

3 Immissionsvergleich Basisstation - Mobiltelefon

3.1 Vergleich der ortsbezogenen Immissionen

3.1.1 Vergleich Basisstation mit Mobiltelefon bei maximaler Sendeleistung

In Kapitel 5 werden ausführlich die Ergebnisse von Immissionsmessungen in direkter Umgebung von Basisstationen vorgestellt. Abbildung 3.1 stellt zum Vergleich Immissionswerte aktueller Mobiltelefone dar. Beim Immissionswert handelt es sich um den sogenannten SAR-Wert (Spezifische Absorptionsrate), der als Basisgröße für die Bewertung von Hochfrequenz-Immissionen dient.

Der SAR-Wert eines Mobiltelefons wird mittels eines normierten Messverfahrens gewonnen und gibt den Energieeintrag in das Körpergewebe des Telefonierenden an (Einheit: W/kg). Der relevante Grenzwert für den Teilkörper SAR-Wert bei lokaler Exposition im Kopf- bzw. Rumpfbereich beträgt 2 W/kg.

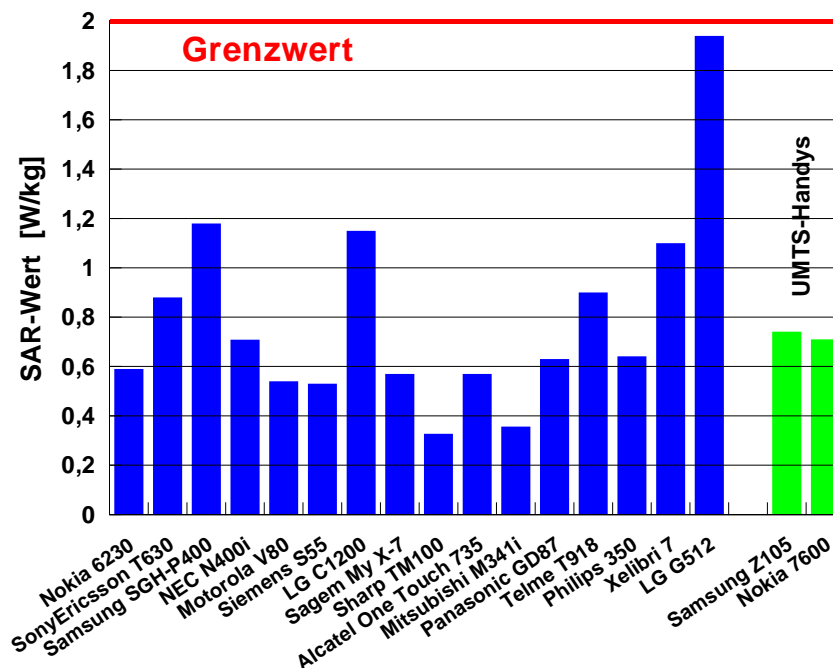


Abb. 3.1: SAR-Werte aktueller GSM- und UMTS-Mobiltelefone.

Aus einem Vergleich mit den Immissionen durch Mobilfunk-Basisstationen wird deutlich, dass zumindest während eines Telefonates bezüglich der individuellen, ortsbezogenen Immission eindeutig die Immission durch Mobiltelefone überwiegt. Die in Bild 3.1 dargestellten Mobiltelefone schöpfen den Grenzwert zu etwa 15 bis über 95 Prozent aus, wohingegen die in Kapitel 5 dokumentierten Messergebnisse im Umfeld von Mobilfunk-Basisstationen bei etwa 96 Prozent der Punkte unter 10 Prozent vom Grenzwert bleiben. Zu beachten ist hierbei, dass es sich beim SAR-Wert von Mobiltelefonen um eine *leistungsbezogene* Betrachtung handelt, wohingegen die Grenzwertausschöpfung bei Mobilfunk-Basisstationen in Kapitel 5 *feldstärkebezogen* betrachtet wird. Erfolgt auch diese Betrachtung leistungsmäßig, dann wurde an

etwa 96 Prozent aller Messpunkte weniger als 1 Prozent vom Grenzwert gemessen. Allerdings beschränkt sich die Immission durch Mobiltelefone auf die Nutzungszeiten, während die Felder von Basisstationen permanent wirksam sein können.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass auf der einen Seite der Teilkörper SAR-Wert 2 W/kg beträgt, wohingegen die Grenzwerte für Basisstationen auf einen Ganzkörper SAR-Wert von 0,08 W/kg zurückzuführen sind. Damit ergibt sich bei einer durchschnittlichen Basisstation gegenüber einem Mobiltelefon mit 50 Prozent Grenzwertausschöpfung rund ein Unterschiedsfaktor von etwa 1.000 bezüglich der Exposition. Dieses Verhältnis ist letztlich noch größer, da bei Mobiltelefonen der Basisgrenzwert als SAR-Wert angegeben wird und bei Basisstationen die abgeleiteten Grenzwerte in Form von elektrischer Feldstärke E oder Leistungsflussdichte S. Bei der Herleitung dieser abgeleiteten Werte aus den Basisgrenzwerten werden "worst case"-Faktoren in der Art berücksichtigt, dass bei Einhaltung von E (bzw. S) der SAR-Grenzwert nie überschritten wird.

Fazit: Bei der Benutzung eines Mobiltelefons wird der menschliche Kopf deutlich stärker exponiert, als es im Umfeld von Basisstationen durch deren Felder der Fall ist.

3.1.2 Einfluss der Leistungsregelung des Mobiltelefons

Bei der obigen Betrachtung wurde vorerst außer Acht gelassen, dass es sich beim normierten SAR-Messverfahren um eine "worst case"-Betrachtung handelt, da das Mobiltelefon während der Messung definiert *auf der höchsten Leistungsstufe* sendet. Unter Normalbedingungen regeln Mobiltelefone ihre Sendeleistung in Abhängigkeit der Verbindungsqualität zur Basisstation nach: Ist das bei der Basisstation ankommende Mobiltelefonsignal zu schwach, veranlasst die Basisstation das Mobiltelefon, mit höherer Leistung zu senden.

Hier wird schon eine Problematik deutlich, die z.B. bei der Forderung, Basisstationen aus den dicht besiedelten Wohngebieten herauszuhalten, unterschätzt wird: Eine schlechte Verbindung zur weit entfernten Basisstation erhöht zwangsläufig die Exposition des Mobiltelefonnutzers, die nach dem oben Gezeigten ohnehin stärker als die Exposition durch eine unmittelbar benachbarte Basisstation ist. Diese Zusammenhänge sollen im folgenden simulationstechnisch illustriert werden:

Die mobiltelefonseitige Leistungsregelung basiert z.B. im GSM1800-System auf 16 Leistungsstufen. Je nach Verbindungsqualität, die z.B. durch die Entfernung zur Basisstation oder Sichthindernisse beeinflusst wird, wird dem Mobiltelefon die Leistungsstufe vorgegeben. Bei GSM1800 ist die höchste Leistungsstufe mit 30°dBm (Stufe 0) und die niedrigste mit 0 dBm (Stufe 15) festgelegt. Somit ergibt sich pro Leistungsstufe eine Änderung der Sendeleistung um 2 dB.

In den folgenden Tabellen sind sowohl die Parameter für die Modellierung der Basisstation als auch die für das Mobiltelefon angegeben. Die Antenne des Mobiltelefons wird durch einen Dipol nachgebildet. Das Mobiltelefon befindet sich in 50, 100 bzw. 150 m Entfernung von der Basisstation. Zwischen Mobiltelefon und Basisstation ist ein Gebäude angenommen, das eine

zusätzliche Dämpfung der Funkwellen (Basisstation - Mobiltelefon und Mobiltelefon - Basisstation) verursacht. Für die Simulation wurde Freiraumausbreitung unter Berücksichtigung der Gebäudedämpfung angenommen. Reflexion, Beugung und Streuung wurden der Einfachheit halber nicht berücksichtigt.

Höhe der BS über Grund in [m]	Antennentyp (Kathrein)	Frequenz in [MHz]	Sendeleistung BS in [W]	Mechanischer Downtilt in [°]	Elektrischer Downtilt in [°]
15	739490	1863	20	7	0

Tab. 3.1: Simulationsparameter für die Basisstation.

Laterale Entfernung des Mobiltelefonbenutzers von der BTS in [m]	Abgestrahlte Leistung am Mobiltelefon in [dBm] (Peak)	Bezeichnung der Stufe der Leistungsreglung	Abgestrahlte Leistung am Mobiltelefon in [dBm] (Mittelwert)
50	0	15	-9,03
100	6	12	-3,01
150	10	10	0,97

Tab. 3.2: Abgestrahlte Mobiltelefonleistung in Abhängigkeit der Entfernung und Berücksichtigung einer zusätzlichen Dämpfung von 45 dB (Sichthindernisse).

In den folgenden Bildern ist die Immissionsverteilung des oben beschriebenen Szenarios zunächst ohne und anschließend mit der Berücksichtigung der Mobiltelefone zu sehen.

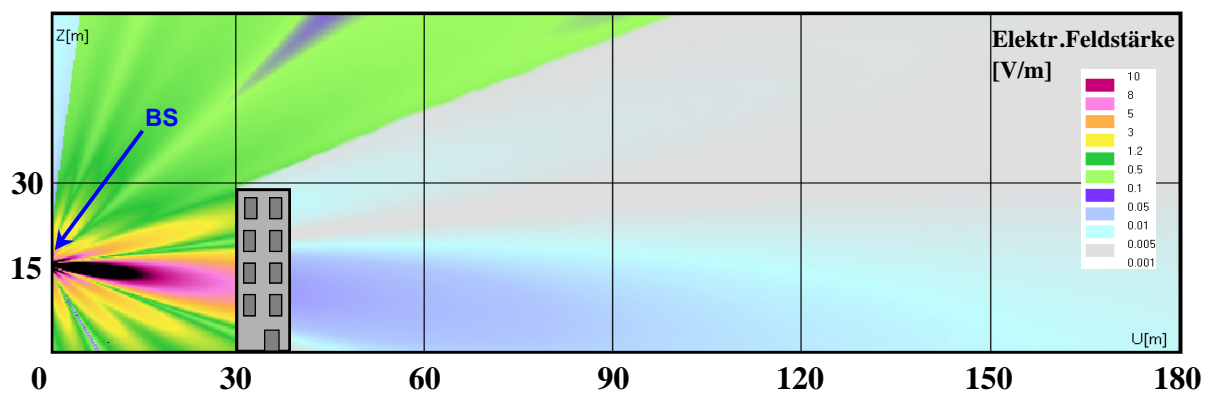


Abb. 3.2: Immissionsverteilung verursacht durch eine Basisstation unter der Annahme von Freiraumausbreitung mit einer zusätzlichen Dämpfung von 45 dB (verursacht durch das Gebäude).

Die Zusatzdämpfung, verursacht durch das Gebäude, wurde deshalb eingeführt, damit bereits in geringen Abständen zur Station die Leistungsregelung des Mobiltelefons greift. Ohne das Gebäude müsste man eine sehr große Entfernung (z.B. etwa 7 km unter Annahme einer idealen Freiraumausbreitung) zur Station wählen, so dass Telefon und Sendeanlage nicht mehr vernünftig in einem gemeinsamen Bild darstellbar wären.

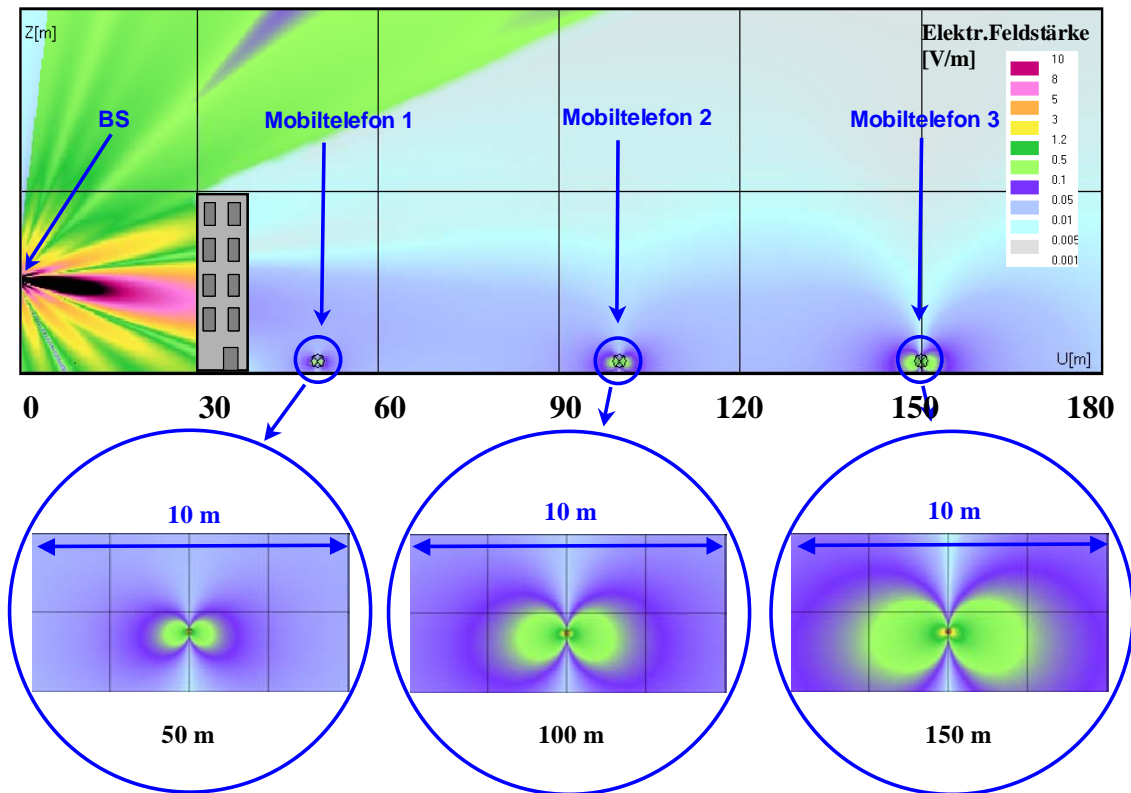


Abb. 3.3: Vergleich der Immission verursacht durch ein Mobiltelefon mit der Immission der dazugehörigen Basisstation unter der Annahme von Freiraumausbreitung mit einer zusätzlichen Dämpfung von 45 dB (hier verursacht durch das Gebäude).

In Abbildung 3.3 wird die Immissionssituation für verschiedene Abstände des Mobiltelefonnutzers zur Basisstation dargestellt. Zwei Aussagen lassen sich deutlich ablesen:

Die Exposition sowohl des Mobiltelefonnutzers, als auch seiner unmittelbaren Umgebung (einige Meter) ist primär durch die Immission des Mobiltelefons, und nicht durch die der Basisstation, geprägt (obwohl das Telefon bei weitem noch nicht mit seiner maximal möglichen Leistung sendet).

Außerdem ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Entfernung zur Basisstation die abgestrahlte Leistung des Mobiltelefons infolge der Leistungsregelung erhöht wird. Mit größerer

Entfernung zur Basisstation steigt demnach auch die Immission, die durch das Mobiltelefon entsteht.

Fazit: Dort wo geringe Basisstations-Immissionen herrschen, regelt das Mobiltelefon seine Sendeleistung hoch.

3.1.3 Exposition Unbeteiligter durch Mobiltelefone im Innenraum

Oftmals wird die Frage gestellt, wie groß die Exposition von Personen in einem Innenraum durch Mobiltelefonnutzer im selben Raum ist und wie diese im Verhältnis zur Immission durch eine nahe Basisstation steht. Diese Frage soll im vorliegenden Abschnitt untersucht werden.

Hierzu werden folgenden Konfigurationen betrachtet:

- (1) *ein* Mobiltelefon, das sich an verschiedenen Positionen in einem Raum befindet,
- (2) *drei* Mobiltelefone, die an drei verschiedenen Positionen im Raum verteilt sind,
- (3) *eine* Basisstation, die 50 m entfernt und in direkter Sicht zum untersuchten Raum liegt (LoS, Line of Sight),
- (4) *eine* Basisstation, die sich unmittelbar auf demselben Gebäude befindet,
- (5) *eine* Basisstation, die sich unmittelbar auf demselben Gebäude befindet und von weiteren Häusern umgeben ist, so dass Reflexionen ins Rauminnere gelangen
- (6) *eine* Basisstation, die 50 m entfernt ist und keine direkte Sicht zum untersuchten Raum hat (nLoS, non Line of Sight)

In der Praxis könnte es sich hierbei also um einen Büroraum handeln, in dem Personen mit dem Mobiltelefon telefonieren.

Die Ausgangskonfiguration zur Bestimmung der Immission durch ein bzw. drei Mobiltelefone in dem 5 x 8 Meter großen Raum ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Die Mobiltelefone befinden sich hierbei auf einer Höhe von 1,7 m über dem Etagenboden. In der Mitte des Raumes steht ein Holztisch (z.B. Besprechungstisch in einem Konferenzraum). Für die Mobiltelefone wird eine abgestrahlte mittlere Leistung von 0,125 W angenommen (1 W im Puls bei GSM). Die Berechnungen erfolgen mit einem auf Strahlenoptik basierendem Programm. Das strahlenoptische Programm berücksichtigt wellenausbreitungstechnische Effekte wie Dämpfung, Beugung, Streuung und Reflexion.

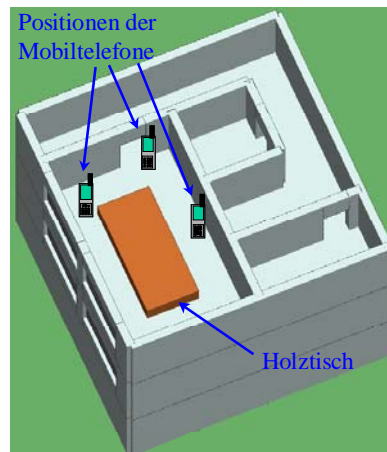


Abb. 3.4: Szenario (1) und (2): Mobiltelefone innerhalb eines Raumes.

Szenario 1: Immission durch ein Mobiltelefon

In der Abbildung 3.5 sind die Immissionsverteilungen, verursacht von einem einzelnen Mobiltelefon an drei unterschiedlichen Positionen im betrachteten Raum, zu sehen.

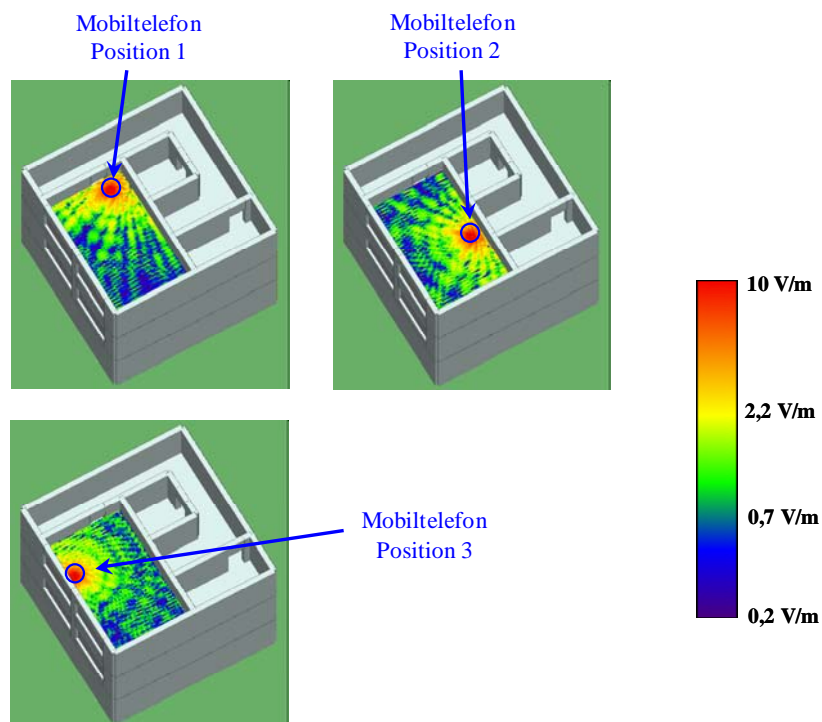


Abb. 3.5: Immissionsverteilung verursacht durch ein Mobiltelefon, das sich in einer Raumecke (oben links), vor einem Fenster (unten links) bzw. an einer Wand (oben rechts) des untersuchten Raumes befindet. Die über eine Raumebene gemittelte Immission ergibt folgende Ergebnisse: Position 1: 2,27 V/m; Position 2: 2,28 V/m; Position 3: 2,04 V/m.

Szenario 2: Gesamtimmission der drei Mobiltelefone

Abbildung 3.6 zeigt die Immissionsituation, wenn alle drei Mobiltelefone gleichzeitig mit einer mittleren Leistung von 0,125 W senden.

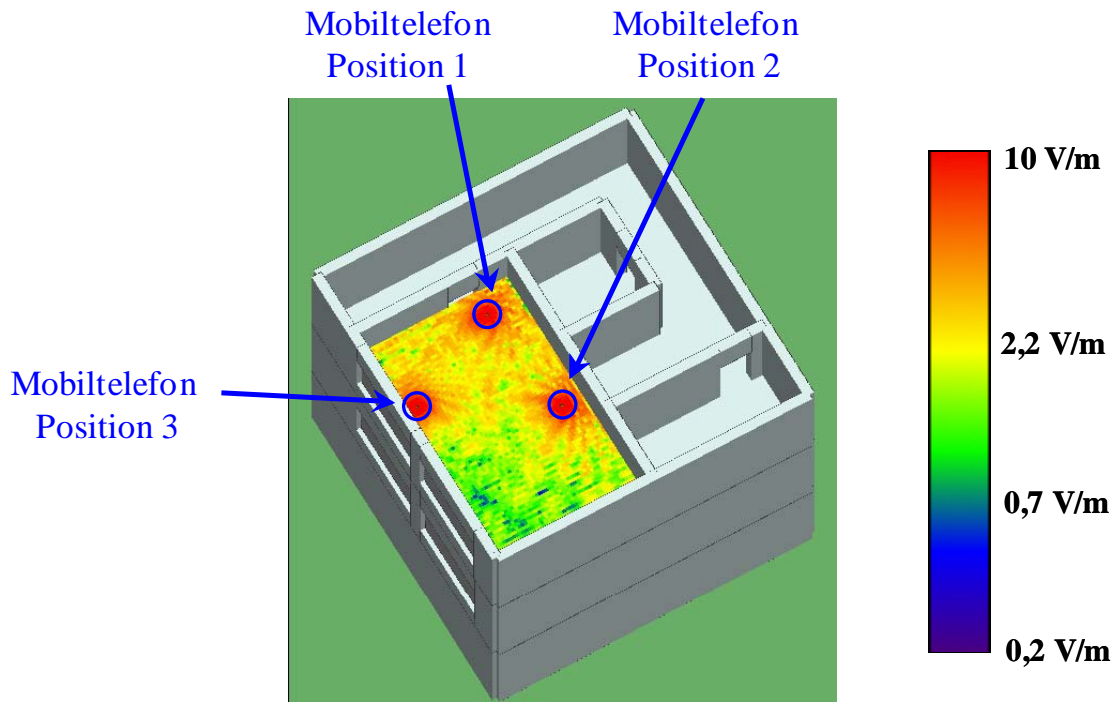


Abb. 3.6: Gesamtimmission verursacht durch drei Mobiltelefone. Die über die Raumebene gemittelte Immission ergibt 3,81 V/m.

Szenario 3: Basisstation in 50 m Entfernung, LoS

Im Vergleich zur Immission durch die Mobiltelefone wird nun die Immissionsituation untersucht, die im gleichen Raum durch eine Basisstation erzeugt wird, die sich in 50 m Entfernung befindet und durch ein Fenster vom Rauminneren her sichtbar ist. Zunächst sind im nächsten Bild die Ausgangskonfiguration und in der nachfolgenden Tabelle die Simulationsparameter zu sehen.

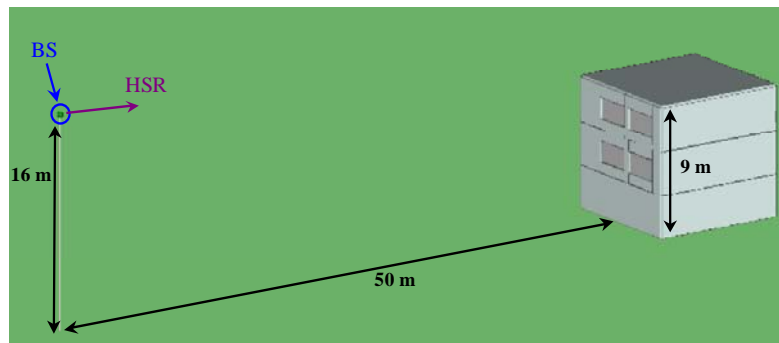


Abb. 3.7: Szenario 3: Basisstation 50 m von dem untersuchten Raum entfernt und in direkter Sicht (LoS).

Höhe der BS über Grund in [m]	Antennentyp (Kathrein)	Frequenz in [MHz]	Sendeleistung BS in [W]	Mechanischer Downtilt in [°]	Elektrischer Downtilt in [°]
16	739665	947	20	3	0

Tab. 3.3: Simulationsparameter.

Im folgenden Bild ist die durch die Basisstation hervorgerufene Immissionsverteilung im untersuchten Raum dargestellt.

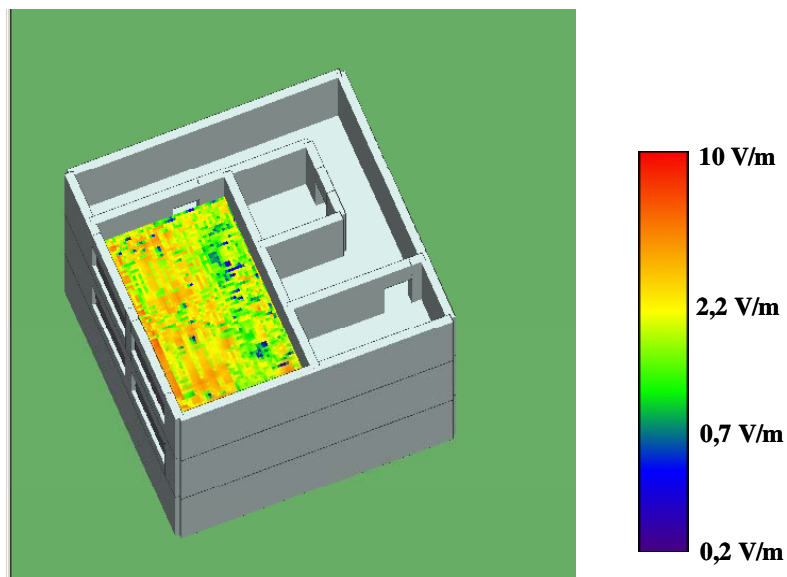


Abb. 3.8: Szenario 3: Immissionsverteilung verursacht durch eine Basisstation in 50 m Entfernung, LoS. Die über die Raumebene gemittelte Immission ergibt 3,04 V/m.

Im Vergleich mit der Immissionssituation der drei Mobiltelefone (Abb. 3.6) ist zu erkennen, dass sich die Exposition durch die direkt sichtbare, in unmittelbarer Nachbarschaft gelegene Basisstation etwa in der gleichen Größenordnung befindet.

Szenario 4: Mobilfunkanlage auf gleichem Gebäude

Die Konfiguration des nächsten untersuchten Szenarios ist im folgenden Bild zu sehen. Hierbei befindet sich die Basisstation direkt auf dem Gebäude, in dem sich der Raum mit den Mobiltelefonen befindet. Reflexionen an umliegenden Gebäuden finden vorerst nicht statt. In Tabelle 3.5 sind die Simulationsparameter zusammengefasst.

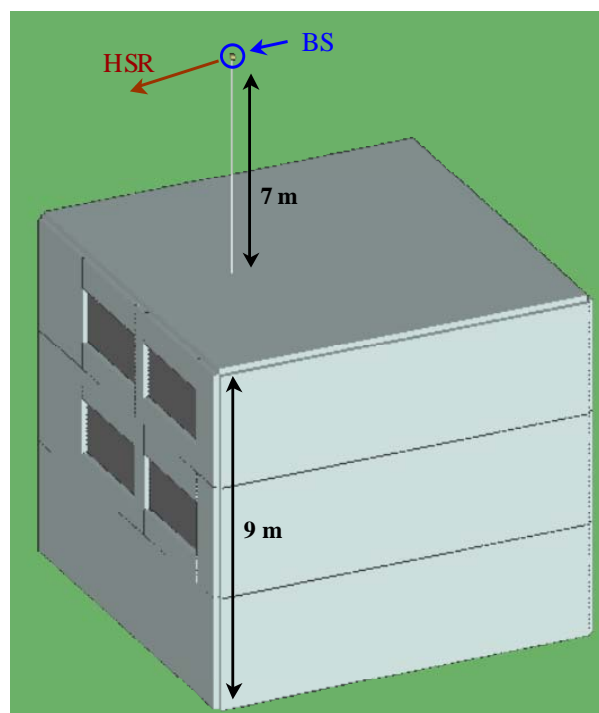


Abb. 3.9: Szenario 4: Basisstationsantenne auf dem Gebäudedach.

Höhe der BS über Grund in [m]	Antennentyp (Kathrein)	Frequenz in [MHz]	Sendeleistung BS in [W]	Mechanischer Downtilt in [°]	Elektrischer Downtilt in [°]
16	739665	947	20	3	0

Tab. 3.4: Simulationsparameter.

Die nachfolgende Abbildung 3.10 zeigt die Immissionssituation innerhalb des Raumes, die durch die Basisstation verursacht wird, die sich unmittelbar auf dem selben Gebäude befindet.

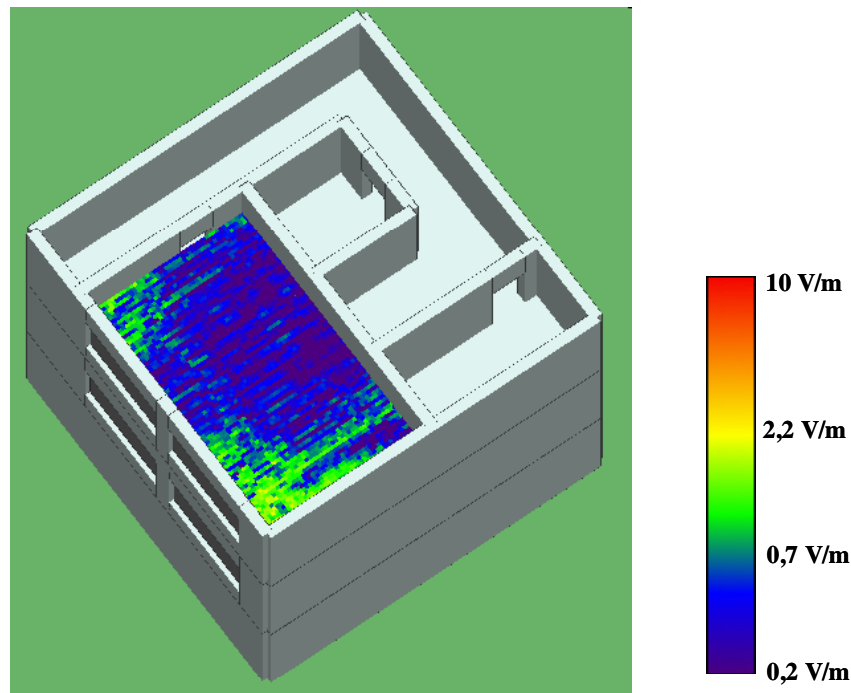


Abb. 3.10: Immissionsverteilung innerhalb des Raumes, wobei sich die Basisstation direkt auf dem Dach befindet. Die über die Raumebene gemittelte Immission ergibt 0,65 V/m.

In Vergleich zum Szenario 3 ist zu erkennen, dass die durch die Basisstation hervorgerufene Immission deutlich geringer ist. Dies ist sowohl durch die Dämpfungswirkung des Gebäude-Deckenmaterials, als auch durch den Nahbereichsschatten der Basisstationsantenne zu erklären. Die Immission im Raum wird jetzt von den Immissionen der Mobiltelefone dominiert (Vergleiche Abbildung 3.10 mit Abbildung 3.6).

Szenario 5: Mobilfunkanlage auf gleichem Gebäude mit umliegenden Häusern

Das folgende Szenario besteht aus der gleichen Basisstationsanordnung wie das vorhergehende. Erneut ist die Mobilfunkanlage direkt auf dem Gebäude installiert, in dem sich auch der untersuchte Raum befindet. Zusätzlich wurden in dieser Konfiguration umliegende Gebäude hinzugefügt, so dass nun auch Reflexionen in der Umgebung zur Gesamtmission im untersuchten Raum beitragen. Das folgende Bild und die daran anschließende Tabelle zeigen erneut die Berechnungsumgebung und die dazugehörigen Simulationsparameter.

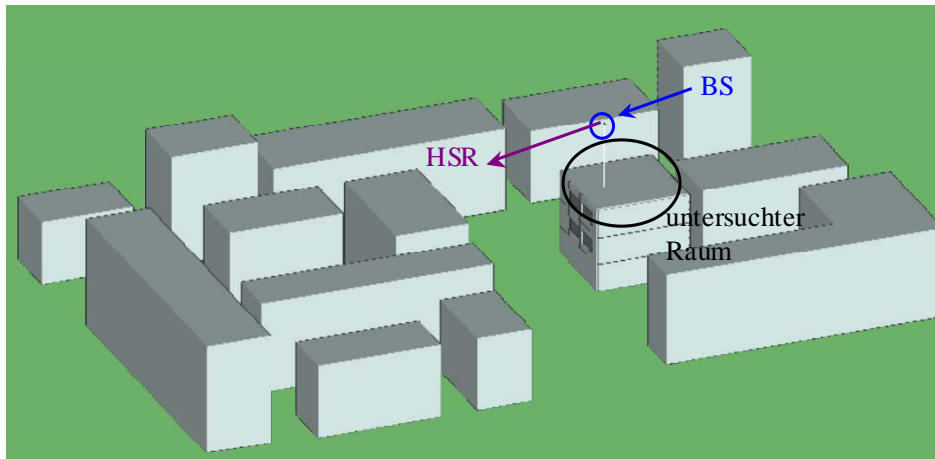


Abb. 3.11: Szenario 5: Basisstationsantenne auf dem Hausdach, umgeben von weiteren Häusern.

Höhe der BS über Grund in [m]	Antennentyp (Kathrein)	Frequenz in [MHz]	Sendeleistung BS in [W]	Mechanischer Downtilt in [°]	Elektrischer Downtilt in [°]
16	739665	947	20	3	0

Tab. 3.5: Simulationsparameter.

Im nachfolgenden Bild sind zunächst die Ausbreitungswege für einen Empfangspunkt im untersuchten Raum dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Immissionen nicht nur durch das Gebäudedach, sondern auch über Reflexionen an den umliegenden Häusern und dem Boden ins Rauminnere gelangen.

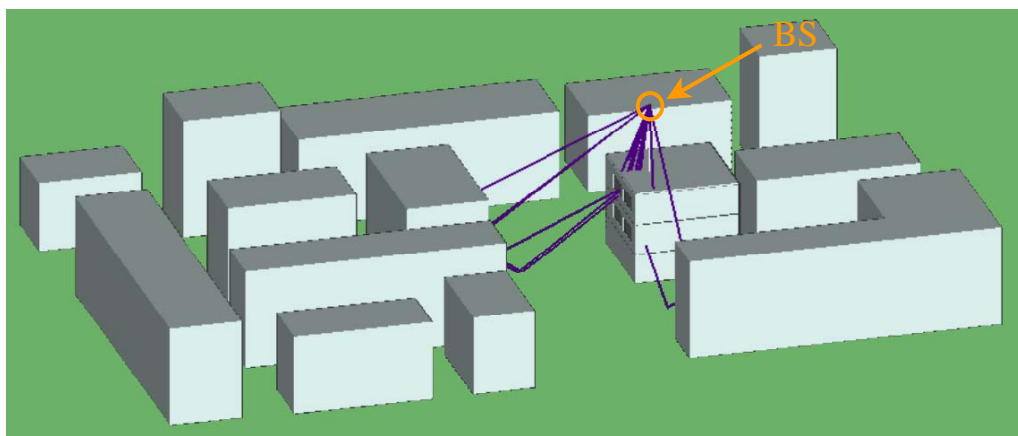


Abb. 3.12: Ausbreitungswege im nLoS – Szenario (5).

In Abbildung 3.13 ist die gesamte simulierte Immissionsituation dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 3.10 ist zu erkennen, dass die Reflexionen an den umliegenden Gebäuden zu einer Immissionserhöhung im untersuchten Raum beitragen. Bei einer Gegenüberstellung mit Abbildung 3.6 zeigt sich, dass die Gesamtimmission im Raum trotzdem durch die drei Mobiltelefone (Szenario 2) dominiert wird.

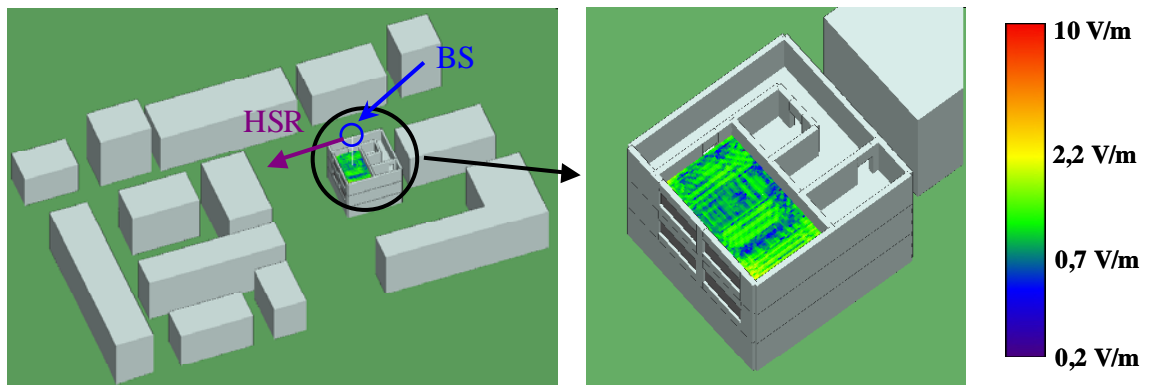


Abb. 3.13: Szenario 5: Basisstationsantenne auf dem Hausdach. Die über die Raumebene gemittelte Immission ergibt 2,08 V/m.

Szenario 6: Basisstation in 50 m Entfernung, nLoS

Abschließend wird die Immissionssituation untersucht, die durch eine Mobilfunkbasisstation hervorgerufen wird, die sich wie oben in 50 m Entfernung vom betrachteten Raum befindet. Der Unterschied zu Szenario 3 liegt darin, dass jetzt keine direkte Sicht zur Antenne besteht. Somit werden Reflexionen und Beugungen an anderen Gebäuden maßgebend für die Immissionsverteilung sein. In folgendem Bild ist die Simulationskonfiguration dieses Szenarios zu sehen. In Tabelle 3.7 sind die Berechnungsparameter zusammengefasst.

Höhe der BS über Grund in [m]	Antennentyp (Kathrein)	Frequenz in [MHz]	Sendeleistung BS in [W]	Mechanischer Downtilt in [°]	Elektrischer Downtilt in [°]
16	739665	947	20	3	0

Tab. 3.6: Simulationsparameter.

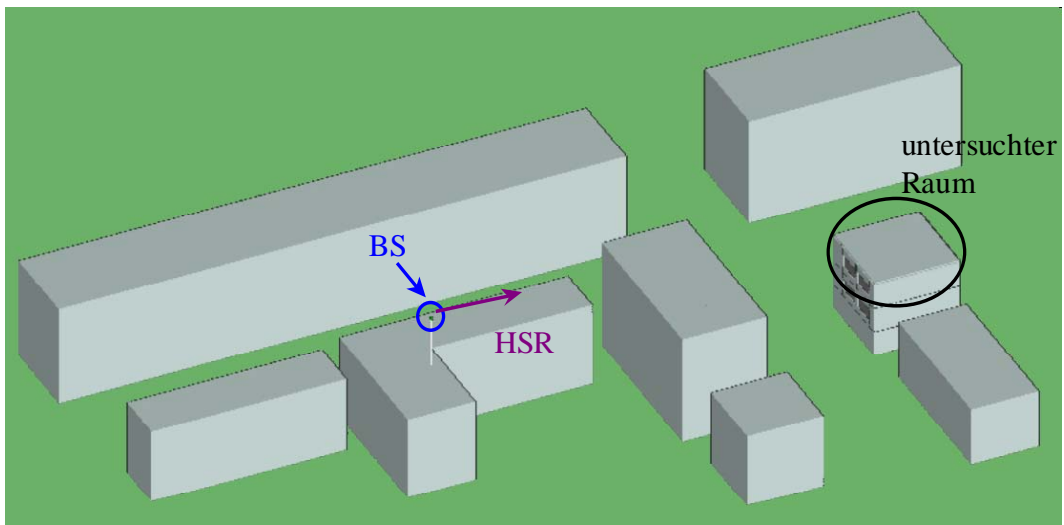


Abb. 3.14: Szenario 6: Basisstation 50 m von dem untersuchten Raum entfernt und keine direkte Sicht (nLoS).

Im folgenden Bild sind zunächst die relevanten Ausbreitungswege zu sehen. Man sieht, dass zur Immission im Raum hauptsächlich Reflexionen am langgestreckten Gebäude sowie in geringerem Ausmaß auch durch das zwischen betrachtetem Raum und Basisstation befindliche Gebäude gedämpfte Immissionsanteile beitragen.

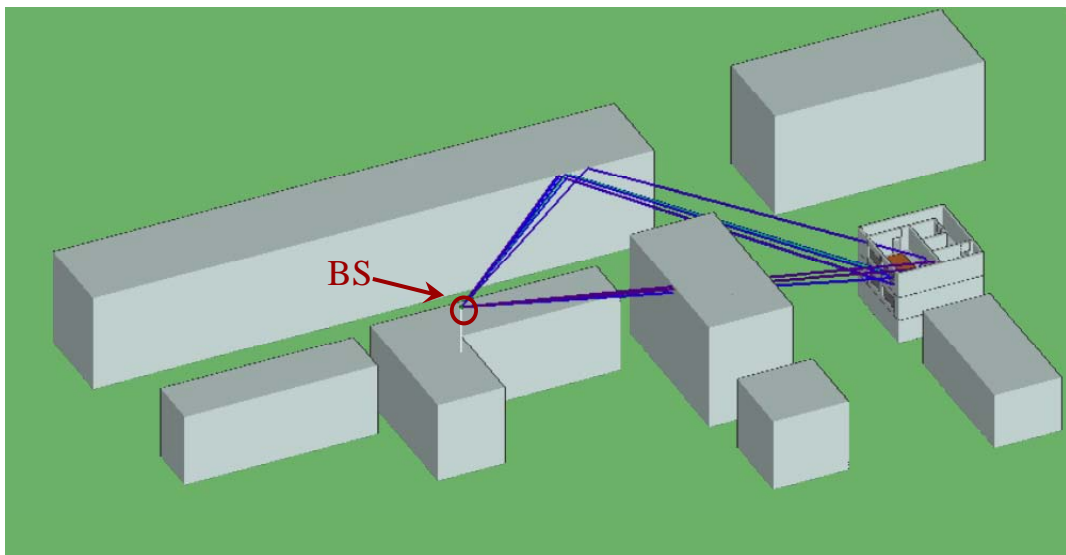


Abb. 3.15: Ausbreitungswege im nLoS – Szenario (6).

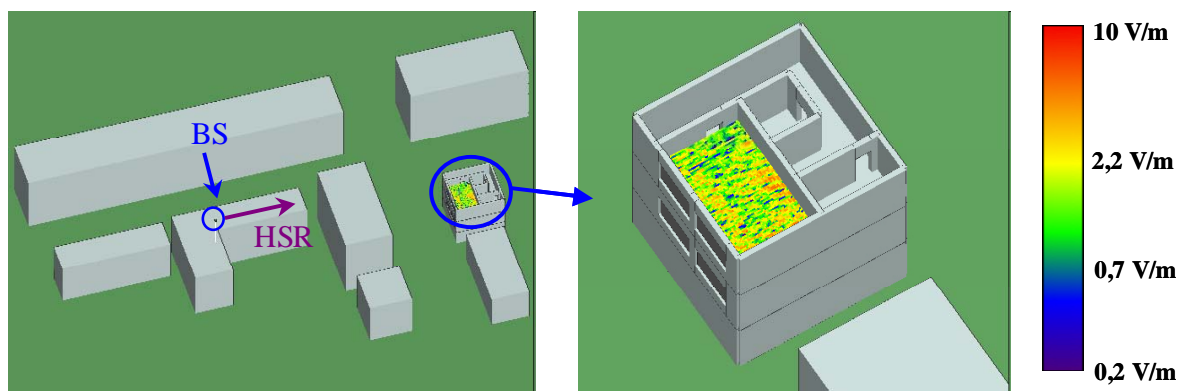


Abb. 3.16: Immissionsverteilung verursacht durch eine Basisstation in 50 m Entfernung, nLOS. Die über den Raum gemittelte Immission ergibt 2,64 V/m.

Vergleicht man das Simulationsergebnis mit Szenario 3 wird deutlich, dass bedingt durch die fehlende Sicht auf die Mobilfunkanlage eine deutlich geringere Immission im Raum vorliegt. Allerdings ist durch die starken Reflexionen die Immission höher als in Szenario 4 und 5. Trotzdem wird auch hier die Immission im Raum durch die drei Mobiltelefone dominiert (Szenario 2).

In folgender Tabelle sind die verschiedenen Simulationsergebnisse nochmals zusammenfassend aufgelistet. Man beachte, dass für die Simulationen mit der benachbarten Basisstation eine Entfernung von nur 50 Meter und ein Höhenunterschied von nur 7 Meter angenommen wurde, was ein relativ extremes Szenario darstellt.

Situation	Gemittelte elektrische Feldstärke im Raum
Ein Telefon im Raum betrieben	2,0 - 2,3 V/m
Drei Telefone gleichzeitig im Raum betrieben	3,81 V/m
Basisstation in 50 Meter Entfernung (direkte Sichtverbindung)	3,04 V/m
Basisstation auf dem eigenen Gebäudedach, keine Reflexionen an Nachbargebäuden	0,65 V/m
Basisstation auf dem eigenen Gebäudedach, starke Reflexionen an Nachbargebäuden vorhanden	2,08 V/m
Basisstation in 50 Meter Entfernung (keine direkte Sichtverbindung, jedoch Ausbreitung über starke Reflexionen an Nachbargebäuden)	2,64 V/m

Tab. 3.7: Zusammenfassende Darstellung der Simulationsrechnungen.

Fazit: In vielen Fällen wird innerhalb von Gebäuden die auftretende Immission nicht durch die Felder von benachbarten Basisstationen, sondern von im gleichen Raum betriebenen Mobiltelefonen dominiert.

3.2 Vergleich der Gesamtimmissionen

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten primär die *Einzelexposition* durch Basisstationen oder Mobiltelefone betrachtet wurde, soll in diesem Kapitel ein Vergleich der *Gesamtimmissionen* beider Gerätegruppen durchgeführt werden. Die Gesamtimmission wird dabei aus der Summe der Einzelimmissionen durch alle Mobiltelefone und alle Basisstationen gebildet. Sie beschreibt die gesamte auf die Umwelt (d.h. Erdboden, Bäume, Häuser, Personen usw.) eingestrahlte Leistung, also quasi die gesamte "Umweltbelastung", und den Teil der abgestrahlten Leistung, der in die Atmosphäre geht und somit nicht vom Erdboden, Bäumen usw. absorbiert wird. Bei typischen Downtiltwinkeln von Basisstationen vor allem im innerstädtischen Gebiet von 4-6° kann man davon ausgehen, dass etwa 90 % der abgestrahlten Leistung in die Umwelt gehen.

Diese Betrachtung der Gesamtimmission ist ein wesentlicher Unterschied zur Einzelexposition, die primär aus regulatorischer Sicht (Grenzwerteinhaltung) von Interesse ist.

Die Bestimmung der Gesamtimmission erfolgt unter Zuhilfenahme von Abschätzungen für Durchschnittswerte bezüglich Auslastung von Basisstationen, Anzahl gleichzeitig aktiver Mobiltelefone und realer Sendeleistungen der Telefone.

Die gesamte auf die Umwelt eingestrahlte Leistung aller Basisstationen und Mobiltelefonen ist gleich der insgesamt abgestrahlten Leistung abzüglich der in die Atmosphäre abgegebenen Leistung.

Für vorliegende Untersuchungen wird der Einfachheit halber die in die Atmosphäre abgestrahlte Leistung vernachlässigt und die Gesamtimmission, die z.B. durch eine Basisstation verursacht wird, mit der insgesamt abgestrahlten Leistung der Basisstation gleichgesetzt. Dies hat bei realistischen Basisstationskonfigurationen mit Downtiltwinkeln im Bereich weniger Grad durchaus seine Berechtigung [BOR 02].

Wird die solchermaßen gebildete Gesamtimmission mit einer gemeinsamen Bezugsgröße, z.B. der Fläche der Bundesrepublik Deutschland, ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich eine flächengemittelte oder "mittlere Immission" in der Einheit der Leistungsflussdichte W/m^2 . Durch die zeitliche und örtliche Mittelung ist, im Gegensatz zur individuellen Exposition, ein guter Vergleich der Immissionsbilanzen beider die Immission erzeugenden Komponenten, Basisstationen und Mobiltelefone, möglich.

3.2.1 Gesamtimmission durch alle Basisstationen

Laut Aussage der RegTP (Stand September 2004), sind derzeit etwa 38.000 Mobilfunkstandorte in Betrieb. Dies stimmt allerdings nicht mit der Zahl der tatsächlich aktiven Basisstationen überein, da manche Standorte mehrfach genutzt werden. Setzt man für die Mehrfachnutzung die Daten von Oktober 2003 an, werden 74 % der Standorte einzeln, 18,5 % mit 2 Netz-

betreibern, 6 % mit 3 Netzbetreibern und 1,5 % mit 4 Netzbetreibern genutzt [BAUM 03]. Dieses ergibt dann eine Zahl von etwa 51.300 Basisstationen in Betrieb. Hierbei ist zu beachten, dass durch den gegenwärtigen UMTS-Aufbau täglich neue Basisstationen ans Netz gehen und sich diese Zahl ständig nach oben erweitert.

Die Mehrzahl der Basisstationen ist sektorisiert aufgebaut; der Einfachheit halber werden hier für jede Basisstation drei Sektoren angesetzt.

Die Sendeleistung des Sende-Kontrollkanals (bei GSM ist dies der "BCCH-Kanal") ist je nach Betreiber und Station unterschiedlich. Hier wird eine mittlere Sendeleistung von 10 Watt angesetzt, die als repräsentativ für einen durchschnittlichen "BCCH-Kanal" erachtet wird.

Üblicherweise ist eine Basisstation mit mehreren Kanälen ausgerüstet. Der erste Kanal ist der Sende-Kontrollkanal. Dieser sendet ständig konstant mit maximaler Leistung, auch wenn kein Gespräch über diesen Kanal läuft.

Zusätzlich zum "BCCH-Kanal" können ein oder mehrere sog. Nutz- oder Gesprächskanäle (TCH, Traffic Channel) hinzukommen, über die die Gespräche übertragen werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass im Gegensatz zum "BCCH-Kanal"

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- in Gesprächspausen das Sendesignal ausgetastet wird (sofern DTX = Discontinuous Transmission aktiviert),
- nur in denjenigen Zeitschlitz gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft, und
- die Sendeleistung von Zeitschlitz zu Zeitschlitz unterschiedlich sein kann, entsprechend der Verbindungsqualität zwischen Mobiltelefon und Basisstation (intelligente Leistungsregelung).

Vor allem die TCH's sind dafür verantwortlich, dass die Sendeleistung der Basisstation zeitlich nicht konstant ist, sondern vom Gesprächsaufkommen und der Verbindungsqualität abhängt. Dieses Verhalten ist in Abbildung 3.17 veranschaulicht.

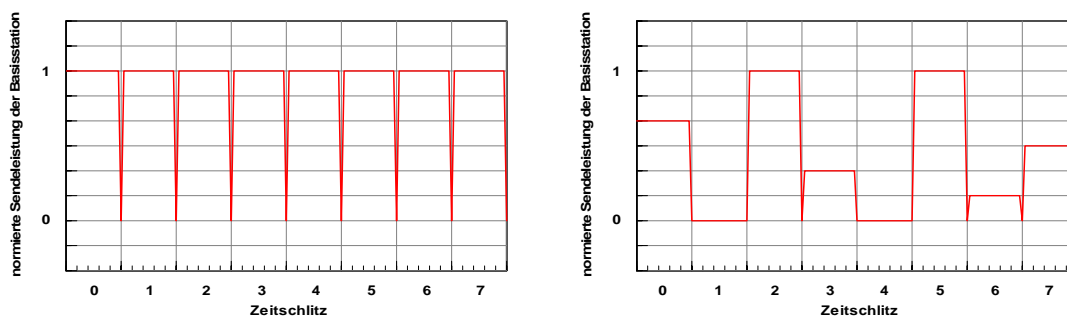


Abb. 3.17: Sendestructur der Kanäle einer Mobilfunk-Basisstation. Kanal 1 "BCCH-Kanal" (links), Kanal 2 und Folgekanäle (rechts).

Die Anzahl der installierten Kanäle hängt sowohl vom Netzbetreiber, als auch vom Aufstellungsort der Basisstation ab. Da mit der Kanalzahl primär die Kapazität bestimmt wird, ist die Zahl maximal möglicher Kanäle im Zentrum von Großstädten oftmals größer als z.B. bei Anlagen am Stadtrand oder im ländlichen Bereich. Für vorliegende Anlagen soll von einem mittleren Wert von drei Kanälen pro Anlage ausgegangen werden, was derzeit als typischer Mittelwert realistisch ist.

Nun ist, wie oben diskutiert, die tatsächliche Emission einer mehrkanaligen Station durch die Zahl der aktiven Nutzer, Leistungsregelung und DTX extrem zeitabhängig. Es würde zu einer Überbewertung der Immissionen von Basisstationen führen, wenn die durchschnittliche Gesamtemission aus der Emission, verursacht durch den Sende-Kontrollkanal, multipliziert mit der durchschnittlichen Kanalanzahl, berechnet würde. Abbildung 3.18 zeigt beispielhaft eine Immissionsmessung über 24 Stunden in der Umgebung einer mehrkanaligen Anlage [BOR 02-3]. Jeder Punkt entspricht einem Messwert, der in Intervallen von einer Minute abgespeichert wurde. Interessant zu beobachten ist, dass zwar im Tagesverlauf mit einem Maximum bei ca. 17 Uhr die höchsten Spitzenwerte erreicht werden, aber auch hier von einem Messwert zum nächsten die Immission nahezu auf denjenigen Pegel absinken kann, der durch die ständig aktiven Kontrollkanäle verursacht wird (Messwert während der Nachtstunden).

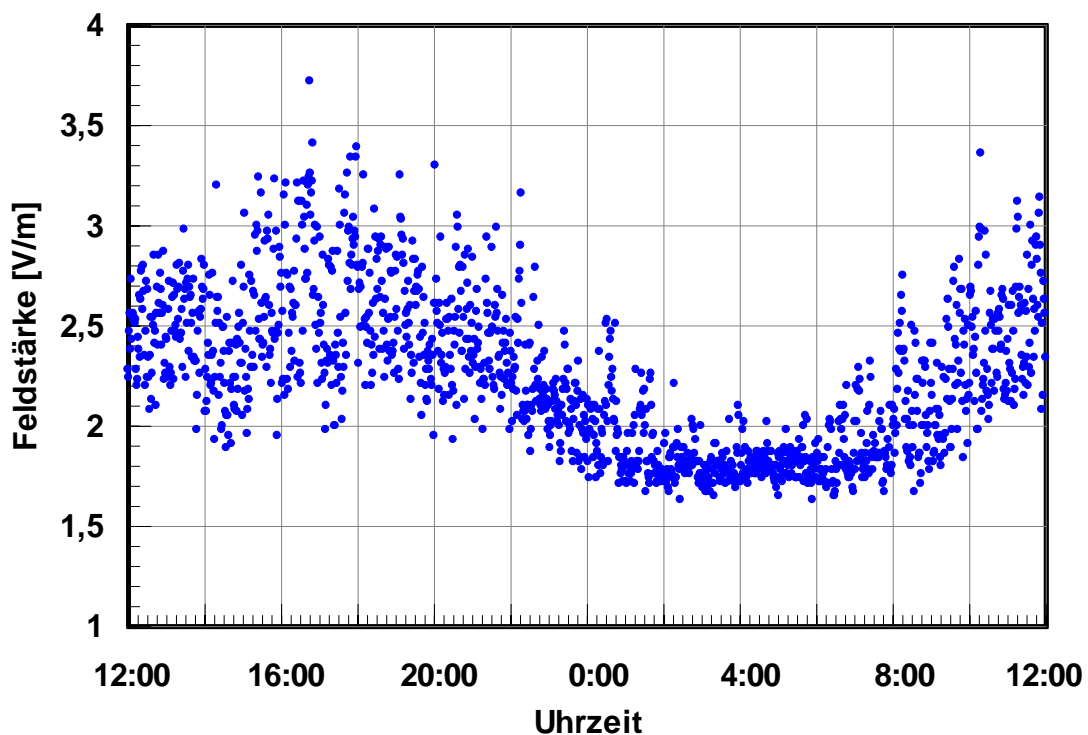


Abb. 3.18: Ergebnis einer 24 Stunden Messung an einem fixen Messpunkt in der Umgebung einer mehrkanaligen Anlage [BOR 02-3].

Durch Auswertung solcher zeitlicher Verläufe ist es bedingt möglich, einen durchschnittlichen Wert für die insgesamt im Tagesmittel abgestrahlte Leistung in Abhängigkeit von der Kanalzahl zu gewinnen. Für die hier angesetzte dreikanalige Anlage wird die "effektive Sendeleistung", d.h. die durchschnittliche Sendeleistung über ein 24 Stunden-Intervall mit der

1,4-fachen Sendeleistung des Kontrollkanals abgeschätzt, was durch Betrachtung des Zeitverlaufs in Abbildung 3.18 plausibel erscheint

Damit ergibt sich durch folgende Aufsummierung die mittlere Immission, die durch alle Basisstationen in Deutschland generiert wird:

- 51.300 Mobilfunk Basisstationen x
- 3 Sektoren x
- Faktor 1,4 für die Berücksichtigung der Kanalzahl x
- 10 Watt pro Kanal
- = **2,2 Megawatt (Gesamtimmission) /**
- 360.000 km² (Fläche Bundesrepublik Deutschland)
- = **6 Mikrowatt pro Quadratmeter (mittlere Immission).**

3.2.2 Gesamtimmission durch alle Mobiltelefone

In die Berechnungen auf der Mobiltelefonseite geht in erster Linie die Zahl der aktiven Mobiltelefone ein. Hier ist es wichtig, die Berechnungen nicht anhand der Zahl der verkauften Mobiltelefone durchzuführen, sondern als Basis die Zahl der Mobiltelefonverträge bzw. der Mobilfunkkunden zu wählen.

In [BÜL 04] wird die derzeitige Zahl der Mobiltelefonkunden in Deutschland mit etwa 64,8 Millionen beziffert.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Zeit, während der das Mobiltelefon aktiv im Sendebetriebe ist, also die Gesprächszeit. Leider gibt es hierzu keine Angaben über durchschnittliche Gesprächsminuten pro Mobiltelefonnutzer. Es besteht jedoch die Möglichkeit, auf Basis der sog. "Average Revenue per User" (ARPU, durchschnittlicher Umsatz der Mobilfunknetzbetreiber pro Kunde) diesbezügliche Abschätzungen zu treffen. Die ARPU wird nach [BÜL 04] für Deutschland mit 25,60 Euro pro Monat angegeben. Unterstellt man eine monatliche Anschlussgebühr von etwa 10 Euro, bleiben für Gesprächs- und Datendienste etwa 15,60 Euro pro Monat übrig. Der Anteil mobiler Datendienste davon beträgt 4,35 Euro pro Monat. Dominiert wird dieser Anteil vom Versenden von Kurzmitteilungen (SMS und MMS).

Nach Abzug der Daten-ARPU verbleiben 11,25 Euro pro Monat. Unter der Voraussetzung, dass dieser Beitrag primär für Telefongespräche verwendet wird und bei Annahme eines mittleren Minutenpreises von 20 Cent resultieren hieraus etwa 56 Gesprächsminuten pro Monat und Nutzer.

Bezüglich der Datendienste wurden in 2003 insgesamt etwa 25,5 Milliarden SMS und 95 Millionen MMS verschickt. Umgerechnet ergibt dies eine durchschnittliche Rate von 33 SMS/MMS pro Nutzer und Monat. Bei Ansatz einer mittleren Zeit von 4 Sekunden zum

Versenden einer SMS/MMS kommen also durch die mobilen Datendienste etwa 2 Minuten hinzu.

Unterstellt man, dass im Durchschnitt ein Mobiltelefonnutzer in etwa genauso häufig angerufen wird bzw. SMS/MMS empfängt, wie er selber anruft, können die oben genannten "aktiven" Zeiten in etwa verdoppelt werden. Hierin sind dann z.B. auch solche Effekte wie Sendepulse beim Zellwechsel berücksichtigt.

Insgesamt kann also von einer durchschnittlichen "Gesprächszeit" von 116 Minuten pro Monat und Nutzer ausgegangen werden.

Für eine realitätsnahe Abschätzung der insgesamt emittierten Leistung ist aber weiterhin zu beachten, dass die seitens der Basisstation diskutierten Merkmale wie Leistungsregelung und DTX auch beim Mobiltelefon Anwendung finden. Es ist also wichtig zu wissen, wie hoch die durchschnittliche Sendeleistung während eines Gespräches ist. Hierzu liegen für Deutschland noch keine belastbaren Daten vor. Es kann weder der "Normwert" der Sendeleistung (2 W bei GSM900, 1 Watt bei GSM1800, jeweils im Puls) noch die von manchen Institutionen gemessene "reale" Sendeleistung [BOR 02-2] verwendet werden, da diese jeweils im "worst-case"-Fall des Sendens bei höchster Leistungsstufe ermittelt werden.

In [WIA 00] sind zur Untersuchung dieser Fragestellung Testfahrten mit einem GSM900 Mobiltelefon in Paris (Innenstadt und Stadtrand) bei verschiedenen Send- und Empfangsszenarien mit dem Ziel durchgeführt worden, einen individuellen Immissionswert in einem operativen Mobilfunknetzwerk zu extrahieren. Die Untersuchungen resultierten in einen mittleren Wert der abgestrahlten Leistung von 0,5 Watt im Puls bzw. 0,062 Watt im Mittel. Dieser Wert soll in vorliegenden Untersuchungen für alle Mobiltelefone (D-Netze und E-Netze) angewendet werden, da das Verhältnis der Marktanteile zwischen D- und E-Netzen etwa 80 zu 20 ist. Somit ergibt sich in Analogie zu der Betrachtung der Basisstationen folgende Abschätzung:

- 64,8 Millionen Mobilfunkkunden x
- 116 Gesprächsminuten pro Monat /
- 43.776 (soviel Minuten hat durchschnittlich ein Monat) x
- 0,062 Watt
- = **10,6 Kilowatt (Gesamtmission) /**
- 360.000 km² (Fläche Bundesrepublik Deutschland)
- = **0,03 Mikrowatt pro Quadratmeter (mittlere Immission).**

Fazit: Nach den hier durchgeführten überschlägigen Berechnungen wird durch die vorhandenen Basisstationen im Mittel eine um einen Faktor 200 größere Gesamtmission erzeugt als durch die Mobiltelefone. Diese Betrachtung stellt ausdrücklich nicht die individuelle Exposition eines Nutzers durch eine benachbarte Basisstation bzw. durch das am Kopf betriebene Mobiltelefon dar,

sondern ist als kollektive bzw. Gesamtimmission bzw. mittlere Immission zu verstehen.