposition ist nur dann konform, wenn keiner der drei Grenzwerte überschritten wird.

Mit den vorhandenen Antennen und Körpermodellen wurden zehn verschiedene Expositionsszenarien in jeweils vier verschiedenen Abständen (500 mm, 1000 mm, 1500 mm, 3000 mm) zwischen Körpermodell und Antenne berechnet.



Simulationsszenario Körpermodell „Ella“ gegenüber einer 2600 MHz-Antenne mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 60° mit 10 Dipolen

## Ergebnisse der Untersuchungen

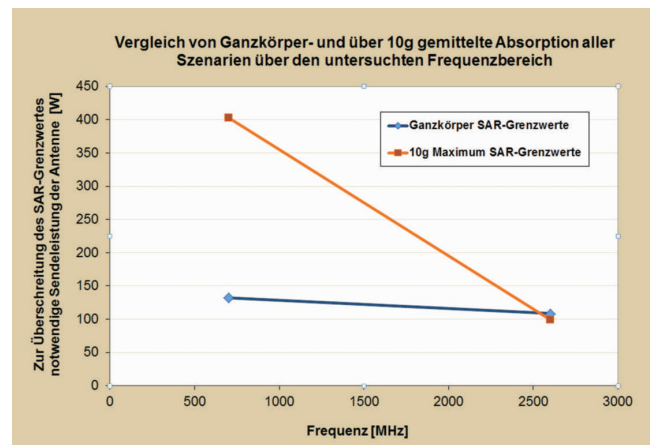
Die Ergebnisse der Simulationen zeigten wie erwartet, dass die 10g-Maximum-SAR bei höheren Frequenzen immer weiter ansteigt, während die SAR gemittelt über den ganzen Körper nahezu frequenzunabhängig ist. Die 10g-SAR steigt mit der Frequenz aufgrund der immer kleiner werdenden Eindringtiefe der

elektromagnetischen Felder. Die vom Körper aufgenommene Energie bleibt aber bei allen Frequenzen ungefähr gleich, wird jedoch bei steigender Frequenz in einer immer dünner werdenden Schicht auf der der Antenne zugewandten Körperseite konzentriert.

Die maximalen 10g-SAR-Werte treten bei den Körpermodellen immer an exponiert liegenden Stellen wie z.B. den Fingerspitzen auf. Aufgrund dessen ist auch die Haltung der exponierten Körpermodelle entscheidend, da eine andere Haltung z.B. der Hände einen anderen Wert der 10g-SAR bewirken kann. Die Größe und das Gewicht der Körpermodelle haben keinen Einfluss auf die 10g-SAR.

Bei der Ganzkörper-SAR sind das Gewicht und die Größe des Körpermodells wichtig, da, wie in der Literatur schon beschrieben, die Ganzkörper-SAR bei kleineren Modellen höher ist. Dies liegt daran, dass (1) bei Verkleinerung der Körpermodelle die aufgenommene Energie nicht so schnell abnimmt wie das Gewicht des Körpermodells und (2) die Ganzkörper-SAR der Quotient aus aufgenommener Energie und dem Gewicht des Körpermodells ist. In allen berechneten Szenarien ist daher die Ganzkörper-SAR von „Ella“ (48 kg) zwischen 20% und 40% höher als beim Modell „Duke“ (70 kg).

In folgender Abbildung werden die SAR-Werte als Sendeleistung dargestellt, welche notwendig ist um den entsprechenden SAR-Basisgrenzwert zu erreichen.



Verlauf der Sendeleistung der Basisstation für das Erreichen der Grenzwerte der Ganzkörper-SAR und der 10g-Maximum-SAR über der Frequenz. Für diese Darstellung wurden alle Szenarien gemittelt.

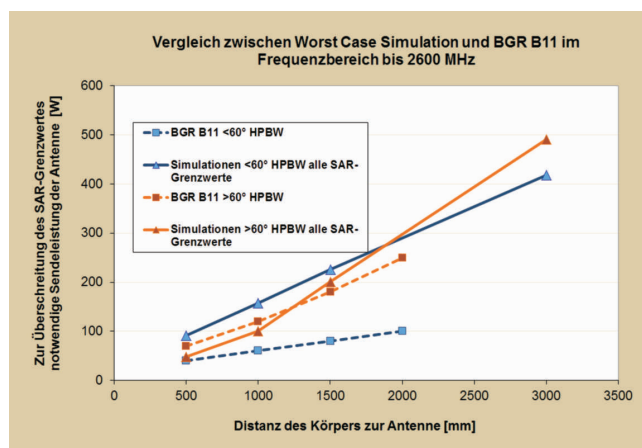
Vergleicht man die simulierten SAR-Werte bei den verschiedenen Frequenzen mit den Basisgrenzwerten (s. nächste Seite), so kann festgestellt werden, dass bis zur UMTS-Frequenz (2100 MHz) in allen Fällen die Ganzkörper-SAR dem entsprechenden Grenzwert am nächsten kommt und somit die erlaubte Sendeleistung bzw. den erlaubten Sicherheitsabstand definiert. Erst bei der LTE-Frequenz von 2600 MHz ist die 10g-SAR in einigen Szenarien näher beim Grenzwert als die Ganzkörper-SAR

<sup>4</sup> "Dielectric properties of body tissues in the frequency range of 10 Hz to 300 GHz" based on the data of C. Gabriel available at <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>

und definiert somit den erforderlichen Sicherheitsabstand. Dieser Effekt tritt bei 2600 MHz allerdings nur bei Distanzen von unter 1000 mm auf, bei größerem Abstand zwischen Körpermodell und Antenne ist wiederum die Ganzkörper-SAR näher am Basisgrenzwert als die 10g-SAR.

Bei höheren Frequenzen (>3 GHz) wird die 10g-SAR weiter ansteigen und den notwendigen Sicherheitsabstand definieren. In diesem Frequenzbereich müsste für eine Regelung der Sicherheitsabstände die Frequenz in die Berechnung mit eingehen.

Im folgenden Diagramm werden die simulierten SAR-Werte mit den Werten der Abstandsrichtlinien aus BGR B11 verglichen. Da die Richtlinie frequenzunabhängig ist und auch für alle Modelle gilt, wird für jeden Abstand der ungünstigste Fall herangezogen, wobei jeweils zwischen einem Öffnungswinkel von größer und kleiner 60° unterschieden wird.



Vergleich der erlaubten Sendeleistung der Basisstationen in der Richtlinie in BGR B11 mit den Ergebnissen der Simulationen. Bei Distanzen von 500 und 1000 mm und einem Öffnungswinkel von >60° kommt es zu einer Überschreitung der Basisgrenzwerte bei der erlaubten Sendeleistung.

Für Öffnungswinkel von kleiner 60° liegen die errechneten SAR-Werte immer unter bzw. die zur Überschreitung der Grenzwerte notwendige Sendeleistung über den Werten aus der Richtlinie in BGR B11. Für Basisstationen mit Öffnungswinkel <60° sind die angegebenen Werte der Richtlinie also für alle Frequenzen und Szenarien ausreichend.

Für Öffnungswinkel >60° werden in einigen Szenarien bereits mit kleinerer Sendeleistung als in der Richtlinie angegeben die SAR-Basisgrenzwerte erreicht. Das heißt, dass für diese Basisstationen die vorgegebenen Werte der Richtlinie nicht mehr die Einhaltung der Basisgrenzwerte sicherstellen können, insbesondere bei Abständen unter 1000 mm. Die Überschreitung der Grenzwerte kommt ausschließlich bei der LTE-Frequenz von 2600 MHz bei der 10g-Maximum-SAR vor. Dies bedeutet, dass die definierten Sicherheitsabstände der BGR B11-Richtlinie für Frequenzen bis 2100 MHz

(UMTS) ausreichend sind, jedoch eine Erweiterung auf 2600 MHz die Einhaltung der Basisgrenzwerte nicht in jedem Fall sicherstellt.

## Schlussfolgerung

Aufgrund dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Richtlinien in BGR B11 für die Sicherheitsabstände an Basisstationen bei Frequenzen von 2600 MHz (LTE) und höher die Einhaltung der Basisgrenzwerte nicht in jedem Fall gewährleisten. Für eine Sicherstellung der Einhaltung müssten die erlaubten Sendeleistungen reduziert werden oder für höhere Frequenzen andere Richtlinien definiert werden.

## Autoren



Dipl. Ing. Stefan Cecil studierte Elektrotechnik an der Universität Wien und ist seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter in der Seibersdorf Labor GmbH im Geschäftsfeld EMC and Optics. Sein Betätigungsfeld ist vor allem die numerische Simulation mit verschiedenen Simulationsprogrammen im gesamten Frequenzbereich (FDTD, Momentenmethode, Ray-Tracing, ELF-Algorithmen)

für verschiedene Anwendungen (Antennenentwicklung, Exposition von Personen, EMV-Probleme). Er hat Projekte geleitet, die sich z.B. mit der elektromagnetischen Beeinflussung von elektronischen Implantaten, der Stromausbreitung im menschlichen Körper oder Sicherheitsabständen von verschiedenen elektromagnetischen Quellen beschäftigen.



Dr. Georg Neubauer promovierte 2003 an der Technischen Universität Graz zum Doktor der technischen Physik. Seit 1991 ist er beim Austrian Institute of Technology GmbH beschäftigt und übt darüber hinaus eine Lehrtätigkeit an der TU Wien aus. Dr. Neubauer ist Mitglied einer Arbeitsgruppe des Wissenschaftlichen Ausschusses „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ der

Europäische Kommission (SCENHIR) sowie Leiter der Arbeitsgruppe „Monitoring und Messtechnik“ der europäischen COST Aktion BM0704. Er berät und unterstützt Vertreter unterschiedlicher Institutionen, wie zum Beispiel die WHO oder verschiedene Ministerien. Darüber hinaus ist er Autor oder Mitautor von mehr als 100 wissenschaftlichen Publikationen und Gutachter für mehrere internationale wissenschaftliche Zeitschriften.

## Kontakt:

Seibersdorf Labor GmbH, A-2444 Seibersdorf

[stefan.cecil@seibersdorf-laboratories.at](mailto:stefan.cecil@seibersdorf-laboratories.at)

[georg.neubauer@ait.ac.at](mailto:georg.neubauer@ait.ac.at)

Web: <http://www.seibersdorf-laboratories.at/home.html>