

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Bestimmung der Exposition durch WiMAX – Vorhaben 3606S04515

Auftragnehmer:

* Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH, Kamp-Lintfort

** EM-Institut GmbH, Regensburg

Band 3: Bestimmung und Analyse der Exposition

Christian Bornkessel *

Markus Schubert *

Matthias Wuschek **

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-10/09-Bd.3

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2009042330

Salzgitter, Mai 2009

Teilbericht III

Bestimmung und Analyse der Exposition

Kurzfassung

Es wurden Messungen der elektromagnetischen Felder in der Umgebung von WiMAX-Anlagen in insgesamt elf unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Die Szenarien umfassen hoch und niedrig montierte Anlagen in städtischem und ländlichem Umfeld mit den Systemen Mobile und Fixed WiMAX im lizenzierten (3,4-3,6 GHz) und lizenzfreien (5,15-5,775 GHz) Frequenzbereich im FDD und TDD Betrieb. Die Messungen wurden bei verschiedenen Abständen, Sichtbedingungen, Orientierungen und Höhenunterschieden zu den Antennen durchgeführt und gestatten durch diese Systematik in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Szenarien.

Als Messverfahren wurde das frequenzselektive Messverfahren mit Schwenkmethode angewendet. Die Messergebnisse wurden unter Berücksichtigung des zeitlichen Verhaltens der WiMAX-Signale (Tastverhältnis) extrapoliert, so dass entsprechend den Anforderungen der 26. BImSchV eine Aussage über die Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung möglich ist. Die solchermaßen ermittelten Immissionen an insgesamt 102 Messpunkten lassen sich wie folgt charakterisieren:

Innerhalb der Szenarien als auch beim Vergleich der Szenarien untereinander wurden sehr unterschiedliche Immissionswerte gefunden. Maximal wurden 0,84 V/m elektrische Feldstärke bzw. etwa 1,9 mW/m² Leistungsflussdichte (entspricht ca. 1,4 Prozent vom Feldstärkegrenzwert) gemessen; der kleinste Messwert betrug 0,002 V/m bzw. 0,01 µW/m² (entsprechend 0,003 Prozent vom Feldstärkegrenzwert). Der überwiegende Teil der Messwerte lag unterhalb von 0,02 V/m bzw. 1,1 µW/m² (entsprechend ca. 0,03 % vom Feldstärkegrenzwert). Die Spannweite der Exposition über alle Szenarien ist mit etwa 50 dB sehr groß. Die „aktuellen“, d.h. raum- und zeitgemittelten Immissionen bei einer exemplarisch untersuchten Mobile WiMAX Anlage, waren je nach Messpunktlage leistungsflussdichtebezogen um den Faktor 6 bis 11 kleiner als die örtlich maximierten und auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Werte. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass die Sendeleistung einiger Anlagen vor allem in Innenstadtbereichen in nächster Zukunft noch ansteigen wird und dann ähnliche Werte erreichen kann wie bei UMTS-Anlagen. Es wird als sinnvoll erachtet, mittelfristig erneut exemplarische Immissionsmessungen durchzuführen.

Bei der Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission hat sich herausgestellt, dass der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld der Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) im Outdoorbereich offenbar als Maß zur Quantifizierung der entstehenden WiMAX-Exposition wenig geeignet ist. Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission sehr stark durch die Nebenzipfel und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist und daher einen sehr unregelmäßigen Charakter aufweist.

Einen deutlichen Einfluss üben hingegen die Sichtverhältnisse aus: Objekte wie Gebäude, aber auch Bäume und Sträucher zwischen Messpunkt und Sendeanlage haben einen dämpfenden Einfluss, der sich erheblich in den Messergebnissen widerspiegelt. Die Immissionsreduzierung, die der Messpunkt erfährt, ist dabei abhängig von der Dämpfungswirkung des Objektes, aber auch von der Frage, inwieweit die Signale der Basisstation auch über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden oder Wänden zum Messpunkt gelangen können.

Der Einfluss des Vertikalwinkels konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht sehr deutlich herausgearbeitet werden, da die Anzahl und die Entfernungsstaffelung der Punkte dafür nicht ausreichend war. Allerdings zeigt sich zumindest der Trend zu typisch etwas höheren Messwerten an Punkten mit kleinem Vertikalwinkel.

Sehr deutlich ausgeprägt ist hingegen der Einfluss des Frequenzbandes auf die in der Umgebung einer WiMAX-Anlage entstehende mittlere Immission. Die Auswertung der Messergebnisse ergab mit einem Unterschiedsfaktor von mehr als 25 dB einen deutlich sichtbaren Unterschied zwischen lizenzierten und lizenzfreien Anlagen. Die Ursache für diese Differenz ist in den stark unterschiedlichen Sendeleistungen begründet.

Parallel zu den WiMAX-Immissionen wurden in vier der elf Szenarien auch die UMTS-Immissionen an den Messpunkten mit erfasst. Für die Messungen wurden speziell solche Standorte ausgewählt, bei denen neben einem WiMAX-System (lizenzierter Frequenzbereich) auch ein UMTS-System installiert bzw. in unmittelbarer Nähe vorhanden war. Über alle Messpunkte gesehen ergibt sich eine sehr deutliche Dominanz der UMTS-Immissionen im Vergleich zu WiMAX. Es dominieren an etwa 85 % der Messpunkte die durch UMTS-Systeme hervorgerufenen Immissionen. Im Mittel lagen die UMTS-Immissionen etwa 13 dB über den WiMAX-Werten. Ein Grund für die größere Immission durch UMTS-Systeme liegt in der höheren installierten Sendeleistung. Aber auch andere Faktoren, wie die Antennencharakteristik oder die Orientierung der Messpunkte zur Hauptstrahlrichtung der Antenne, haben offensichtlich einen Einfluss.

Drei durchgeführte Langzeitmessungen über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden dokumentieren den zeitlichen Verlauf der Immission. Dabei traten bei allen drei untersuchten Anlagen unterschiedliche Charakteristika auf: Bei der ersten Anlage sind deutliche Auslastungsschwankungen zu erkennen, die in den Abendstunden wesentlich größer sind als tagsüber. In der Nacht hingegen erreichen die gemessenen Felder einen Minimalwert, der durch die immer abgegebenen Signalisierungssignale der Station bedingt ist. Bei einer zweiten untersuchten Anlage waren keine Auslastungsschwankungen zu messen, was vermuten lässt, dass die Anlage noch nicht von einer nennenswerten Zahl an Kunden genutzt wird. Bei einer dritten Anlage waren wiederum deutliche Auslastungsschwankungen zu erkennen, deren tageszeitlicher Verlauf allerdings wenig ausgeprägt war. In einer Detailmessung über zwei Stunden konnte die Auswirkung der Einbuchung von Endgeräten in das Netz auf die Exposition durch die Basisstation dokumentiert werden.

Zweidimensionale Scanmessungen zur Charakterisierung der kleinskaligen örtlichen Schwankungsbreite im Umfeld einer realen WiMAX-Anlage zeigen, dass entgegen der Erwartungen aufgrund der größeren spektralen Bandbreite bei WiMAX keine deutliche Reduzierung der Schwankungsbreite des „Fast Fadings“ im Vergleich zu GSM-Basisstationen zu erkennen ist. Die Schwankungsamplitude ist beim Szenario ohne Sicht mit typisch 10 dB größer als beim Szenario mit Sicht (typisch 4 dB). Daraus kann abgeleitet werden, dass bei der Messung von WiMAX-Immissionen die Maximalwertsuche im Messvolumen ebenso sorgfältig durchgeführt werden muss wie bei der Messung von GSM- und UMTS-Immissionen.

Immissionsmessungen an Endgeräten wurden als Feldmessungen unter Laborbedingungen und unter realen, alltagstypischen Bedingungen sowie als SAR-Messungen durchgeführt.

Die Messungen unter Laborbedingungen erfolgten bei maximaler, konstanter Sendeleistung und ergaben, dass in typischen Nutzungsszenarien Indoor Geräte eine deutliche höhere Exposition beim Nutzer erzeugen als WiMAX Basisstationen. Bei den untersuchten Geräten wurde eine maximale Feldstärke von 10,1 V/m (17 % vom Feldstärke-Referenzwert) in 50 cm Abstand gemessen, die aber sehr schnell mit der Entfernung abnimmt und in 5 m Abstand nur noch Werte von maximal 1,2 V/m (2 % vom Referenzwert) erreicht. Im Gegensatz zu Indoor Units ist die Exposition bei der gemessenen Outdoor Unit vernachlässigbar klein, da die richtende Antenne sich außerhalb der Wohnung befindet und nicht zum Nutzer hin ausgerichtet ist.

Im realen Betrieb hat sich erwartungsgemäß gezeigt, dass die unter Laborbedingungen bei maximaler Sendeleistung ermittelten Immissionen nicht erreicht werden. Die Größe der unter realitätsnahen Bedingungen auftretenden Expositionen ist abhängig vom Betriebszustand des Endgerätes sowie der Verbindungsqualität zur Basisstation. Während im Standbybetrieb auch in unmittelbarer Nähe des Gerätes keine nennenswerten Expositionen auftreten, wurde an einem konkreten Szenario während des Uploads etwa 9 % der unter maximalen Sendeleistungsbedingungen auftretenden Exposition erreicht. Auch hier konnte nachgewiesen werden, dass die Exposition durch Outdoor Units feldstärkebezogen maximal im Promillebereich liegt. SAR-Messungen unter maximalen Betriebsbedingungen an einem Indoor Tischgerät haben wiederum eine starke Abhängigkeit der Exposition von der Lage und dem Abstand des Gerätes ergeben. Während bei Abständen zur Antenne im Zentimeterbereich die Basisgrenzwertewerte nur im Bereich einiger Prozent ausgeschöpft wurden, kann es bei länger andauerndem direktem Kontakt zur Antenne zu Überschreitungen der Basisgrenzwerte kommen. Allerdings ist ein Kontakt zur Antenne bei einem Tischgerät unter Normalbedingungen nicht realistisch.

Bezüglich *Berechnungsverfahren* wurden für diese Studie verschiedene kommerzielle Softwarepakete im Hinblick auf ihre Eignung zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von WiMAX-Sendeanlagen als auch WiMAX-Endgeräten untersucht. Der Begriff „Umgebung“ umfasst hierbei den Bereich außerhalb des horizontalen Sicherheitsabstandes (ca. ein bis zwei Meter) der Sendeanlage bis zum Rand des Versorgungsgebietes der entsprechenden Anlage.

Anhand eines Kataloges von verschiedenen praxisrelevanten Konfigurationen wurde die Eignung der jeweiligen Software untersucht sowie ein Vergleich von berechneten Feldstärkewerten und entsprechend messtechnisch bestimmten Immissionen durchgeführt. Hierbei wurden neben Indoor- und Outdoor-Szenarien auch differierende Sichtbedingungen und unterschiedliche Abstände zur Basisstation bzw. zum Endgerät berücksichtigt.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass in Konfigurationen mit Sicht zu Sendeantenne (LOS) alle betrachteten Softwarepakete die Immission an der Mehrzahl der Vergleichsgebiete vor dem Hintergrund der Messunsicherheit gut prognostizieren. Dennoch sollten bei derartigen Konfigurationen aber folgende Aspekte berücksichtigt werden: Befinden sich z.B. Bäume in der Sichtverbindung oder in anderen relevanten Ausbreitungswegen, die in den Simulationen außer Acht gelassen wurden, überschätzen die Programme die gemessene Immission. Insbesondere auch die vergleichsweise einfache Berechnungsmethode „Freiraum + 3 dB“

hat gezeigt, dass auch diese für Konfigurationen mit Sicht zur Anlage als geeignet angesehen werden kann.

Im Gegensatz dazu ist diese Methode für Situationen ohne Sicht zur Sendeanlage nicht geeignet, die realen Immissionen zu prognostizieren. In den betrachteten Szenarien traten hierbei zum Teil deutliche Überschätzungen auf. Die Einbeziehung von Gebäuden bzw. Wänden bei Indoor-Szenarien in die Simulation ist dementsprechend zwingend erforderlich.

Eine qualitative vergleichende Betrachtung der Immissionsverteilung von WLAN-, UMTS- und WiMAX-Endgeräten in einer Wohn- und einer Büroumgebung unter der theoretischen Annahme einer Volllastung hat gezeigt, dass die Immissionsverteilung von WLAN und UMTS vergleichbar ist und in der gleichen Größenordnung liegt. Demgegenüber ist die Immission durch das hier betrachtete WiMAX-Endgerät in dessen unmittelbarer Umgebung aufgrund der höheren Sendeleistung und höheren Antennengewinns größer, sie nimmt aber mit zunehmender Anzahl von Hindernissen aufgrund der frequenzbedingten höheren Transmissionsdämpfung schneller ab als die der anderen Systeme.

Ein Vergleich der auf 1 MBit/s normierten Immission unter der Annahme der theoretisch maximal zur Verfügung stehenden Datenrate hat gezeigt, dass die Feldstärke in Bezug auf 1 MBit/s bei UMTS aufgrund der kleineren Maximaldatenrate deutlich größer ist als bei den beiden anderen Technologien. Die normierte Immissionsverteilung von WLAN und WiMAX ist dagegen vergleichsweise ähnlich und liegt in der gleichen Größenordnung. Während die normierte Immission in der direkten Umgebung des Endgerätes von WiMAX etwas größer ist, kehrt sich dieser Sachverhalt mit zunehmender Anzahl von Wänden um und die normierte Immission von WLAN ist höher.

Diese Ergebnisse sind jedoch im Hinblick auf die *individuelle Expositionssituation* nicht verallgemeinerbar, da aufgrund der Vielzahl von Endgerätetypen und in der Praxis vorstellbaren Szenarien diverse Vereinfachungen angenommen wurden. Insofern können sich in der Realität je nach Situation auch abweichende Immissionsverhältnisse einstellen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Kurzfassung | 2 |
| Inhaltsverzeichnis..... | 6 |
| 1 Einleitung | 9 |
| 2 Messung der Immission in unterschiedlichen Szenarien... 9 | |
| 2.0 Vorgehensweise..... | 9 |
| 2.1 Exposition in der Umgebung von niedrig montierten Antennen im ländlichen Umfeld | 11 |
| 2.2 Maststandort im ländlichen Umfeld | 13 |
| 2.3 Vergleich WiMAX - UMTS im ländlichen Umfeld | 15 |
| 2.4 Vergleich WiMAX - UMTS in einem Gewerbegebiet | 18 |
| 2.5 Vergleich WiMAX - UMTS an einer hoch montierten Anlage im Stadtinnenbereich..... | 21 |
| 2.6 Vergleich WiMAX - UMTS an einer hoch montierten Anlage im Stadtrandbereich | 23 |
| 2.7 Ortsversorgung im ländlichen Umfeld..... | 26 |
| 2.8 Ortsversorgung durch außerhalb liegenden Dachstandort | 28 |
| 2.9 Versorgung mehrerer Ortschaften durch einen außerhalb liegenden Standort | 30 |
| 2.10 Versorgung durch zwei Dachstandorte in einem Wohngebiet | 32 |
| 2.11 Versorgung benachbarter Ortschaften durch einzelne Standorte im jeweiligen Ort | 35 |
| 3 Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission..... | 41 |
| 3.1 Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse | 43 |
| 3.2 Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage | 45 |
| 3.3 Einfluss des Vertikalwinkels..... | 47 |
| 3.4 Einfluss der Sichtverhältnisse..... | 49 |
| 3.5 Einfluss des Frequenzbereichs | 49 |
| 3.6 Fazit..... | 51 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4 | Vergleich von WiMAX-Immissionen zu denen anderer Funkdienste | 52 |
| 4.1 | Messtechnischer Vergleich von WiMAX- und UMTS-Immissionen.. | 52 |
| 4.2 | Vergleich von WiMAX-Immissionen zu Immissionen anderer Sendestationen anhand von Literaturdaten..... | 53 |
| 5 | Weitere Charakteristika von WiMAX-Immissionen | 56 |
| 5.1 | Zeitlicher Verlauf der Immission | 56 |
| 5.1.1 | <i>Grundschule Steinberg am See.....</i> | <i>56</i> |
| 5.1.2 | <i>Verbandshauptschule Staig.....</i> | <i>58</i> |
| 5.1.3 | <i>Büro der Firma IKS in Wadrill</i> | <i>60</i> |
| 5.2 | Örtliche und zeitliche Durchschnittswerte..... | 62 |
| 5.3 | Kleinskalige örtliche Schwankungsbreite..... | 66 |
| 6 | Ermittlung der Exposition durch Endgeräte..... | 69 |
| 6.1 | Feldmessungen unter Laborbedingungen | 69 |
| 6.1.1 | <i>Untersuchte Geräte.....</i> | <i>69</i> |
| 6.1.2 | <i>Messaufbau</i> | <i>71</i> |
| 6.1.3 | <i>Ergebnisse.....</i> | <i>73</i> |
| 6.2 | Feldmessung unter realen Bedingungen | 78 |
| 6.2.1 | <i>Wohnumgebung 1.....</i> | <i>78</i> |
| 6.2.2 | <i>Wohnumgebung 2.....</i> | <i>82</i> |
| 6.3 | SAR-Messungen | 83 |
| 6.3.1 | <i>Messaufbau</i> | <i>83</i> |
| 6.3.2 | <i>Messergebnisse</i> | <i>85</i> |
| 7 | Vergleich der Messungen mit Berechnungen | 87 |
| 7.1 | <i>Eingabeparameter.....</i> | <i>88</i> |
| 7.2 | <i>Konfiguration 1: Ländliche Umgebung.....</i> | <i>90</i> |
| 7.3 | <i>Konfiguration 2: Städtische Umgebung</i> | <i>98</i> |
| 7.4 | <i>Konfiguration 3: Endgerät.....</i> | <i>105</i> |
| 7.5 | <i>Fazit.....</i> | <i>114</i> |
| 8 | Vergleichende Berechnungen unterschiedlicher Funkdienste | 115 |
| 8.1 | <i>Typische Wohnumgebung</i> | <i>116</i> |
| 8.2 | <i>Typische Büroumgebung.....</i> | <i>120</i> |
| 8.3 | <i>Fazit.....</i> | <i>123</i> |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| Danksagung | 125 |
| Literaturverzeichnis zu Teil III..... | 126 |
| Abkürzungsverzeichnis zu Teil III..... | 128 |
| Verzeichnis häufig verwendeter Symbole zu Teil III | 129 |

1 Einleitung

Im dritten Berichtsteil vorliegenden Untersuchungsvorhabens wird die elektromagnetische Immission in der Umgebung von WiMAX-Anlagen eingehend analysiert. Dazu werden die Ergebnisse umfangreicher Messungen an insgesamt 16 unterschiedlichen, für WiMAX-Netze typischen Zellen in elf verschiedenen Szenarien vorgestellt. Die Auswahl der Messpunkte sowie der gemessenen Anlagen erfolgt dabei nach systematischen Gesichtspunkten. So wurden sowohl WiMAX-Anlagen im lizenzierten und lizenzfreien Frequenzbereich, als auch Anlagen des Fixed und Mobile-Standards untersucht. Die Auswahl umfasst hoch und niedrig montierte Anlagen in städtischen und ländlichen Umgebungen. Die Messpunkte weisen verschiedene Abstände, Orientierungen, Höhenunterschiede, Sichtverbindungen usw. zur Sendeanlage auf. Aus den Ergebnissen wird die Spannbreite der praktisch auftretenden Immissionen bestimmt.

Anschließend wird anhand der Messergebnisse der Einfluss verschiedener immissionsbestimmender Faktoren auf die Größe der Exposition untersucht.

Parallel zu den WiMAX-Immissionen werden in vier Szenarien auch UMTS-Immissionen an den Messpunkten mit erfasst. Hierbei konnten teilweise solche Anlagen ausgewählt werden, bei denen neben einem WiMAX-System auch ein UMTS-System installiert war.

Weitere Messungen charakterisieren sowohl den zeitlichen Verlauf der Immission über einen Zeitraum von 24 Stunden, als auch die kleinskalige örtliche Schwankungsbreite in Innenräumen. Außerdem werden exemplarisch örtlich und zeitlich gemittelte Immissionen den örtlich maximierten und auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen gegenüber gestellt und Unterschiedsfaktoren ermittelt.

Nachfolgend werden die Immissionen von Endgeräten unter Labor- und realen Bedingungen ermittelt.

Abschließend erfolgt eine Anwendung der im Teilbericht II vorgestellten Berechnungsverfahren auf ausgewählte Teile der messtechnisch untersuchten Szenarien. Mittels eines Vergleiches mit den Messergebnissen wird die Eignung der Berechnungsprogramme auf Problemstellungen der vorliegenden Art bewertet.

2 Messung der Immission in unterschiedlichen Szenarien

2.0 Vorgehensweise

In vorliegendem Kapitel werden die Ergebnisse umfangreicher Messungen an verschiedenen WiMAX-Stationen vorgestellt. Die Auswahl der Messpunkte erfolgt dabei nach systematischen Gesichtspunkten: Sie weisen verschiedene Abstände, Orientierungen, Höhenunterschiede, Sichtverbindungen usw. zur Sendeanlage auf und liegen in verschiedenen Besiedlungsstrukturen. Durch diesen systematischen Ansatz wird in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit der ermittelten Immissionen auf ähnliche Szenarien ermöglicht.

Auch bei den untersuchten Anlagenkonfigurationen wurde Wert auf eine möglichst breite Vielfalt unterschiedlicher Anlagen und Szenarien gelegt: So wurden sowohl WiMAX-Anlagen im lizenzierten und lizenzfreien Frequenzbereich, als auch Anlagen des Fixed und Mobile-

Standards untersucht. Die Messungen erfolgten an insgesamt elf unterschiedlichen WiMAX-Versorgungsszenarien im Umfeld von 16 verschiedenen WiMAX-Anlagen. Die untersuchten Szenarien sind:

1. Niedrig montierte Station im ländlichen Umfeld
2. Hoch montierte Station im ländlichen Umfeld = freistehender Mast
3. Freistehender, niedriger Mast am Ortsrand + UMTS-Anlage in der unmittelbaren Nähe
4. Dachstandort in einem Gewerbegebiet + UMTS-Anlage auf dem selben Dach
5. Hoch montierte Station im Stadtinnenbereich + UMTS-Anlage auf dem selben Dach
6. Hoch montierte Station im Stadtrandbereich + UMTS-Anlage auf dem selben Dach
7. Ortsversorgung im ländlichen Bereich
8. Ortsversorgung durch außen liegende Dachstandorte
9. Versorgung mehrerer Ortschaften durch einen außerhalb liegenden Standort
10. Versorgung durch zwei Dachstandorte in einem Wohngebiet
11. Versorgung benachbarter Ortschaften durch einzelne Standorte im jeweiligen Ort

Szenarien 1 bis 7: Anlagen im lizenzierten Frequenzbereich (3,5 GHz)

Szenarien 8 bis 11: Anlagen im lizenzfreien Frequenzbereich (5,6 GHz)

Szenarien 1-4 und 7: Anlagen des Standards Mobile WiMAX

Szenarien 5 und 6 sowie 8-11: Anlagen des Standards Fixed WiMAX

Als Messverfahren wird das im Teilbericht II beschriebene frequenzselektive (spektrale) Messverfahren mit Schwenkmethode und Hochrechnung auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung angewendet. Als Messgeräte wurden Spektrumanalysatoren der Typen Rohde & Schwarz FSL-6, FSP-30 und FSP-7 und als Empfangsantennen eine Hornantenne HF-906 (Rohde & Schwarz) sowie eine logarithmisch-periodische Antenne USLP-9142 (Schwarzbeck) verwendet. Alle Messwerte werden als

- Elektrische Feldstärke in V/m,
- Elektrische Feldstärke in Prozent vom Grenzwert der 26. BImSchV und
- Leistungsflussdichte in $\mu\text{W}/\text{m}^2$

für den maximalen Betriebszustand der Anlage angegeben. Die Hochrechnung erfolgte dabei auf den Pegel des Präambel-Signals unter Berücksichtigung des Tastverhältnisses. Dadurch wird sichergestellt, dass es - trotz der auslastungsabhängigen Leistungsabgabe der WiMAX-Stationen - auf keinen Fall zu einer Unterbewertung der Immission an den Mess-

punkten kommt, sondern die Exposition tendenziell eher überbewertet wird (siehe auch Abschnitt 2.2.1.2. im Teilbericht II).

Bei den zu untersuchenden Anlagen konnten auch solche erfasst werden, bei denen neben einem WiMAX-System in der Nachbarschaft auch ein UMTS-System installiert war. Die UMTS-Exposition wurde entsprechend der Messempfehlung aus [BOR 06-2] (codeselektive Messung der P-CPICH-Kanäle, Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand der Anlage) mit gemessen und ist in den nachfolgenden Auswertungen dokumentiert.

2.1 Exposition in der Umgebung von niedrig montierten Antennen im ländlichen Umfeld

Bei der hier untersuchten Anlage handelt es sich um einen Standort, an dem die WiMAX-Signale eines Betreibers (lizenzierter Frequenzbereich, Mobile WiMAX) über vier Sektorantennen abgestrahlt werden. Der Standort befindet sich im Zentrum von Schnürpflingen, Landkreis Ulm (Baden-Württemberg). Die Antennen sind auf einem Mast in 14 Meter Höhe über Grund montiert. Die Messungen wurden an Punkten in der näheren Umgebung des Standortes in Wohngebieten durchgeführt.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt:

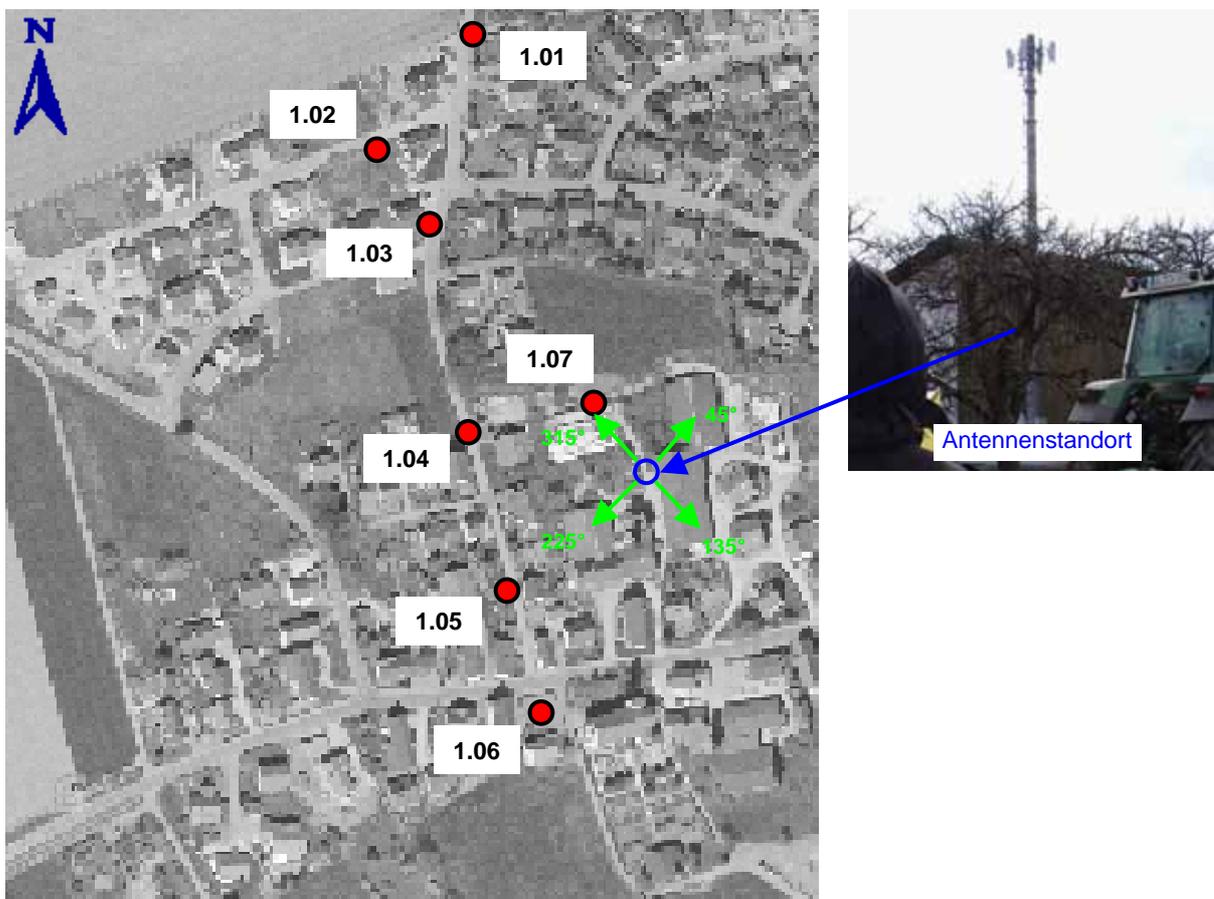


Bild 2.1a: Szenario 1: Lageplan mit Anlagenstandort und den Messpunkten

Alle Messpunkte befanden sich im Freien. Mit Ausnahme von Punkt 1.06 bestand an allen Punkten Sichtverbindung zu den Antennen. Die Messungen wurden bei trockenem Wetter durchgeführt. In folgender Tabelle werden die WiMAX-Immissionen für die sieben Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1.01 | 230 m | 0,12 | 0,20 | 39,7 |
| 1.02 | 210 m | 0,22 | 0,36 | 124,2 |
| 1.03 | 161 m | 0,12 | 0,20 | 39,9 |
| 1.04 | 89 m | 0,26 | 0,42 | 174,5 |
| 1.05 | 96 m | 0,31 | 0,51 | 256,9 |
| 1.06 | 133 m | 0,01 | 0,02 | 0,5 |
| 1.07 | 45 m | 0,09 | 0,15 | 21,2 |

Tabelle 2.1: Szenario 1: WiMAX-Exposition

In folgendem Bild sind die Resultate aus obiger Tabelle visualisiert:

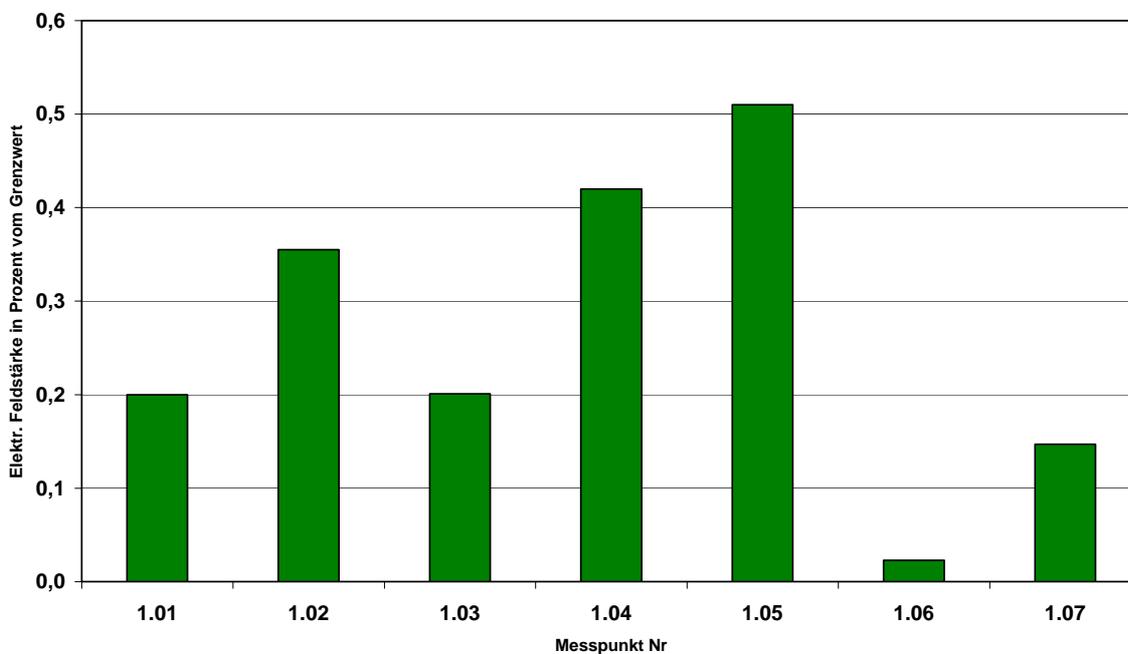


Bild 2.1b: Szenario 1: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

2.2 Maststandort im ländlichen Umfeld

Als hoch montierte Anlageninstallation im ländlichen Umfeld wurde für vorliegende Untersuchungen ein freistehender Mast ausgewählt. Er befindet sich in Rißtissen, Landkreis Ulm (Baden-Württemberg). Alle Messpunkte liegen ebenerdig auf derselben Höhe und haben freie Sicht zur Sendeanlage.

Bei der hier untersuchten Anlage handelt es sich um einen GSM-Mobilfunkstandort, an dem zusätzlich die WiMAX-Signale eines Betreibers (lizenzierter Frequenzbereich, Mobile WiMAX) über eine einzelne Sektorantenne in Richtung Rißtissen abgestrahlt werden. Der Mast befindet sich auf einem Sportgelände nördlich von Rißtissen. Die WiMAX-Antenne ist in etwa 39 Meter Höhe über Grund montiert. Da die Umgebung des Standortes einen sehr flachen Geländeverlauf aufweist, eignet sich dieser Bereich besonders gut für eine „Linienmessung“, um die Entfernungsabhängigkeit der Immission studieren zu können. Die Messungen wurden daher an Punkten entlang eines Feldwegs, der nahezu in horizontaler Hauptsenderichtung der WiMAX-Antenne verläuft, durchgeführt.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantenne, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt:

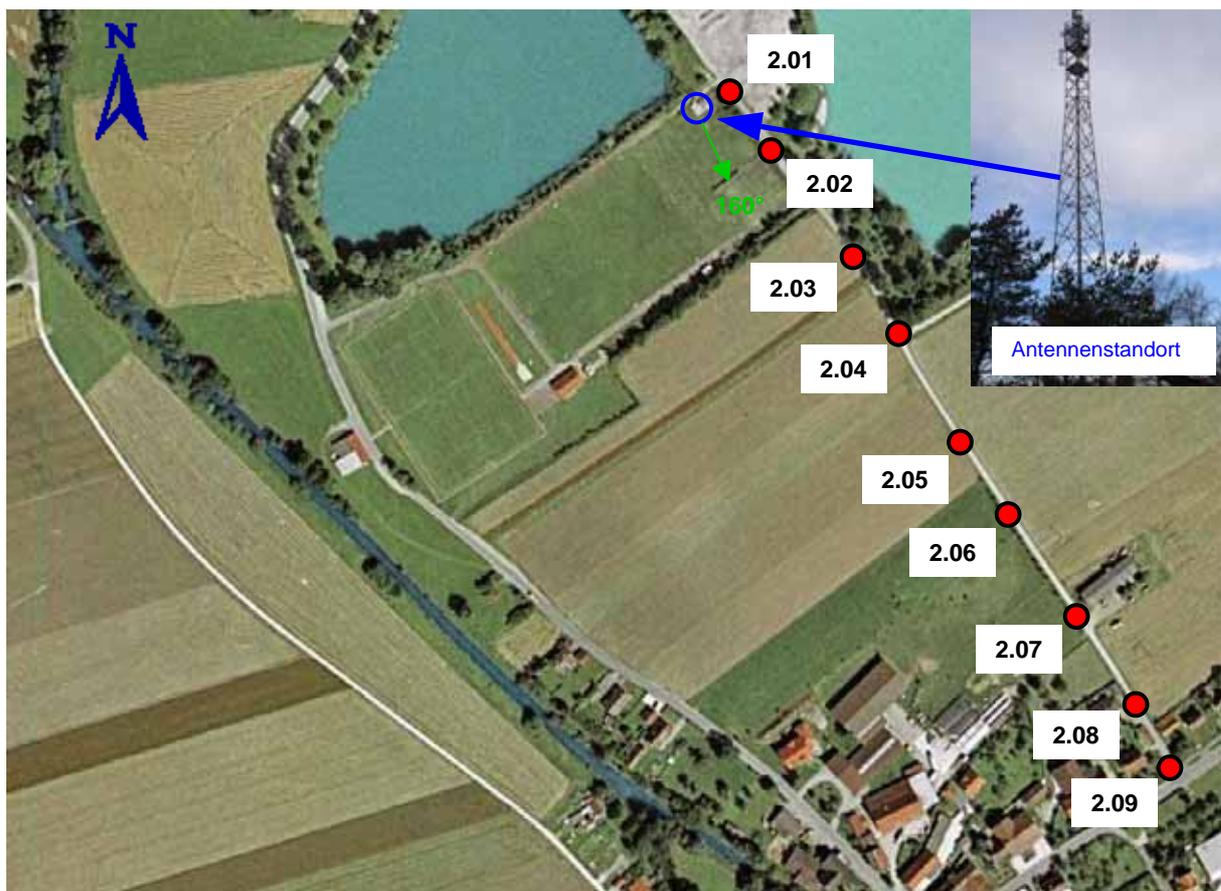


Bild 2.2a: Szenario 2: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung



Bild 2.2b: Szenario 2: Messpunkt 2.04 (links) bzw. Detailansicht der WiMAX-Antenne

Alle Messpunkte befanden sich im Freien. An allen Punkten bestand Sichtverbindung zu den Antennen. Die Messungen wurden bei trockenem Wetter durchgeführt. In folgender Tabelle werden die WiMAX-Immissionen für die neun Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 2.01 | 20 m | 0,06 | 0,10 | 9,0 |
| 2.02 | 65 m | 0,07 | 0,11 | 12,1 |
| 2.03 | 113 m | 0,13 | 0,21 | 43,0 |
| 2.04 | 175 m | 0,09 | 0,14 | 19,2 |
| 2.05 | 241 m | 0,10 | 0,16 | 24,8 |
| 2.06 | 300 m | 0,17 | 0,28 | 76,5 |
| 2.07 | 370 m | 0,14 | 0,23 | 50,5 |
| 2.08 | 433 m | 0,10 | 0,16 | 25,3 |
| 2.09 | 485 m | 0,13 | 0,21 | 45,0 |

Tabelle 2.2: Szenario 2: WiMAX-Exposition

In folgendem Bild ist die Entfernungsabhängigkeit der gemessenen Immission visualisiert:

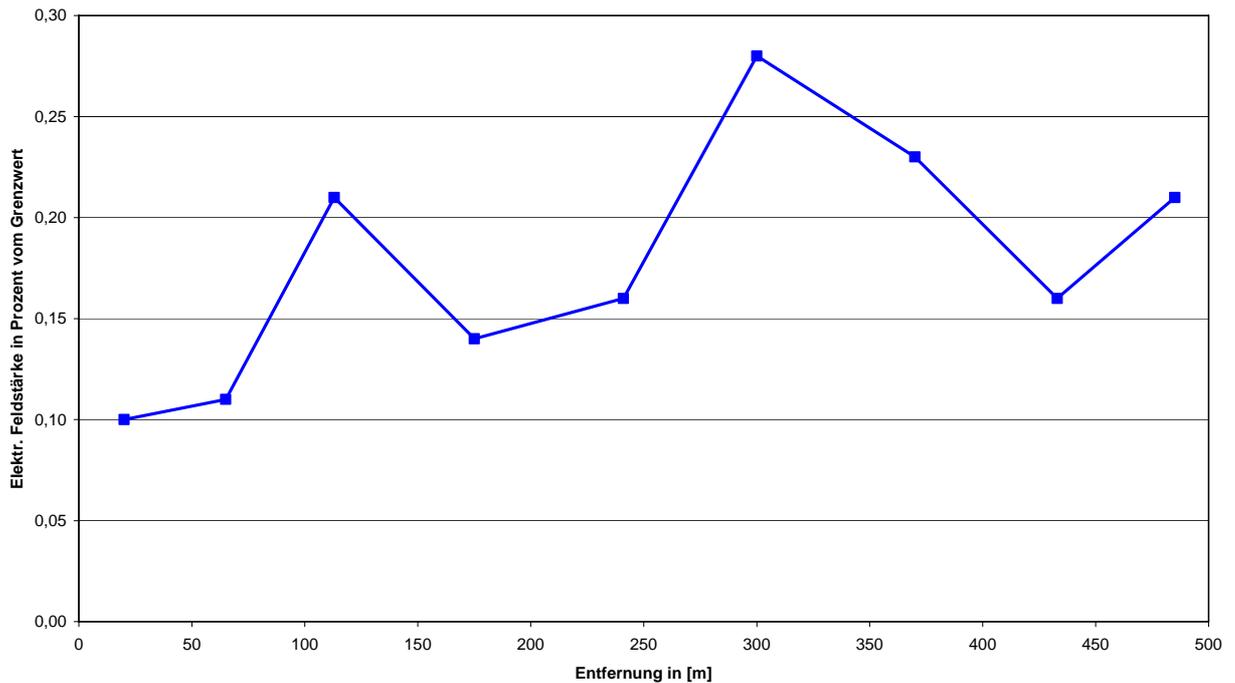


Bild 2.2c: Szenario 2: Grafische Darstellung der gefundenen Expositionswerte

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass die Immissionen bei größerem Abstand von der Anlage nicht stetig abnehmen, sondern sich unregelmäßig verhalten. Die lokalen Maxima sind vermutlich durch Nebenkeulen im Antennendiagramm bedingt. Da die Anlage mit 0 Grad Downtilt betrieben wird, ist im untersuchten Entfernungsbereich kein deutlich ausgeprägter Maximumbereich vorhanden, wie er bei Antennen mit größerem eingestellten Downtilt typisch auftritt. Interessant die Tatsache, dass in unmittelbarer Nähe des Standortes die geringsten Immissionen festgestellt wurden.

2.3 Vergleich WiMAX - UMTS im ländlichen Umfeld

Ein Vergleich zwischen den Immissionen, verursacht durch WiMAX bzw. UMTS, konnte an zwei Standorten in Elchingen, Landkreis Neu-Ulm (Bayern) durchgeführt werden. Gemessen wurden zunächst die Immissionen in der Umgebung einer freistehenden, niedrigen (8 m) WiMAX-Mastanlage am südlichen Ortsrand von Elchingen, in dessen Nachbarschaft auch noch eine UMTS-Anlage betrieben wird.

Bei der WiMAX-Anlage handelt es sich um einen Standort im lizenzierten Frequenzbereich (Mobile WiMAX) mit nur einer Sektorantenne, die in etwa nach Norden (340°) in Richtung des Ortsgebietes von Elchingen ausgerichtet ist. Der benachbarte UMTS-Standort (etwa 120 Meter südlich der WiMAX-Anlage) besteht, wie meist üblich, aus drei um 120° versetzt ausgerichteten Sektorantennen (Dachmontage in etwa 15 Meter Höhe über Grund). Folgendes Bild zeigt die beiden Standorte sowie die gewählten Messpunkte:

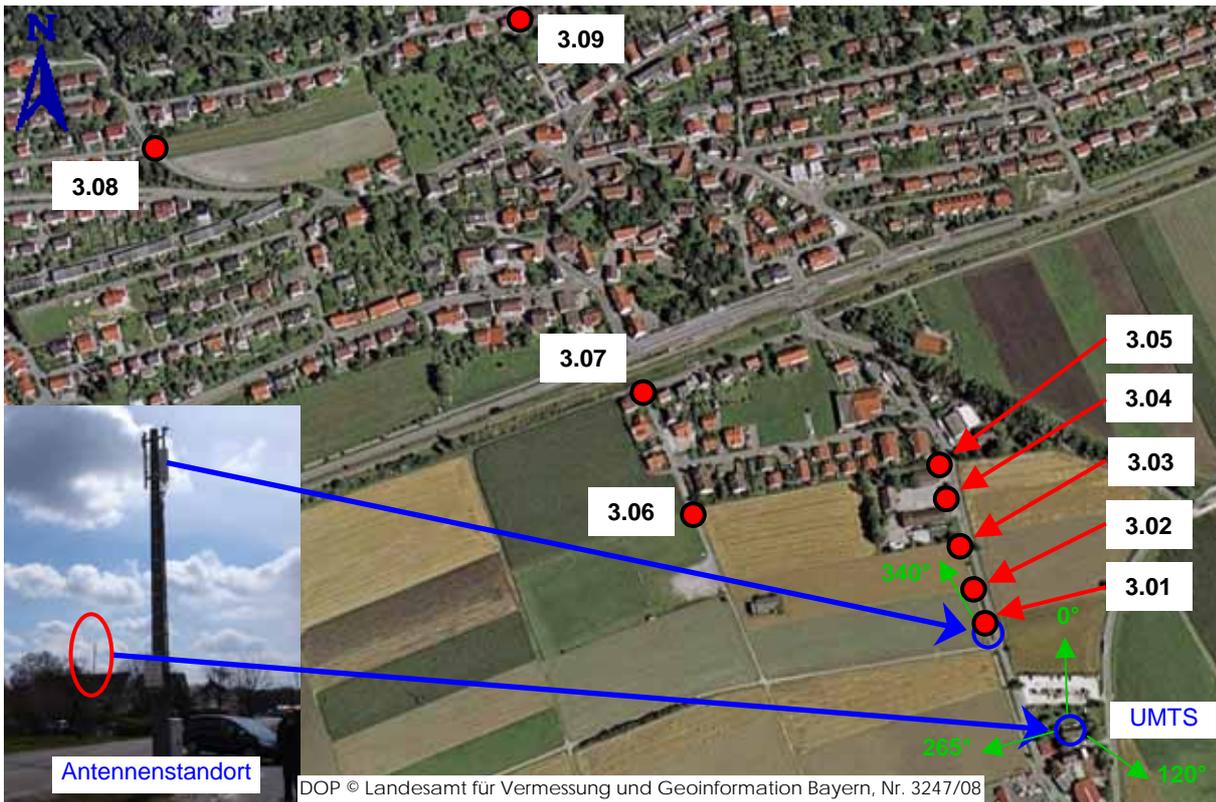


Bild 2.3a: Szenario 3: Lageplan mit Anlagenstandorten und Messpunktverteilung

Alle Messpunkte befanden sich im Freien. Die Messungen wurden bei trockenem Wetter durchgeführt. Mit Ausnahme von Punkt 3.07 bestand an allen Punkten Sichtverbindung zu den Antennen. In folgender Tabelle werden zunächst die WiMAX-Immissionen für die neun Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum WiMAX-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 3.01 | 5 m | 0,84 | 1,38 | 1.877,8 |
| 3.02 | 39 m | 0,48 | 0,78 | 607,7 |
| 3.03 | 85 m | 0,52 | 0,86 | 730,6 |
| 3.04 | 129 m | 0,12 | 0,20 | 38,3 |
| 3.05 | 164 m | 0,30 | 0,48 | 231,0 |
| 3.06 | 298 m | 0,27 | 0,44 | 192,2 |
| 3.07 | 400 m | 0,01 | 0,02 | 0,5 |
| 3.08 | 932 m | 0,14 | 0,23 | 52,9 |
| 3.09 | 746 m | 0,19 | 0,32 | 100,8 |

Tabelle 2.3a: Szenario 3: WiMAX-Exposition

Die Immission durch die UMTS-Signale vom Nachbarstandort ist in einer zweiten Tabelle dargestellt:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum UMTS-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 3.01 | 125 m | 0,47 | 0,77 | 588,4 |
| 3.02 | 159 m | 0,37 | 0,61 | 368,0 |
| 3.03 | 205 m | 0,22 | 0,36 | 127,0 |
| 3.04 | 249 m | 0,22 | 0,36 | 130,7 |
| 3.05 | 280 m | 0,25 | 0,41 | 165,8 |
| 3.06 | 405 m | 0,44 | 0,73 | 521,8 |
| 3.07 | 515 m | 0,07 | 0,12 | 14,3 |
| 3.08 | 1.051 m | 0,29 | 0,48 | 227,1 |
| 3.09 | 869 m | 0,16 | 0,27 | 71,2 |

Tabelle 2.3b: Szenario 3: UMTS-Exposition

An fünf von neun Messpunkten dominieren die WiMAX-Immissionen. Betrachtet man allerdings den mittleren Unterschiedsfaktor zwischen UMTS- und WiMAX so überwiegt UMTS leicht mit ca. 1,5 dB. Bei UMTS-Systemen (2 Kanäle) wird typisch mit etwa 30 bis 40 Watt Sendeleistung pro Sektor gearbeitet, die hier installierte WiMAX-Anlage besitzt hingegen eine Sendeleistung von etwa 12 Watt. Der Leistungsunterschied beträgt somit etwa 4 bis 5 dB, was sich auch an einigen Messpunkten in den Immissionswerten widerspiegelt. Zu beachten ist jedoch, dass die WiMAX- und UMTS-Anlage sich nicht am selben Standort befinden (ca. 120 Meter Abstand von einander), so dass der Immissionsvergleich hier nur eingeschränkt aussagekräftig ist.

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert:

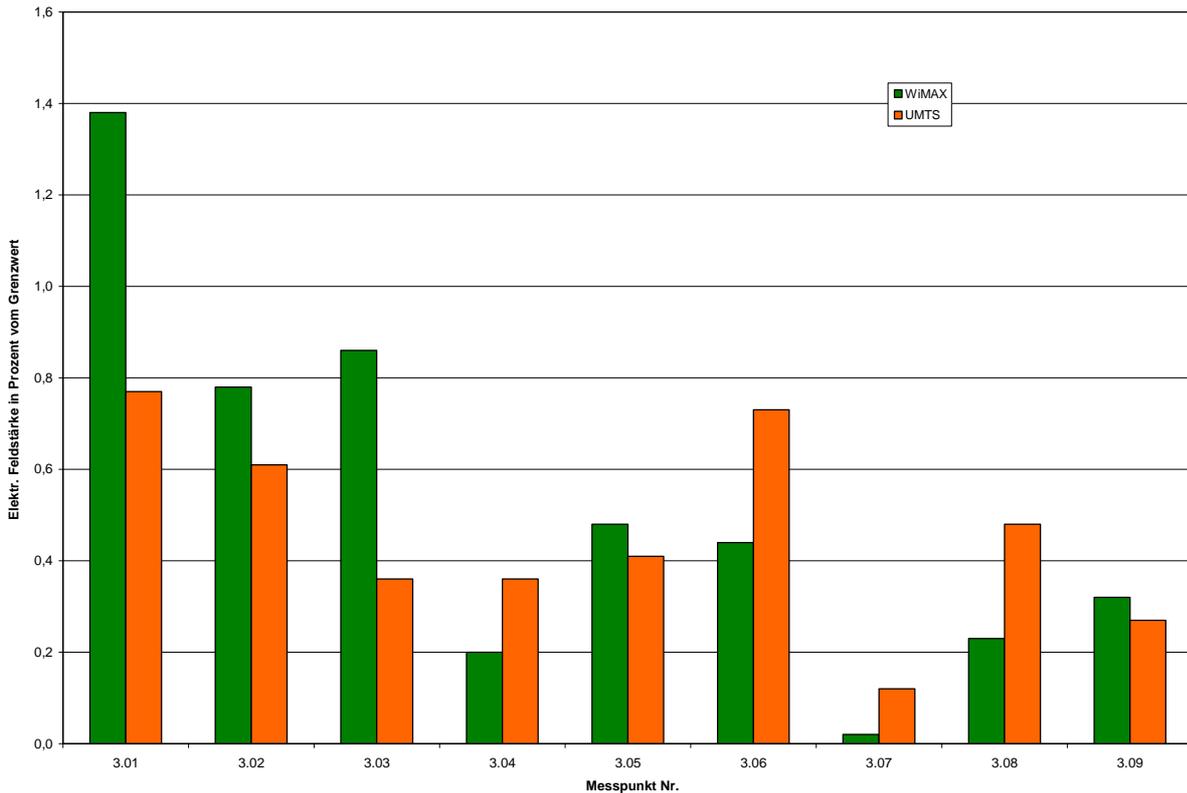


Bild 2.3b: Szenario 3: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

2.4 Vergleich WiMAX - UMTS in einem Gewerbegebiet

Der zweite Standort in Elchingen, Landkreis Neu-Ulm (Bayern) befindet sich in einem Gewerbegebiet. Im Gegensatz zum vorangegangenen Szenario befinden sich hier die WiMAX-Antennen und die UMTS-Antennen auf dem selben Gebäudedach.

Bei der WiMAX-Anlage handelt es sich um einen Standort im lizenzierten Frequenzbereich (Mobile WiMAX) mit zwei Sektorantennen, die nach Norden (0°) bzw. Nordosten (60°) ausgerichtet sind (Montagehöhe: ca. 15 Meter über Grund). Die UMTS-Antennen sind nach 30°, 140° und 260° ausgerichtet (Montagehöhe: ca. 17 Meter über Grund). Folgendes Bild zeigt die Lage des Standortes sowie der Messpunkte:

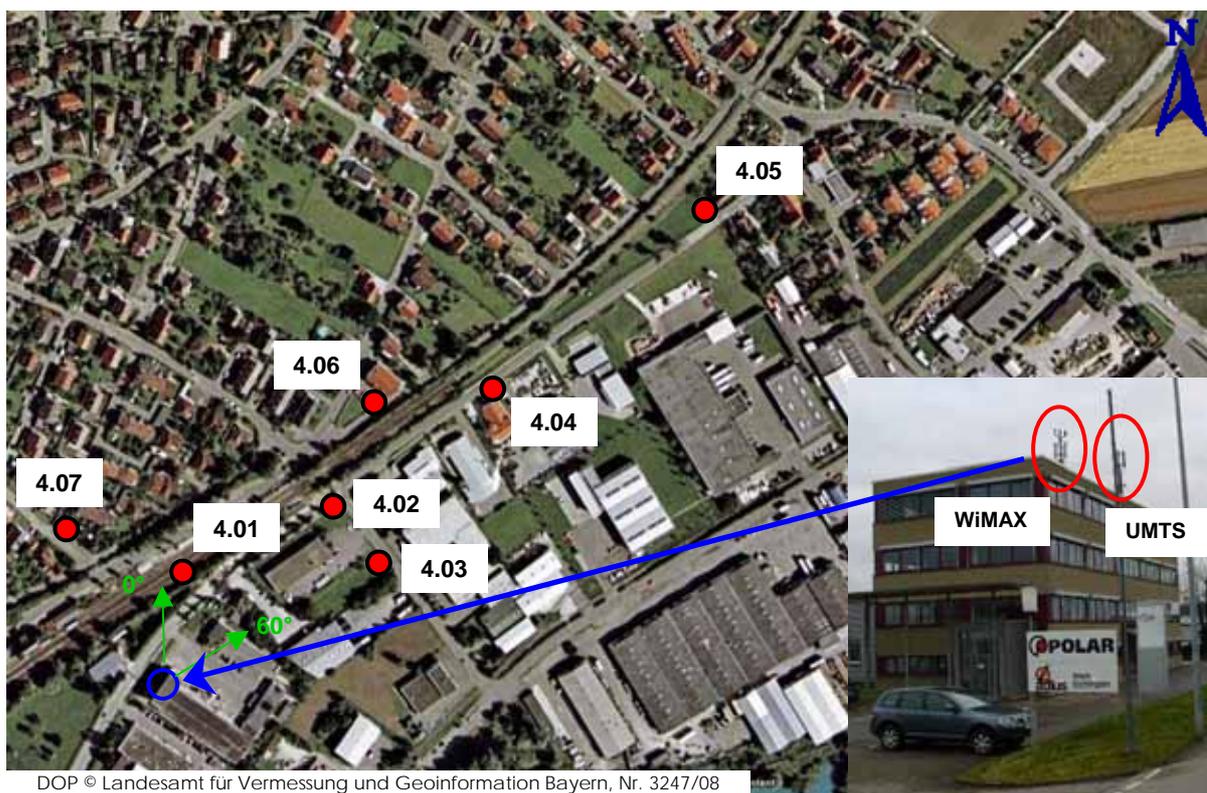


Bild 2.4a: Szenario 4: Lageplan mit Anlagenstandort (Ausrichtung der WiMAX-Antennen) und Messpunktverteilung

Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien in Bodennähe. Es bestand von allen Punkten Sichtverbindung zu den Antennen. In folgender Tabelle werden zunächst die WiMAX-Immissionen für die sieben Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum WiMAX-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 4.01 | 83 m | 0,24 | 0,39 | 150,7 |
| 4.02 | 174 m | 0,26 | 0,43 | 184,1 |
| 4.03 | 195 m | 0,19 | 0,31 | 97,0 |
| 4.04 | 330 m | 0,04 | 0,07 | 5,3 |
| 4.05 | 552 m | 0,14 | 0,24 | 55,1 |
| 4.06 | 224 m | 0,13 | 0,21 | 45,3 |
| 4.07 | 233 m | 0,45 | 0,74 | 534,5 |

Tabelle 2.4a: Szenario 4: WiMAX-Exposition

Die Immission durch die UMTS-Signale vom betrachteten Standort ist in einer zweiten Tabelle dargestellt:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum UMTS-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 4.01 | 97 m | 0,68 | 1,11 | 1.215,3 |
| 4.02 | 190 m | 1,19 | 1,95 | 3.755,7 |
| 4.03 | 210 m | 1,52 | 2,48 | 6.091,0 |
| 4.04 | 344 m | 0,43 | 0,71 | 495,1 |
| 4.05 | 567 m | 0,72 | 1,18 | 1.363,6 |
| 4.06 | 233 m | 0,54 | 0,88 | 766,8 |
| 4.07 | 244 m | 0,62 | 1,02 | 1.034,4 |

Tabelle 2.4b: Szenario 4: UMTS-Exposition

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert:

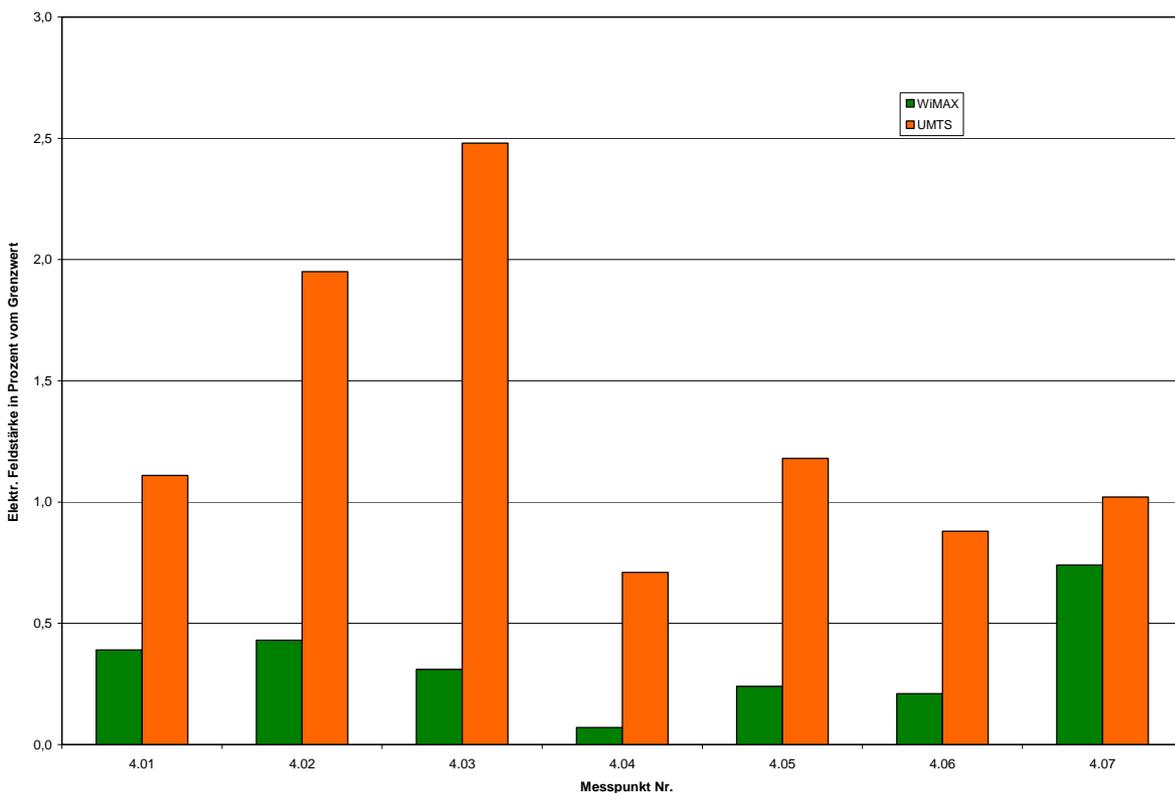


Bild 2.4b: Szenario 4: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Es dominieren hier an allen Messpunkten deutlich die UMTS-Immissionen. Der mittlere Unterschiedsfaktor zwischen UMTS- und WiMAX beträgt ca. 12,8 dB. Dieser wird sicherlich nicht nur durch den Sendeleistungsunterschied, sondern auch durch unterschiedliche Antennencharakteristiken verursacht.

2.5 Vergleich WiMAX - UMTS an einer hoch montierten Anlage im Stadtinnenbereich

Als hoch montierte Anlageninstallation im Stadtinnenbereich wurde für vorliegende Untersuchungen eine Anlage in Wuppertal ausgesucht. Bei der hier untersuchten Anlage handelt es sich um einen Standort, an dem die WiMAX-Signale des Betreibers Deutsche Breitband Dienste GmbH (DBD) im lizenzierten Frequenzbereich bei etwa 3,5 GHz über drei Sektoren abgestrahlt werden. Als System wird Fixed WiMAX im FDD-Mode verwendet. Der Standort befindet sich auf dem Bethesda-Krankenhaus in Wuppertal in etwa 25 Meter Höhe.

Auf dem Standort waren zusätzlich mehrere Mobilfunksysteme, darunter auch ein UMTS-System, vorhanden.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.

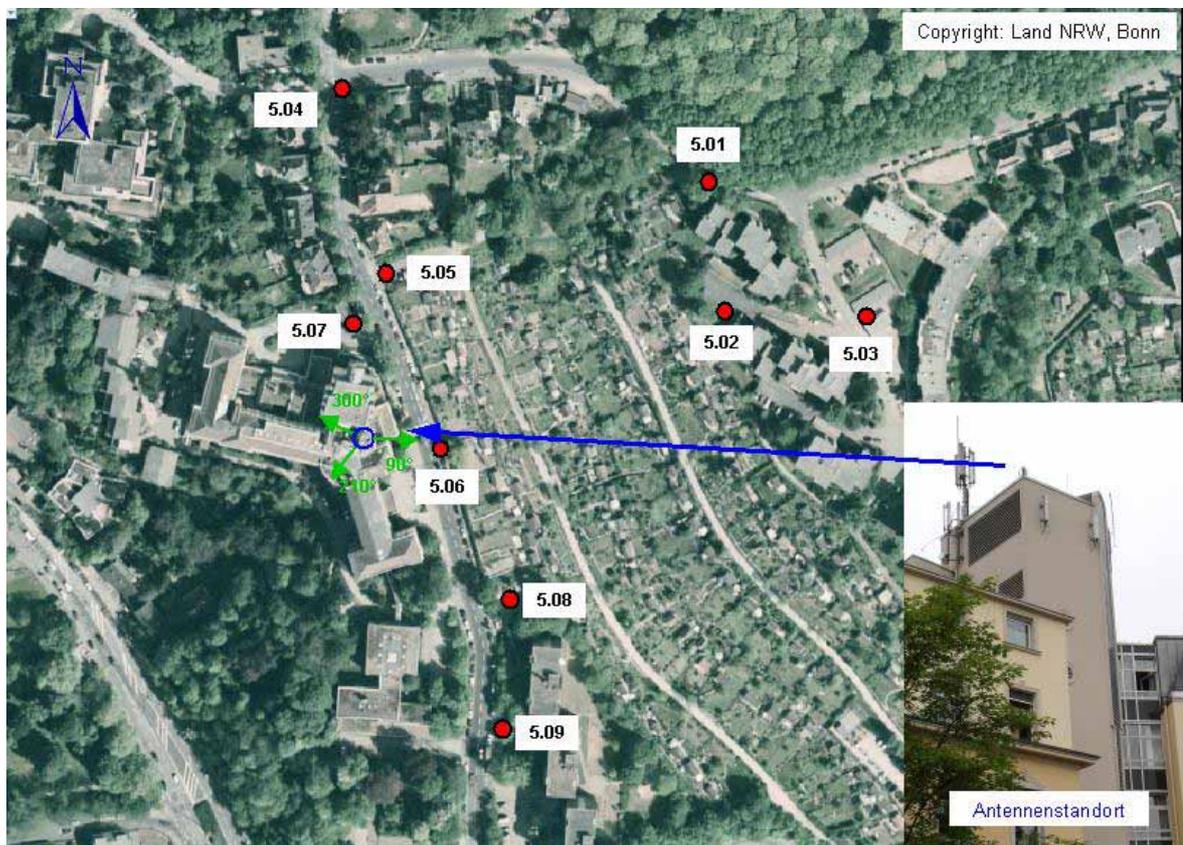


Bild 2.5a: Szenario 5: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Die Messungen wurden an Punkten in der näheren Umgebung (ca. 35 bis 230 Meter Entfernung, mit und ohne Sicht zur Anlage) des Standortes in Wohngebieten durchgeführt. Von den Messpunkten 5.01, 5.02, 5.04, 5.05 und 5.08 bestand Sicht zur Anlage; die anderen Messpunkte hatten keine bzw. eingeschränkte Sicht. Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien.

In folgender Tabelle werden die WiMAX-Immissionen für die neun Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum WiMAX-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 5.01 | 192 m | 0,16 | 0,27 | 71,8 |
| 5.02 | 174 m | 0,22 | 0,37 | 133,2 |
| 5.03 | 230 m | 0,01 | 0,02 | 0,3 |
| 5.04 | 150 m | 0,12 | 0,20 | 40,5 |
| 5.05 | 78 m | 0,03 | 0,05 | 2,4 |
| 5.06 | 46 m | 0,04 | 0,07 | 5,2 |
| 5.07 | 35 m | 0,03 | 0,06 | 3,1 |
| 5.08 | 108 m | 0,05 | 0,08 | 6,7 |
| 5.09 | 160 m | 0,01 | 0,02 | 0,4 |

Tabelle 2.5a: Szenario 5: WiMAX-Exposition

Die Immission durch die UMTS-Signale vom betrachteten Standort (Sektorausrichtungen 0°, 90° und 260°) ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum UMTS-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 5.01 | 192 m | 1,20 | 1,97 | 3847,2 |
| 5.02 | 174 m | 1,71 | 2,80 | 7716,2 |
| 5.03 | 230 m | 0,21 | 0,34 | 115,3 |
| 5.04 | 150 m | 1,86 | 3,06 | 9213,8 |
| 5.05 | 78 m | 0,34 | 0,55 | 299,0 |
| 5.06 | 46 m | 0,61 | 0,99 | 975,1 |
| 5.07 | 35 m | 0,31 | 0,51 | 261,5 |
| 5.08 | 108 m | 0,20 | 0,32 | 102,6 |
| 5.09 | 160 m | 0,11 | 0,18 | 30,8 |

Tabelle 2.5b: Szenario 5: UMTS-Exposition

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert:

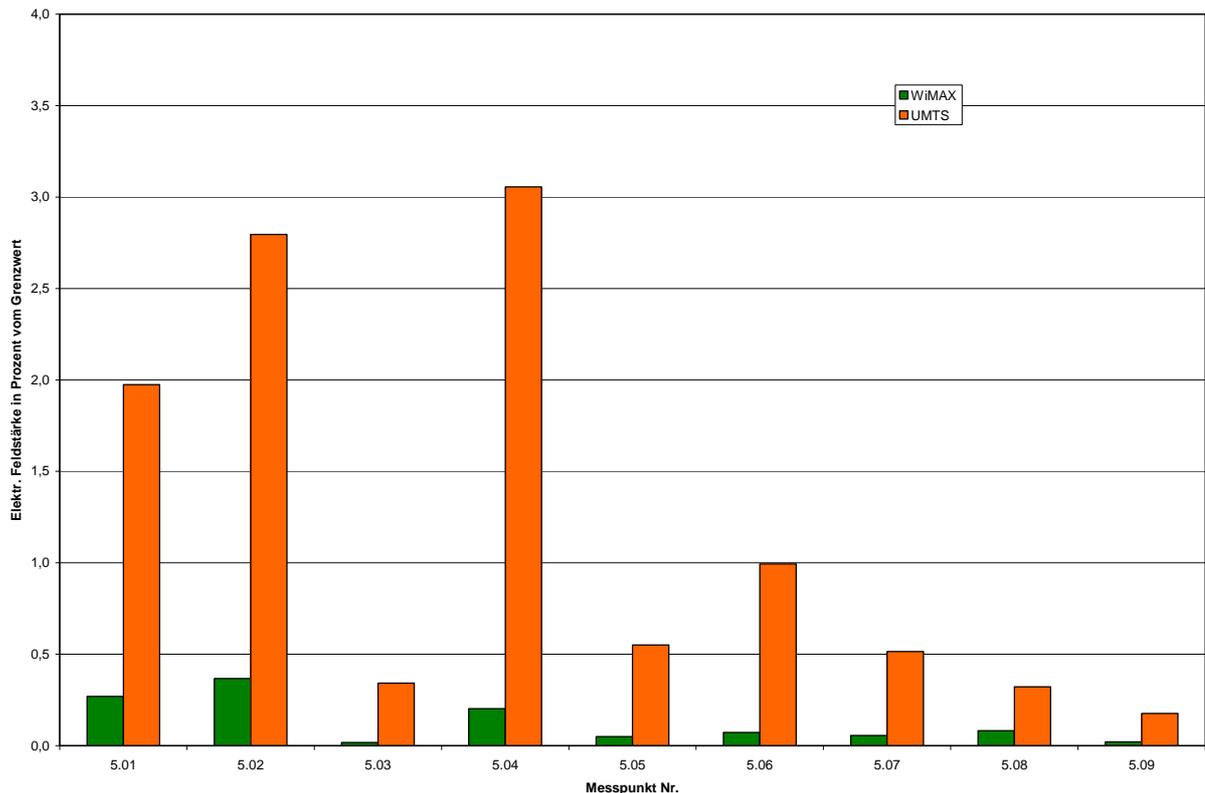


Bild 2.5b: Szenario 5: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Es dominieren hier an allen Messpunkten deutlich die UMTS-Immissionen. Der mittlere Unterschiedsfaktor zwischen UMTS- und WiMAX beträgt ca. 20 dB.

2.6 Vergleich WiMAX - UMTS an einer hoch montierten Anlage im Stadtrandbereich

Auch an einer zweiten hoch montierten Anlage im städtischen Umfeld lässt sich ein direkter Vergleich zwischen den durch WiMAX- und UMTS-Anlagen hervorgerufenen Immissionen durchführen, da beide Systeme auf ein und demselben Standort montiert sind.

Die Anlagen befinden sich auf dem Dach eines Wohnhauses in etwa 28 Meter Höhe über Grund. Bei der WiMAX-Anlage handelt es sich ebenfalls um eine Anlage der Deutschen Breitband Dienste GmbH (DBD) im lizenzierten Frequenzbereich bei etwa 3,5 GHz. Als System wird Fixed WiMAX im FDD-Mode verwendet.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in Bild 2.6a dargestellt.

Die Messungen wurden an Punkten in der näheren Umgebung (ca. 18 bis 240 Meter Entfernung, mit und ohne Sicht zur Anlage) des Standortes in Wohngebieten durchgeführt. Von den Messpunkten 6.01, 6.03, 6.04, 6.05 und 6.07 bestand Sichtverbindung zur Anlage; die anderen Messpunkte hatten keine Sicht. Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien.

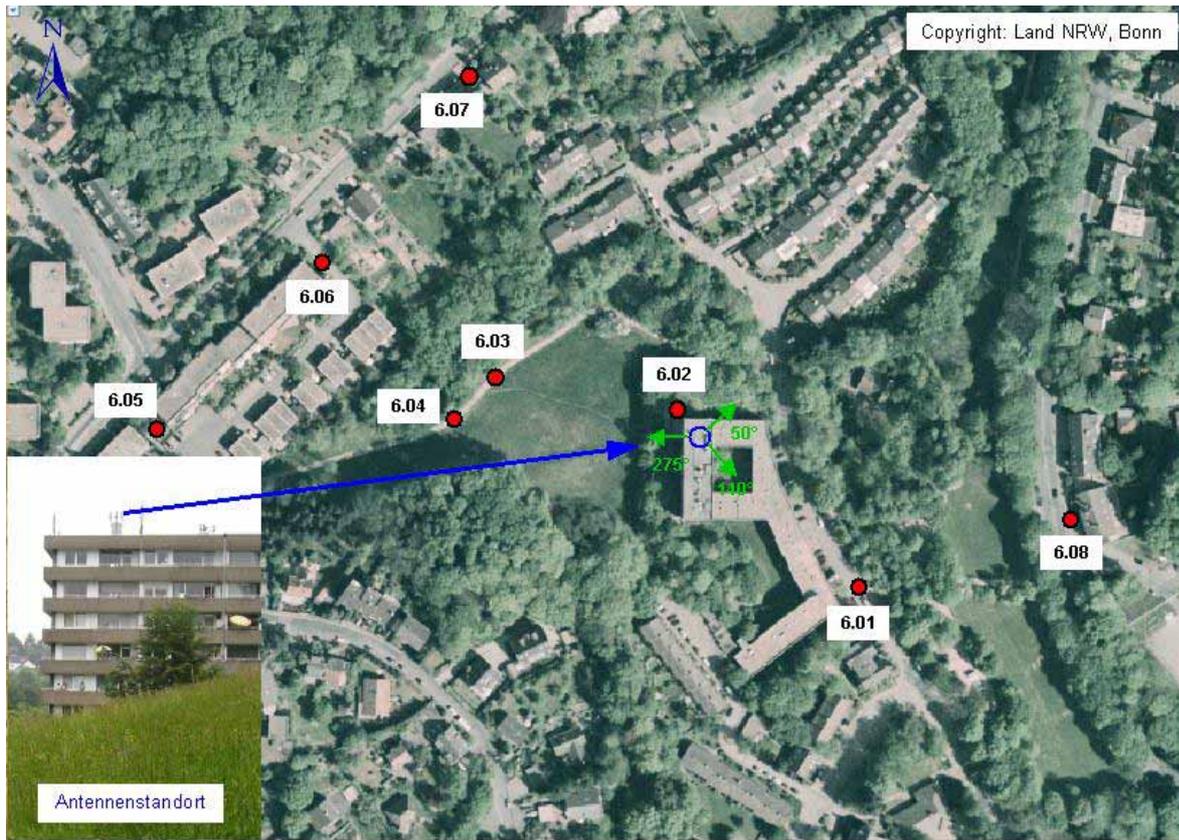


Bild 2.6a: Szenario 6: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

In folgender Tabelle werden die WiMAX-Immissionen für die acht Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum WiMAX-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 6.01 | 100 m | 0,02 | 0,04 | 1,6 |
| 6.02 | 18 m | 0,01 | 0,02 | 0,4 |
| 6.03 | 79 m | 0,06 | 0,09 | 8,5 |
| 6.04 | 117 m | 0,28 | 0,46 | 206,2 |
| 6.05 | 236 m | 0,13 | 0,21 | 41,5 |
| 6.06 | 190 m | 0,04 | 0,06 | 3,5 |
| 6.07 | 217 m | 0,06 | 0,10 | 9,6 |
| 6.08 | 170 m | 0,01 | 0,02 | 0,5 |

Tabelle 2.6a: Szenario 6: WiMAX-Exposition

Die Immission durch die UMTS-Signale vom betrachteten Standort (Sektorausrichtungen 60°, 150° und 310°) wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum UMTS-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 6.01 | 100 m | 0,29 | 0,47 | 215,6 |
| 6.02 | 18 m | 0,11 | 0,18 | 32,6 |
| 6.03 | 79 m | 0,82 | 1,35 | 1793,3 |
| 6.04 | 117 m | 0,30 | 0,50 | 241,9 |
| 6.05 | 236 m | 0,61 | 1,00 | 985,5 |
| 6.06 | 190 m | 0,60 | 0,99 | 963,1 |
| 6.07 | 217 m | 1,23 | 2,02 | 4014,8 |
| 6.08 | 170 m | 0,40 | 0,65 | 420,4 |

Tabelle 2.6b: Szenario 6: UMTS-Exposition

In folgendem Bild sind die Resultate aus den obigen beiden Tabellen visualisiert:

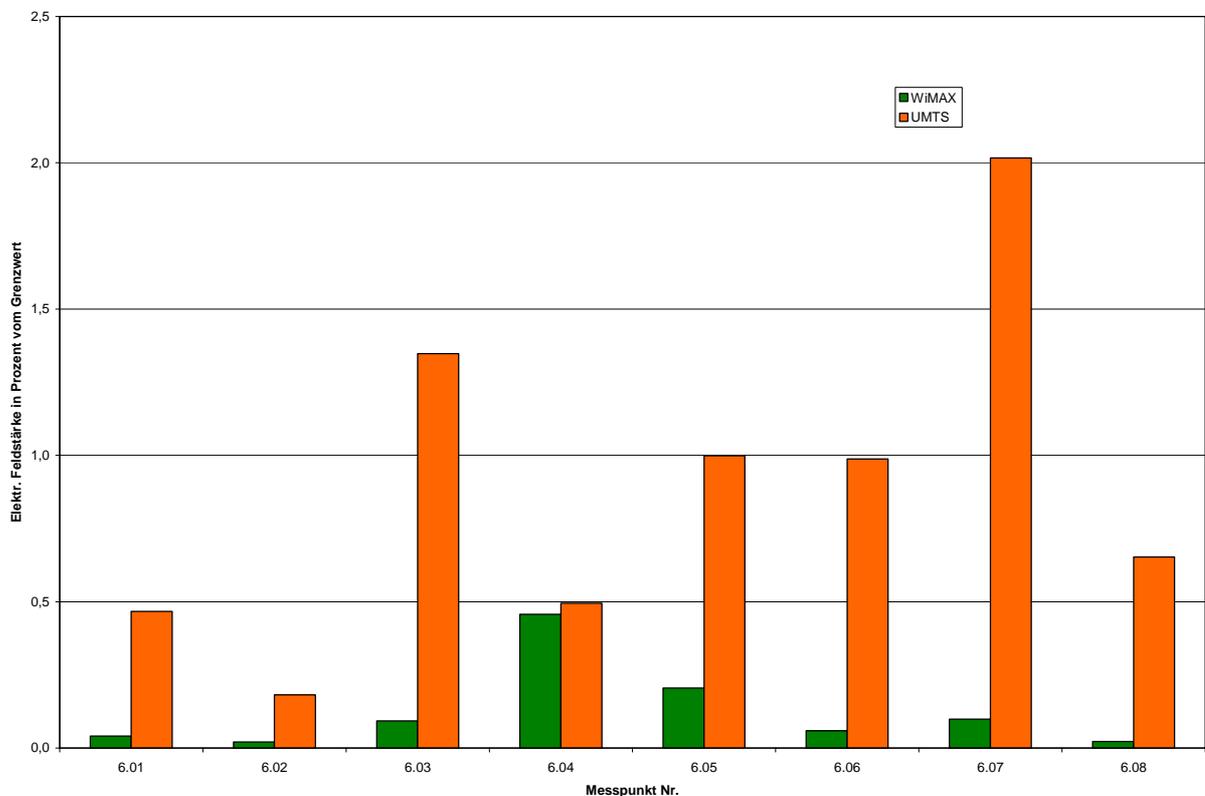


Bild 2.6b: Szenario 6: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Es dominieren hier an allen Messpunkten deutlich die UMTS-Immissionen. Der mittlere Unterschiedsfaktor zwischen UMTS und WiMAX beträgt wie bereits im Szenario 5 ca. 20 dB.

2.7 Ortsversorgung im ländlichen Umfeld

Als Anlage für eine Ortsversorgung in ländlicher Umgebung wurde für vorliegende Untersuchungen eine Anlage in Wadrill (Saarland) ausgesucht. Hier betreibt die Firma VSE Net auf Frequenzen der Inquam Broadband GmbH eine Anlage mit drei Sektoren im lizenzierten Frequenzbereich bei etwa 3,5 GHz. Als System wird Mobile WiMAX verwendet. Der Standort befindet sich auf einem Gebäudedach in etwa 16 Meter Höhe.

Die nähere Umgebung des Standortes, die horizontale Ausrichtung der Sendeantennen, sowie die Lage der Messpunkte sind in folgendem Bild dargestellt.



Bild 2.7a: Szenario 7: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Die Messungen wurden an Punkten in der näheren und weiteren Umgebung (ca. 11 Meter bis über einem Kilometer Entfernung, mit und ohne Sicht zur Anlage) des Standortes in Wohngebieten durchgeführt.

Von den Messpunkten 7.02, 7.07 und 7.09 bestand keine Sichtverbindung zur Anlage, alle anderen Punkte hatten Sicht. Wohingegen die Messpunkte 7.01 bis 7.05 sowie 7.10 sich im Freien befanden, waren die Messpunkte 7.06 bis 7.09 innerhalb von Gebäuden.

In folgender Tabelle werden die WiMAX-Immissionen für die zehn Punkte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum WiMAX-Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 7.01 | 11 m | 0,31 | 0,50 | 249,9 |
| 7.02 | 30 m | 0,07 | 0,12 | 13,8 |
| 7.03 | 109 m | 0,23 | 0,38 | 144,3 |
| 7.04 | 277 m | 0,01 | 0,02 | 0,6 |
| 7.05 | 270 m | 0,03 | 0,04 | 2,0 |
| 7.06 | 1260 m | 0,00 | 0,01 | 0,0 |
| 7.07 | 417 m | 0,02 | 0,03 | 0,9 |
| 7.08 | 417 m | 0,07 | 0,11 | 12,2 |
| 7.09 | 140 m | 0,02 | 0,03 | 0,7 |
| 7.10 | 132 m | 0,08 | 0,13 | 17,6 |

Tabelle 2.7: Szenario 7: WiMAX-Exposition

In folgendem Bild sind die Resultate aus Tabelle 2.7 visualisiert:

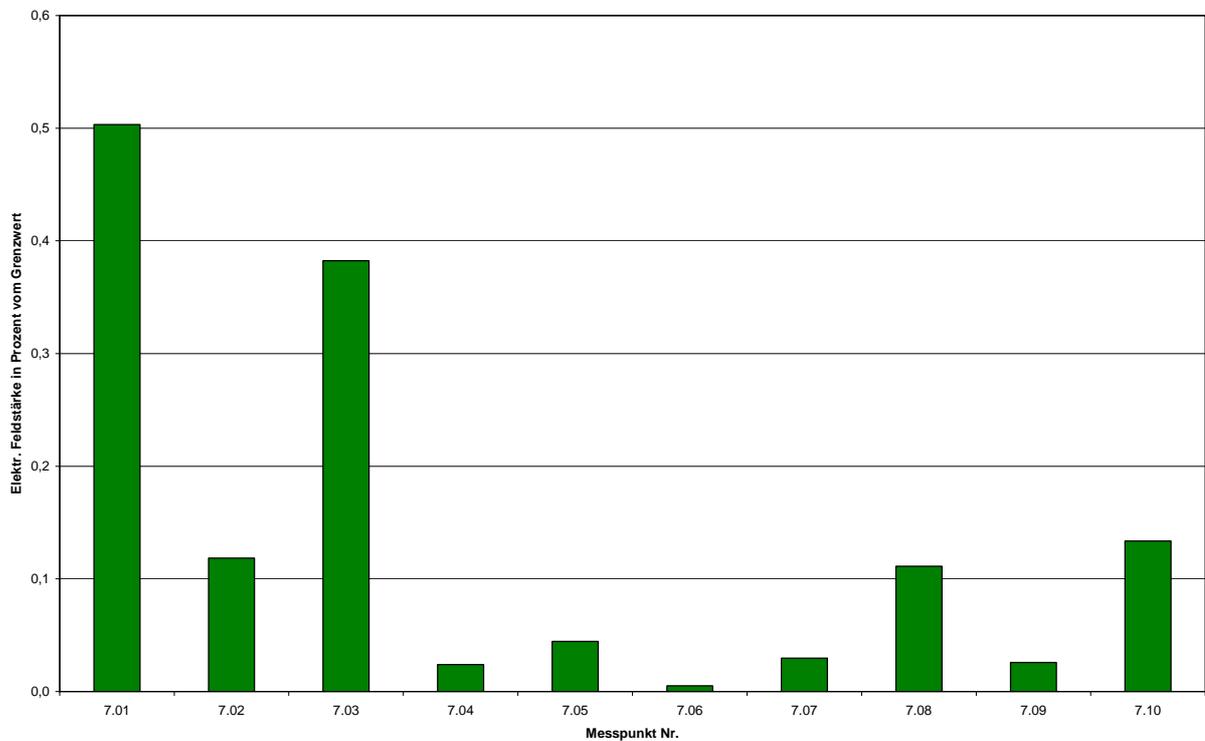


Bild 2.7b: Szenario 7: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Die geringsten Immissionen wurden am Messpunkt in 1.260 Meter Entfernung gemessen. Auch die Messpunkte MP 7.07 und MP 7.09 weisen eine vergleichsweise niedrige Exposition auf, was durch die fehlende Sichtverbindung sowie durch die Lage im Gebäudeinneren zurückzuführen ist.

2.8 Ortsversorgung durch außerhalb liegenden Dachstandort

In den folgenden vier Abschnitten werden Messungen an verschiedenen Szenarien in der Umgebung von WiMAX-Sendeanlagen im lizenzfreien Frequenzbereich (alle Fixed WiMAX) vorgestellt, die beispielsweise in Bayern bereits eine nicht unerhebliche Anzahl von Gemeinden mit Breitbanddiensten versorgen. Zunächst werden Messungen in der Umgebung von zwei Standorten vorgestellt, die eine Ortschaft bzw. ein Wohngebiet von außen versorgen:

In Bild 2.8a ist zunächst die Situation für den Ort Mertenberg, Landkreis Amberg-Sulzbach (Bayern) dargestellt, bei dem die Versorgung durch eine Sektorantenne (Richtung 120°) sichergestellt wird, die etwa 550 Meter vom Ortsrand von Mertenberg entfernt auf einem Gebäudedach in ungefähr 10 Meter Höhe über Grund montiert ist.

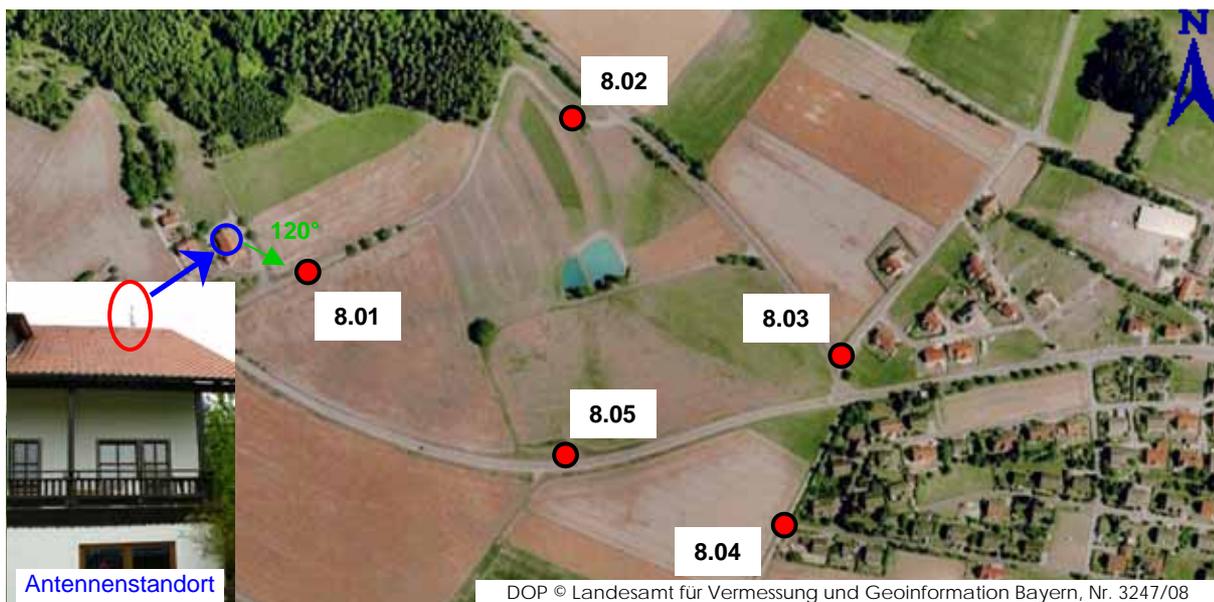


Bild 2.8a: Szenario 8a: Lageplan mit Anlagenstandort (Ausrichtung der WiMAX-Antenne) und Messpunktverteilung

Ein ähnliches Szenario findet sich in Feilersdorf, Landkreis Neustadt a. d. Waldnaab (Bayern). Hier werden vom Dach eines Gebäudes aus unter anderem eine Reihe von relativ neuen Wohnhäusern mit WiMAX versorgt. Als Antenne wird hier jedoch ein Rundstrahler verwendet. Die Montagehöhe der Antenne beträgt etwa 12 Meter über Grund.

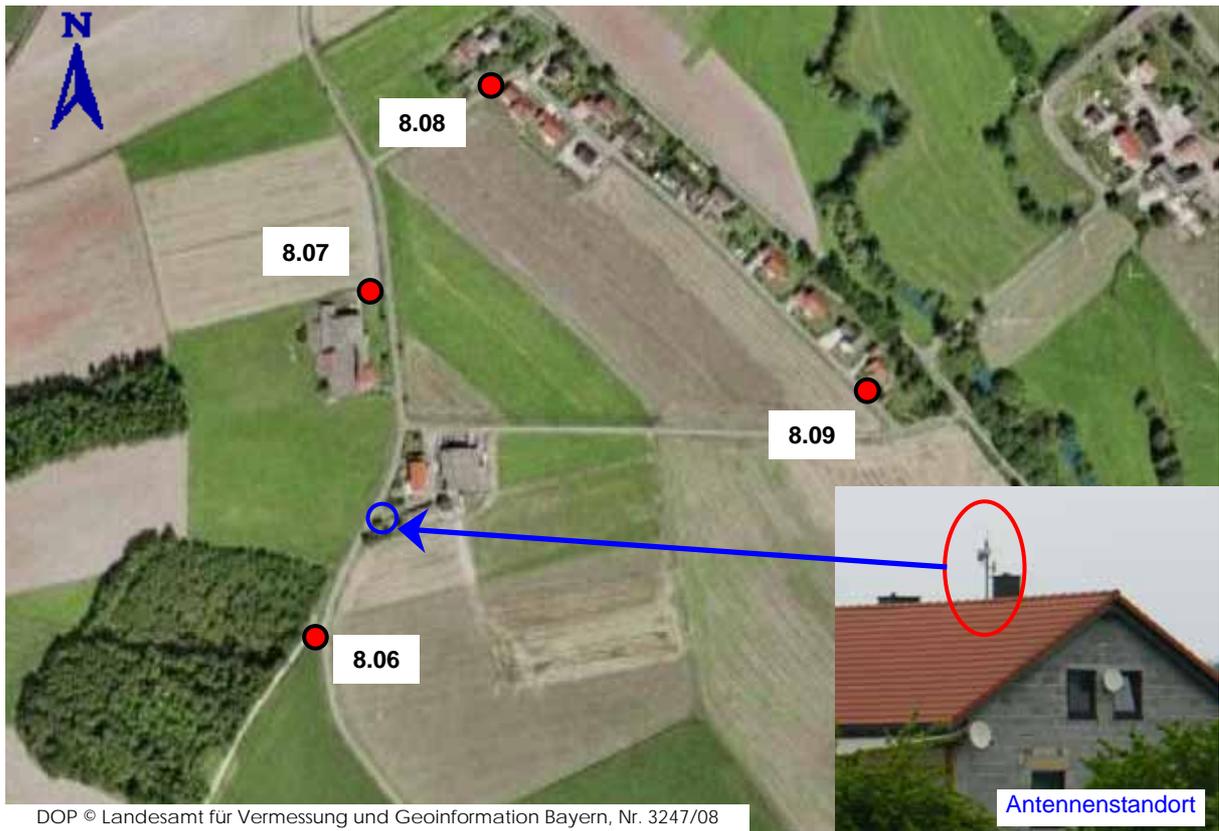


Bild 2.8b: Szenario 8b: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien in Bodennähe. In folgender Tabelle sind die Immissionen für die Messpunkte (immer mit Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne) in der Umgebung dieser beiden Standorte angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 8.01 | 83 m | 0,005 | 0,008 | 0,07 |
| 8.02 | 333 m | 0,011 | 0,017 | 0,30 |
| 8.03 | 625 m | 0,008 | 0,012 | 0,15 |
| 8.04 | 560 m | 0,006 | 0,009 | 0,09 |
| 8.05 | 435 m | 0,009 | 0,014 | 0,20 |
| 8.06 | 113 m | 0,005 | 0,008 | 0,07 |
| 8.07 | 128 m | 0,008 | 0,013 | 0,18 |
| 8.08 | 263 m | 0,003 | 0,005 | 0,03 |
| 8.09 | 280 m | 0,003 | 0,005 | 0,03 |

Tabelle 2.8: Szenario 8: WiMAX-Exposition

Folgendes Bild visualisiert die Resultate aus den obigen beiden Tabellen:

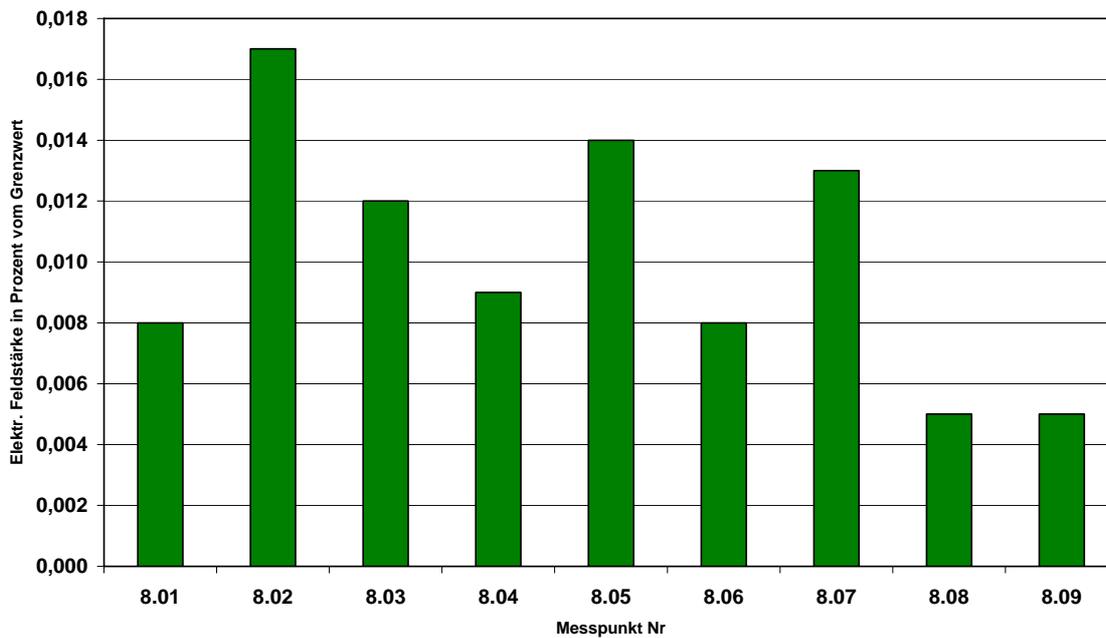


Bild 2.8c: Szenario 8: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Im Vergleich zu den bisher dokumentierten Messergebnissen treten in der Umgebung der lizenzfreien Systeme offensichtlich deutlich geringere Immissionen auf.

2.9 Versorgung mehrerer Ortschaften durch einen außerhalb liegenden Standort

Ein weiteres untersuchtes Szenario einer lizenzfreien WiMAX-Versorgung besteht aus einem im Außenbereich liegenden Standort, der einige umliegende Ortschaften versorgt. Es handelt sich dabei um einen Standort mit einer Rundstrahlantenne in etwa 12 Meter Höhe über Grund auf dem Dach eines Lagergebäudes in der Nähe von Preißach, Landkreis Neustadt an der Waldnaab (Bayern). Folgende Abbildung zeigt die Situation vor Ort und die Lage der Messpunkte:

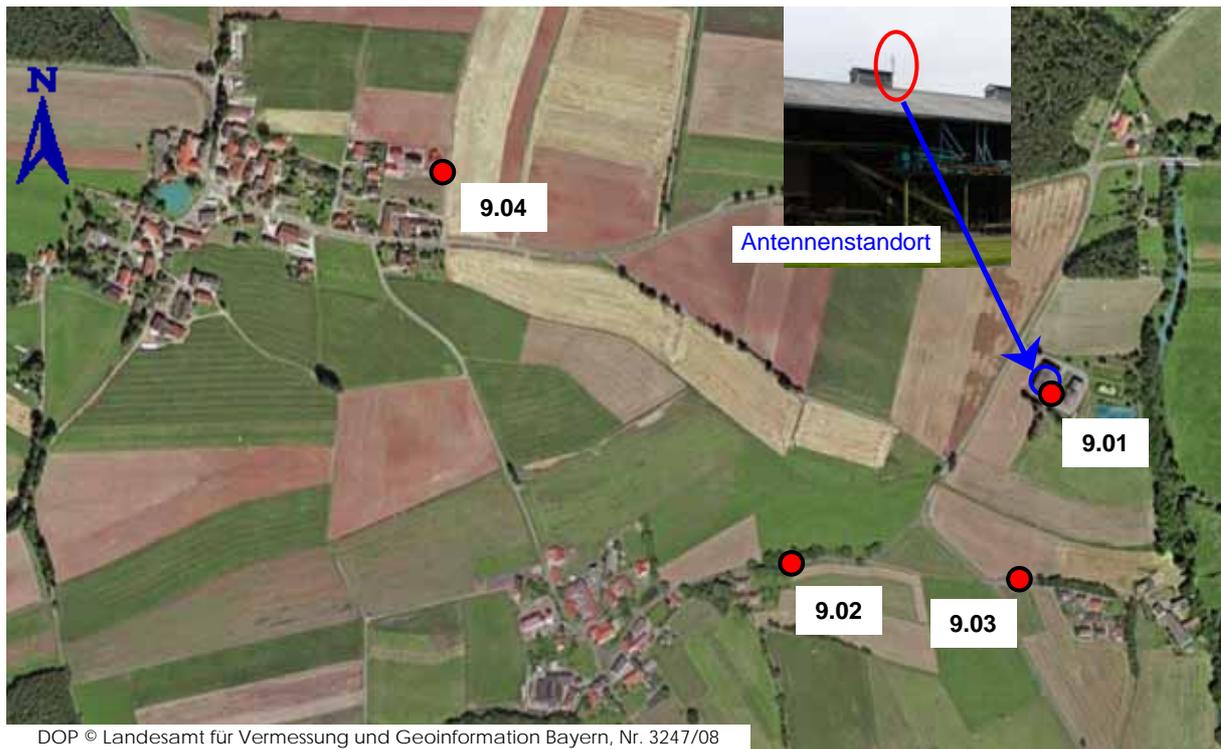


Bild 2.9a: Szenario 9: Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien in Bodennähe. In folgender Tabelle sind die Immissionen für die Messpunkte (immer mit Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne) in der Umgebung dieses Standorts angegeben:

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 9.01 | 45 m | 0,008 | 0,014 | 0,19 |
| 9.02 | 382 m | 0,003 | 0,006 | 0,03 |
| 9.03 | 285 m | 0,003 | 0,005 | 0,02 |
| 9.04 | 910 m | 0,002 | 0,004 | 0,01 |

Tabelle 2.9: Szenario 9: WiMAX-Exposition

Folgendes Bild visualisiert die Resultate aus obiger Tabelle:

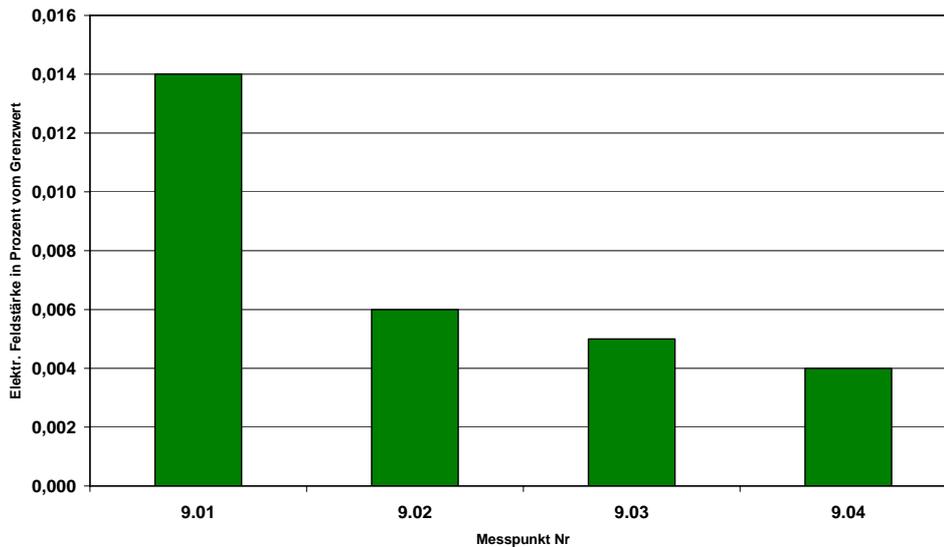


Bild 2.9b: Szenario 9: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

2.10 Versorgung durch zwei Dachstandorte in einem Wohngebiet

In diesem Szenario wird die Gemeinde Aiglsbach (Landkreis Kelheim, Bayern) durch zwei Dachstandorte mit WiMAX-Signalen im lizenzfreien Frequenzbereich versorgt, die sich auf den Dächern von Wohnhäusern in relativ neuen Wohngebieten befinden. Als Sendeantenne wird jeweils ein Rundstrahler verwendet (Montagehöhe etwa sieben Meter Höhe über Grund). Beide Standorte sind durch WiMAX-Richtfunk mit einander verbunden. Folgende Abbildung zeigt die Situation vor Ort und die Lage der Messpunkte:

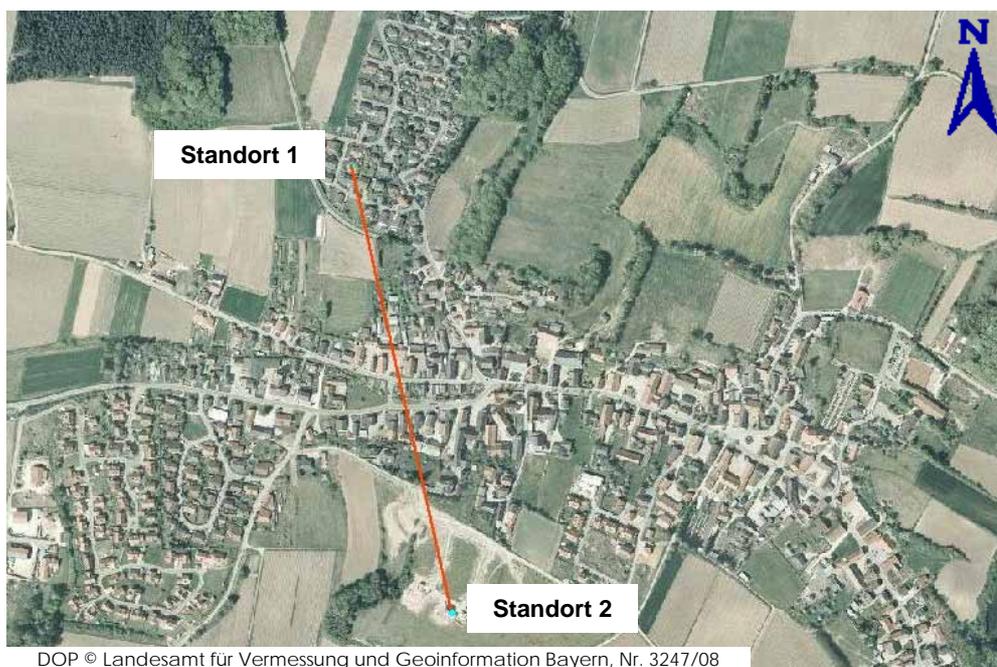


Bild 2.10: Szenario 10: Lageplan mit Anlagenstandorten

In den folgenden beiden Bildern finden sich detaillierte Angaben über die Lage der Standorte und der Messpunkte:



Bild 2.10a: Szenario 10a (Aigsbach-Nord): Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

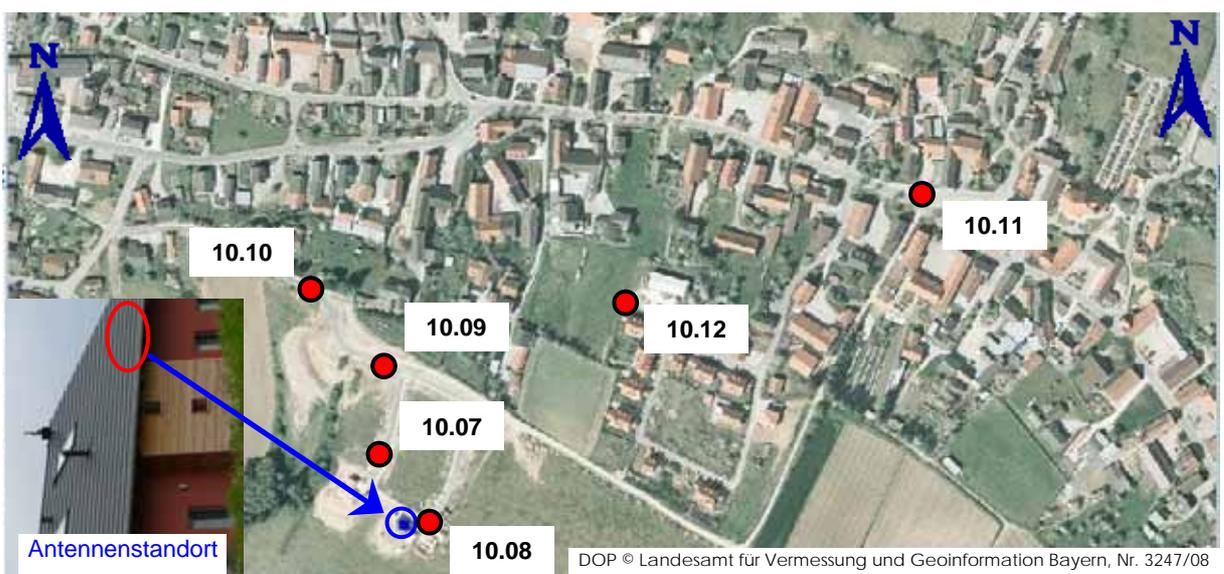


Bild 2.10b: Szenario 10b (Aigsbach-Süd): Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien in Bodennähe. In folgender Tabelle sind die Immissionen für die Messpunkte in der Umgebung dieser beiden Standorte angegeben (mit Ausnahme der Punkte 10.02 und 10.06 herrschte Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne):

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 10.01 | 40 m | 0,016 | 0,026 | 0,67 |
| 10.02 | 48 m | 0,003 | 0,004 | 0,02 |
| 10.03 | 25 m | 0,009 | 0,015 | 0,23 |
| 10.04 | 60 m | 0,005 | 0,008 | 0,07 |
| 10.05 | 270 m | 0,007 | 0,012 | 0,14 |
| 10.06 | 270 m | 0,002 | 0,004 | 0,01 |
| 10.07 | 50 m | 0,010 | 0,017 | 0,27 |
| 10.08 | 15 m | 0,031 | 0,051 | 2,59 |
| 10.09 | 132 m | 0,006 | 0,010 | 0,09 |
| 10.10 | 208 m | 0,004 | 0,006 | 0,04 |
| 10.11 | 510 m | 0,002 | 0,004 | 0,01 |
| 10.12 | 260 m | 0,003 | 0,005 | 0,03 |

Tabelle 2.10: Szenario 10: WiMAX-Exposition

Folgendes Bild visualisiert die Resultate aus obiger Tabelle:

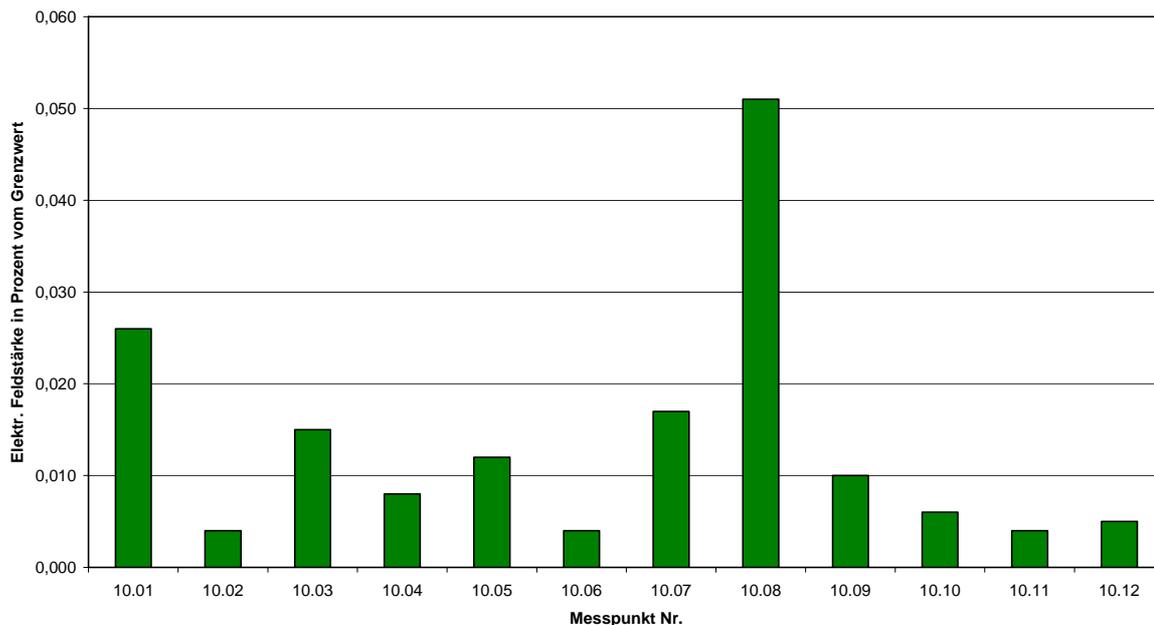


Bild 2.10c: Szenario 10: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Ein Vergleich der Messergebnisse an den Punkten 10.01 und 10.02 bzw. 10.05 und 10.06 verdeutlicht den Einfluss einer fehlenden Sichtverbindung zur Sendeantenne auf die sich ergebende Immission.

2.11 Versorgung benachbarter Ortschaften durch einzelne Standorte im jeweiligen Ort

Das letzte untersuchte Szenario (wiederum lizenzfreier Frequenzbereich) besteht aus einigen Ortschaften, die zur Stadt Beilngries (Landkreis Eichstätt, Bayern) gehören. Sie befinden sich auf der Jurahochfläche südlich von Beilngries. Die Breitbandversorgung wird hier durch einige Standorte mit Rundstrahlantennen sichergestellt, die über Richtfunkverbindungen vernetzt sind. Die Antennen sind auf Gebäudedächern bzw. einem Wasserturm montiert und befinden sich relativ nah an Wohnbebauung. Die Montagehöhe der Antennen beträgt etwa 10 bis 12 Meter (Dachmontage) bzw. 35 Meter (Wasserturm Grampersdorf).

In folgender Abbildung sind zunächst die Ortschaften zu sehen, die durch das WiMAX-Netzwerk versorgt sind. Jeder Antennenstandort ist durch einen roten Punkt markiert. Die Richtfunkverbindungen werden durch rote Pfeile dargestellt. Die Verbindung mit dem Backbone-Netz erfolgt in Aschbuch.

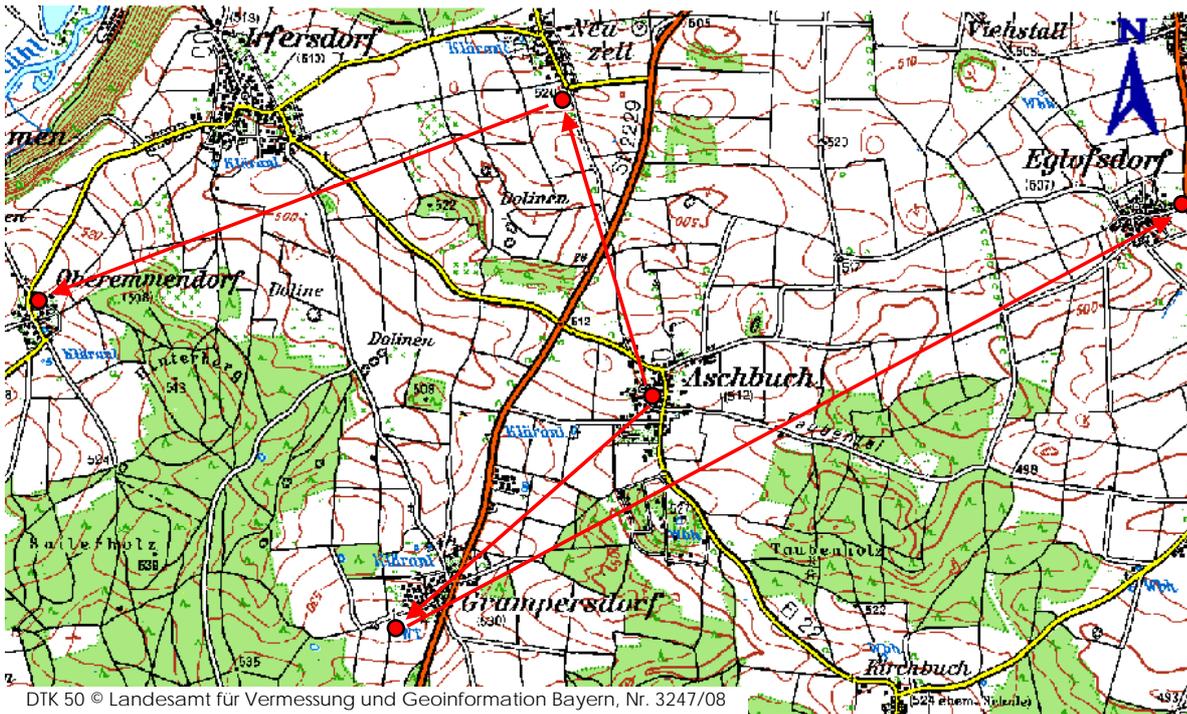


Bild 2.11: Szenario 11: Lageplan mit Anlagenstandorten und Richtfunkvernetzung

Immissionsmessungen wurden in Grampersdorf, Aschbuch, Oberremmendorf und Neuzell durchgeführt. In den folgenden Bildern finden sich detaillierte Angaben über die Lage der Standorte und der Messpunkte:

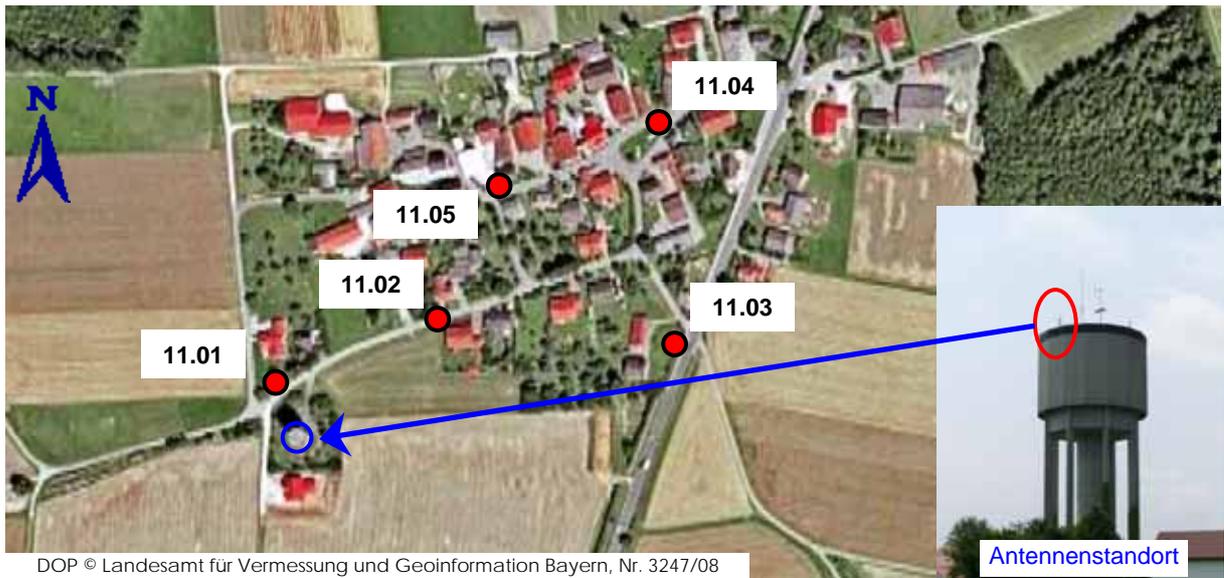


Bild 2.11a: Szenario 11a (Grampersdorf): Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

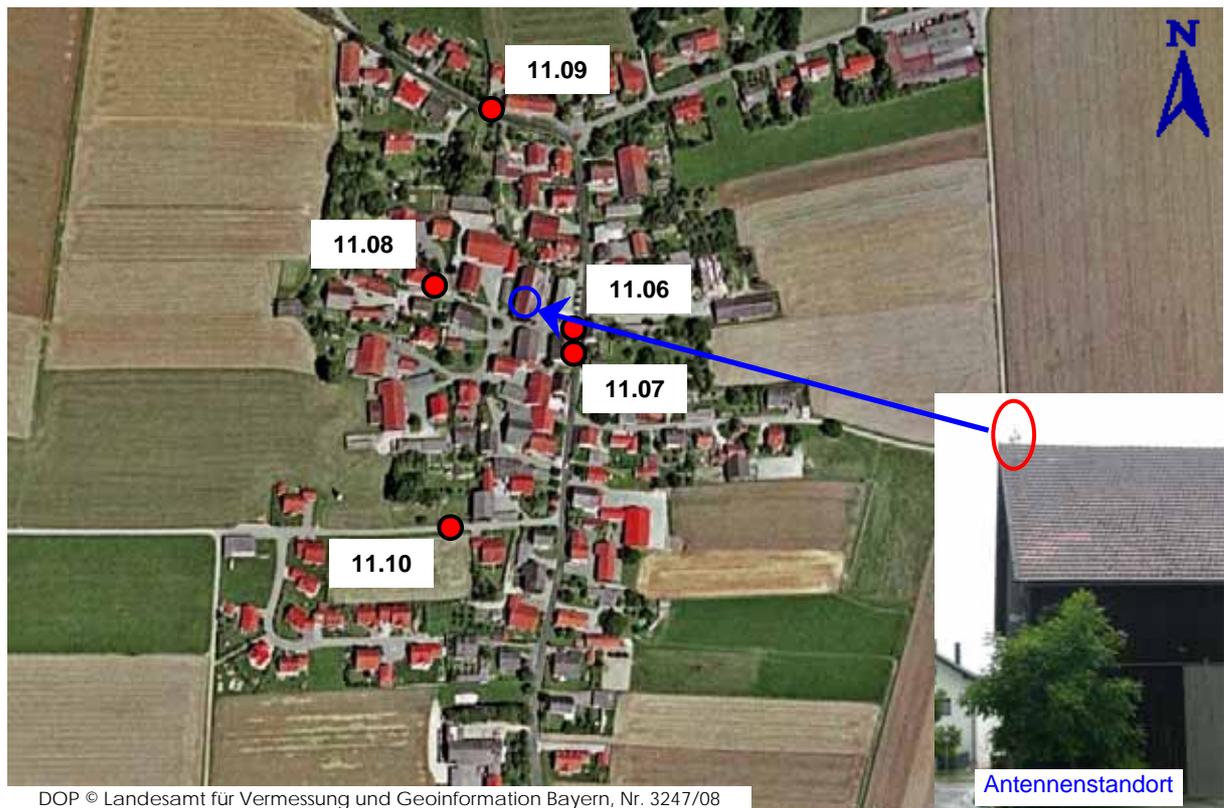


Bild 2.11b: Szenario 11b (Aschbuch): Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

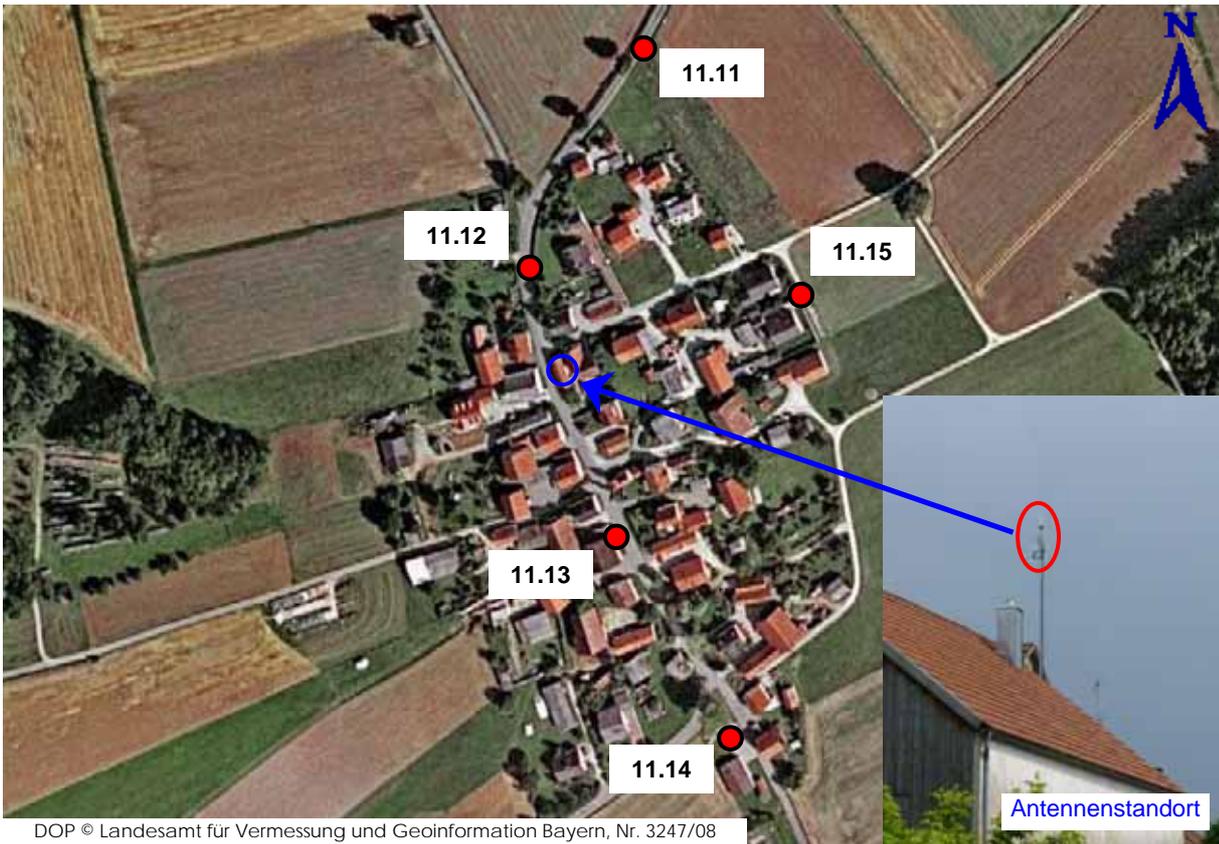


Bild 2.11c: Szenario 11c (Oberremmendorf): Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

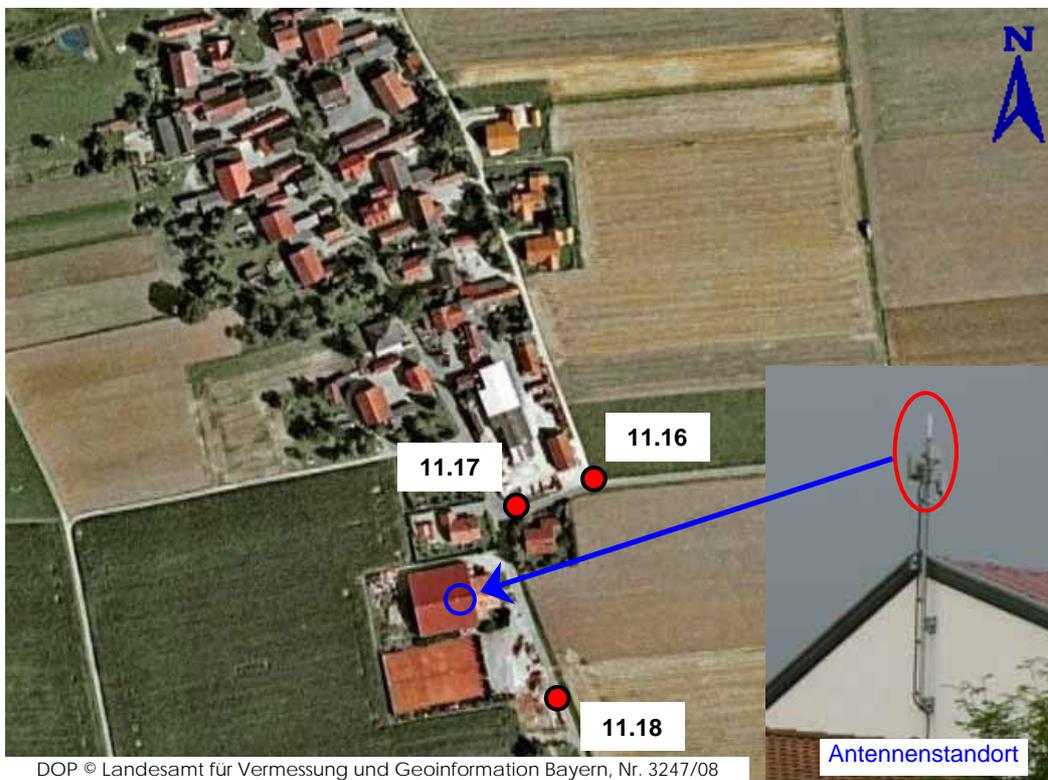


Bild 2.11d: Szenario 11d (Neuzell): Lageplan mit Anlagenstandort und Messpunktverteilung

Gemessen wurde bei trockener Witterung. Alle Messpunkte befanden sich im Freien in Bodennähe. In folgender Tabelle sind die Immissionen für die Messpunkte in der Umgebung dieser vier Standorte angegeben (mit Ausnahme von Punkt 11.07 herrschte immer Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne):

| Punkt Nr. | Lateralentfernung zum Antennenstandort | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Grenzwert (61 V/m) nach 26. BImSchV | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 11.01 | 40 m | 0,005 | 0,008 | 0,06 |
| 11.02 | 130 m | 0,014 | 0,022 | 0,49 |
| 11.03 | 270 m | 0,003 | 0,005 | 0,02 |
| 11.04 | 330 m | 0,011 | 0,019 | 0,34 |
| 11.05 | 205 m | 0,004 | 0,006 | 0,04 |
| 11.06 | 45 m | 0,008 | 0,014 | 0,18 |
| 11.07 | 45 m | 0,002 | 0,003 | 0,01 |
| 11.08 | 60 m | 0,014 | 0,023 | 0,52 |
| 11.09 | 155 m | 0,016 | 0,025 | 0,64 |
| 11.10 | 175 m | 0,006 | 0,010 | 0,11 |
| 11.11 | 190 m | 0,009 | 0,014 | 0,19 |
| 11.12 | 48 m | 0,005 | 0,009 | 0,07 |
| 11.13 | 130 m | 0,009 | 0,015 | 0,21 |
| 11.14 | 220 m | 0,003 | 0,004 | 0,02 |
| 11.15 | 132 m | 0,006 | 0,010 | 0,11 |
| 11.16 | 130 m | 0,007 | 0,012 | 0,14 |
| 11.17 | 50 m | 0,008 | 0,013 | 0,18 |
| 11.18 | 60 m | 0,005 | 0,008 | 0,06 |

Tabelle 2.11: Szenario 11: WiMAX-Exposition

Folgendes Bild visualisiert die Resultate aus obiger Tabelle:

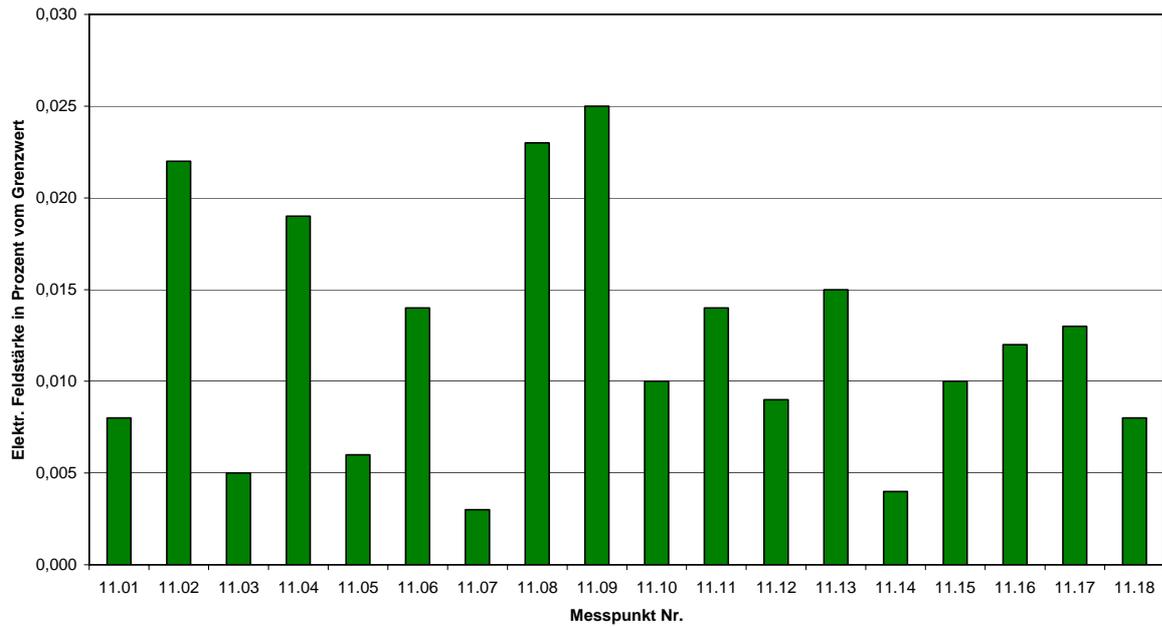


Bild 2.11e: Szenario 11: Grafische Darstellung der gemessenen Expositionswerte

Ein Vergleich der Messergebnisse an den Punkten 11.06 und 11.07 verdeutlicht wiederum den Einfluss einer fehlenden Sichtverbindung zur Sendeantenne auf die sich ergebende Immission.

3 Untersuchung von Einflussfaktoren für die Größe der Immission

Im Rahmen der hier durchgeführten Messungen wurden bei den einzelnen Szenarien teilweise sehr unterschiedliche Expositionswerte gefunden, auch beim Vergleich der Szenarien untereinander kann man feststellen, dass sich im Mittel zum Teil deutliche Immissionsunterschiede ergeben, wie aus folgendem Bild deutlich wird.

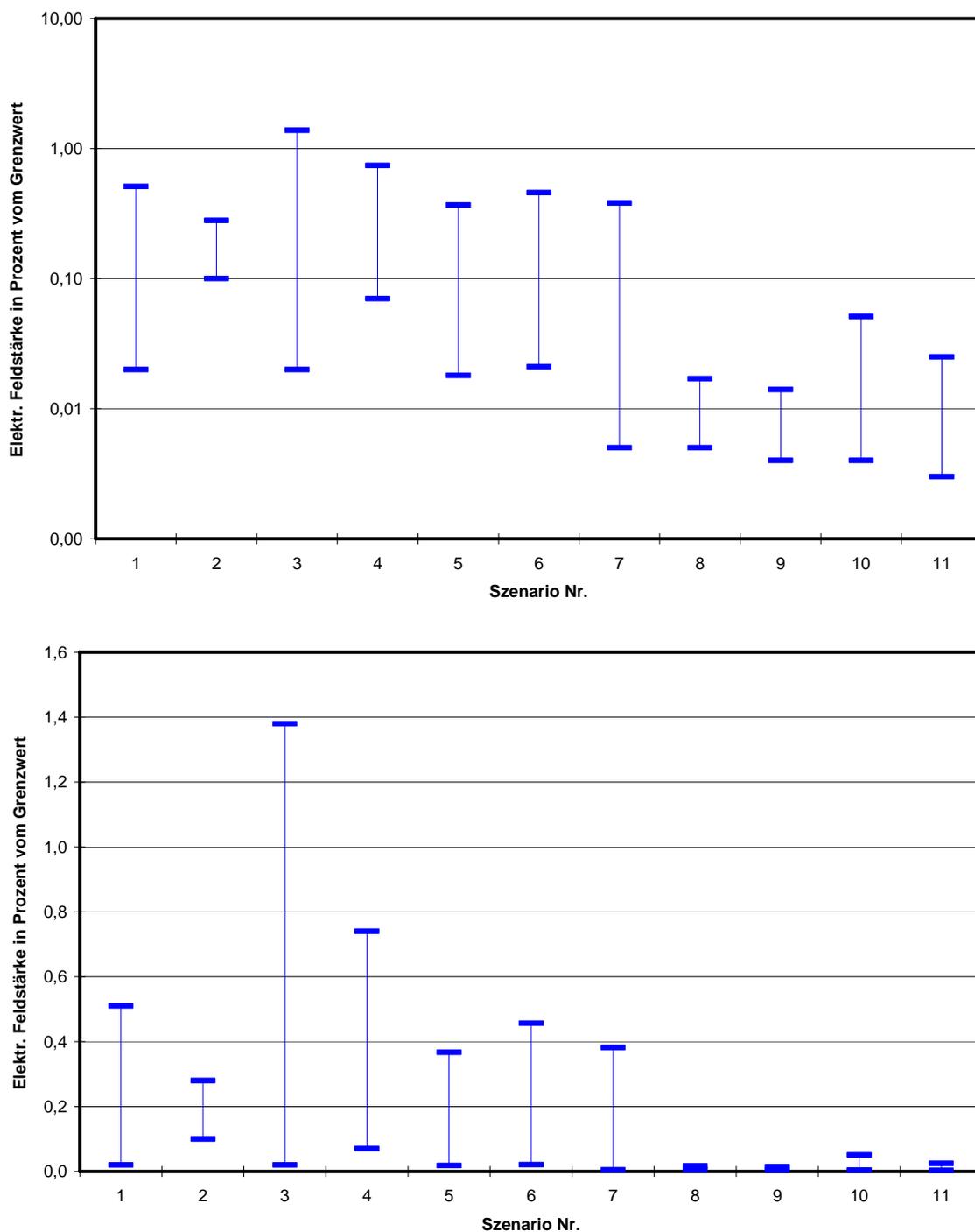


Bild 3.1: Zusammenfassende Darstellung der in den elf untersuchten Szenarien gemessenen Expositionswerte (in logarithmischer und linearer Darstellung)

Aus Bild 3.1 ist ersichtlich, dass die Szenarien 1 bis 7 (lizenzierter Frequenzbereich) durchgängig höhere Immissionen liefern als die Szenarien 8 bis 11 (lizenzfreier Bereich). Dies wird in Abschnitt 3.5 detailliert untersucht.

Die drei Anlagen mit großen Installationshöhen im lizenzierten Bereich (Szenarien 2, 5 und 6) liefern tendenziell kleinere Expositionen als die Anlagen mit niedrigen Installationshöhen (Szenarien 1, 3, 4 und 7). Auf diesen Umstand wird in Abschnitt 3.3 näher eingegangen.

Nachfolgend soll der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Größe der Immission näher untersucht werden. Im Wesentlichen sind es die folgenden Einflussfaktoren, die entweder nur von der Sendeanlage oder nur vom Empfangsort oder von beiden bestimmt werden:

Einflussfaktoren seitens der Sendeanlage:

- Sendeleistung der Anlage (Frequenzband, Anzahl der Betreiber, Anzahl der Kanäle, Sendeleistung pro Kanal),
- Höhe der Sendeantennen über Grund,
- verwendete Antennentypen,
- Downtilt der Antennen,
- horizontale Ausrichtung der Antennen.

Einflussfaktoren seitens des Immissionsortes:

- Abstand zur Sendeanlage,
- Höhe des Empfängerortes über Grund (bzw. relativer Höhenunterschied zur Sendeanlage),
- horizontale Ausrichtung zur Anlage,
- Vorhandensein von dämpfenden Hindernissen (Sichtbarkeit der Anlage).

Von diesen Einflussfaktoren sollen im Folgenden der (laterale) Abstand zur Sendeanlage, der relative Höhenunterschied vom Messpunkt (MP) zur Sendeanlage, die Sichtverhältnisse (freie Sicht oder Sicht durch Hindernisse verdeckt) und das verwendete Frequenzband (unterschiedliche Sendeleistung) untersucht werden. Der relative Höhenunterschied wird hierbei durch den Vertikalwinkel charakterisiert, der (falls möglich) während der Messungen mit einem Winkelmesser mitprotokolliert bzw. aus der Montagehöhe der Antennen und dem lateralen Abstand errechnet wurde. Die drei näher untersuchten räumlichen Faktoren sind in Bild 3.2 veranschaulicht.

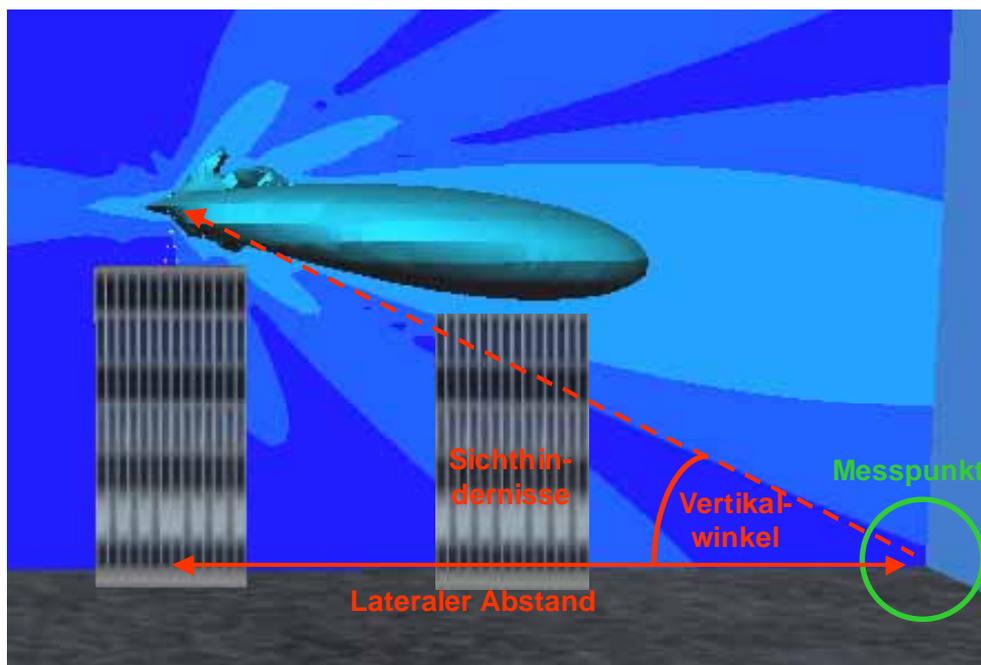


Bild 3.2: Untersuchte Einflussfaktoren

Im Folgenden soll überprüft werden, ob sich gewisse Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der Immission finden lassen. Insbesondere soll geprüft werden, ob die in [WUS 04] bzw. [BOR 06-2] für GSM- bzw. UMTS-Anlagen mittels teilweise deutlich größeren Messpunktanzahlen (>1.000) erarbeiteten Gesetzmäßigkeiten tendenziell auch bei WiMAX zu finden sind. Die im Folgenden dargestellten Expositionswerte sind immer als prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für Maximalauslastung der verursachenden Sendeanlagen dargestellt.

3.1 Allgemeine Eigenschaften der Messergebnisse

Bevor die Messergebnisse speziell bezüglich der oben genannten Einflussfaktoren ausgewertet werden, sollen hier zunächst einige grundsätzliche Eigenschaften der an den Messpunkten gefundenen Expositionswerte dargestellt werden.

Die 102 Messpunkte können wie folgt charakterisiert werden:

| Lage der Messpunkte | Davon mit Sicht zu Antennen | Davon ohne bzw. mit eingeschränkter Sicht zu Antennen |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Indoor (4 Punkte) | 2 | 2 |
| Outdoor (98 Punkte) | 86 | 12 |

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Messpunkte

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gemessenen Maximal- bzw. Minimalimmissionen sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten:

| Kennwert | Resultat |
|----------------------------------------------------|----------|
| Maximalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert] | 1,380 |
| Minimalwert bei Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,004 |
| Spannweite [dB] bei Sicht | 50,8 |
| Maximalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,118 |
| Minimalwert ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,003 |
| Spannweite [dB] ohne Sicht | 31,9 |
| Spannweite [dB] über alle Punkte | 53,3 |

Tabelle 3.2: Extremwerte der gemessenen Expositionen

Ein statistischer Vergleich zwischen Indoor- und Outdoorimmissionswerten ist aufgrund der zu geringen Anzahl an Indoormesspunkten nicht sinnvoll.

WiMAX-Expositionen über einem Prozent vom Grenzwert konnten im Rahmen der durchgeführten Messungen nur an einem Punkt gefunden werden. Die Spannweite der Exposition ist sehr groß, sie beträgt mehr als 50 dB.

Der überwiegende Teil der Messergebnisse lag bei weniger als 0,1 Prozent vom Grenzwert. Statistische Mittelwerte sind in folgender Tabelle aufgelistet:

| Statistischer Mittelwert | Resultat |
|----------------------------------------------------------|----------|
| Durchschnittliche Exposition [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,261 |
| Median [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,0279 |

Tabelle 3.3: Durchschnittlicher Expositionswert und Median für alle 102 Messpunkte

Der durchschnittliche Expositionswert ist deutlich größer als der Median, was durch die stark unterschiedlichen Immissionswerte in den beiden betrachteten Frequenzbändern hervorgerufen wird. Dies wird aus folgender Abbildung deutlich:

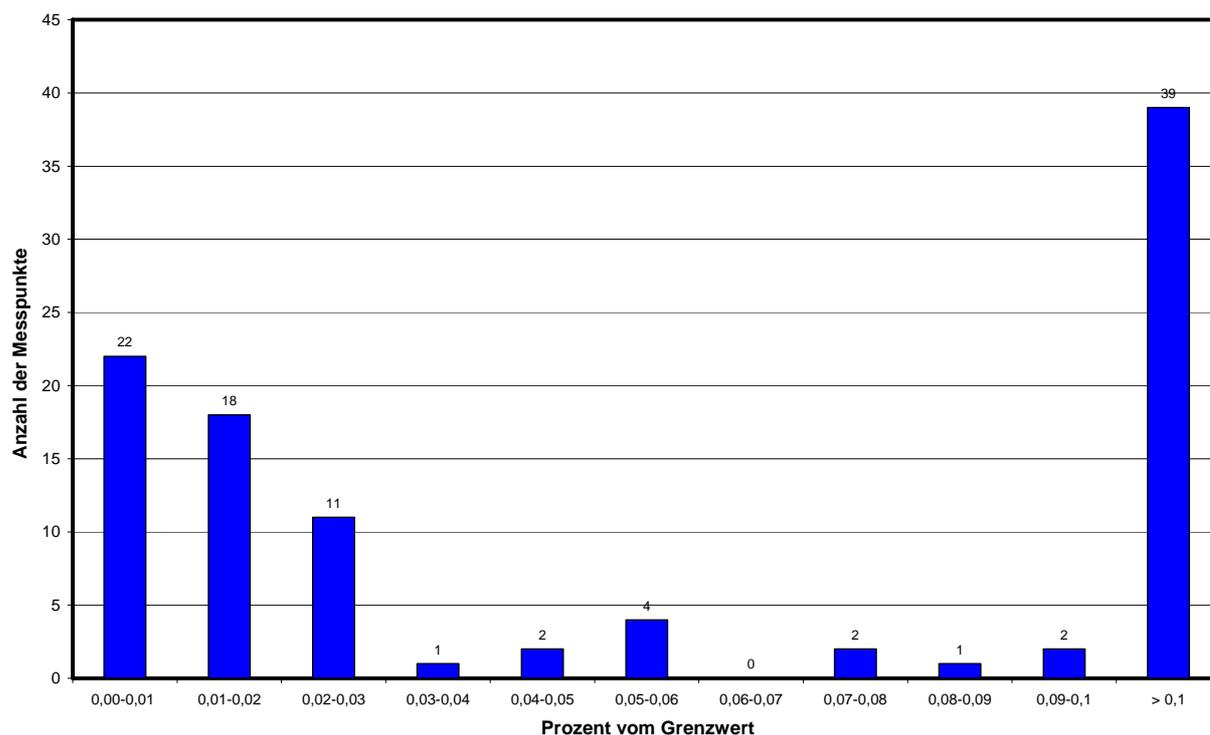


Bild 3.3: Verteilung der Messergebnisse, Absolutwerte

Der Grund für die zwei Extremwerte in der Verteilung liegt darin, dass in der Umgebung von Standorten im lizenzfreien Frequenzbereich typisch um mehr als zwei Größenordnungen geringere Immissionen gemessen wurden als bei Anlagen im lizenzierten Band. Auf diesen Unterschied wird in einem späteren Abschnitt noch näher eingegangen.

3.2 Lateraler Abstand des Messpunktes zur Sendeanlage

Häufig wird versucht, die Immission eines Messpunktes aufgrund seines Abstandes zur Sendequelle zu charakterisieren. Hierbei wird nach dem Prinzip verfahren, dass die Immission umso geringer sein müsste, je weiter der Messpunkt von der Quelle entfernt ist. Ob dies im unmittelbaren Umfeld einer WiMAX-Anlage zutrifft, soll die folgende Auswertung zeigen.

Dazu wurde das Messresultat jedes Outdoor-Messpunktes (mit Sichtverbindung zur Antenne) mit seinem Abstand zu der für die Immission am Messpunkt verantwortlichen WiMAX-Anlage in ein Diagramm eingetragen. Das Ergebnis ist in folgendem Bild dargestellt. Als Immission ist wieder die Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke dargestellt.

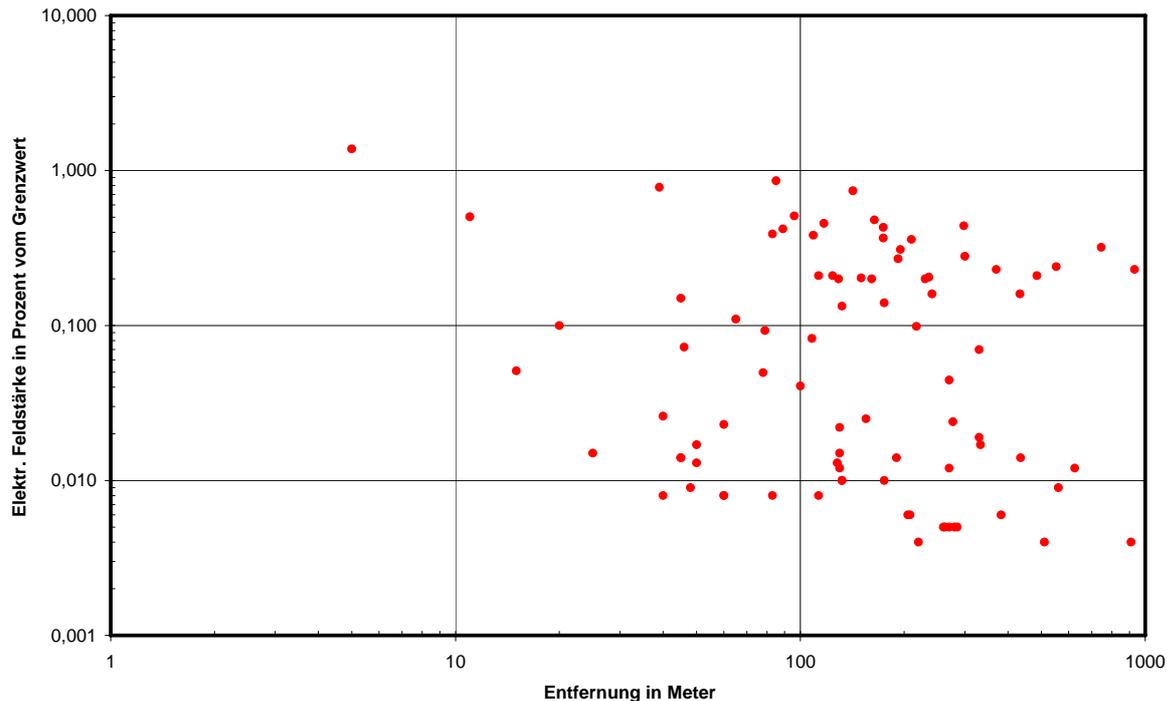


Bild 3.4: Immission in Abhängigkeit vom lateralen Abstand für die 86 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne

Als Ergebnis wird deutlich, dass es bei den Outdoormesspunkten im unmittelbaren Umfeld der Sendeanlage (Entfernungen bis ca. einige hundert Meter) offenbar nicht gerechtfertigt ist, den Abstand als maßgebliches Kriterium für die Beurteilung der Immissionsgröße zu verwenden. Die höchsten Immissionen der Messreihe (über 0,1 Prozent vom Grenzwert) finden sich beispielsweise sowohl bei sehr kurzen Abständen (10 Meter) als auch in größerer Entfernung (über 100 Meter). Im Mittel ist zwar eine gewisse Abnahme der Exposition mit dem Abstand erkennbar, für eine bestimmte Entfernung beträgt die Spannweite der Exposition jedoch teilweise bis zu etwa 40 dB. Die Ursache für dieses Verhalten liegt u.a. in dem Umstand begründet, dass es sich bei WiMAX-Antennen nicht um isotrope (d.h. in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlende) Antennen handelt, sondern um Richtantennen, die ihre Energie speziell in bestimmte Raumrichtungen verteilen.

Diese Tatsache sollte insbesondere bei epidemiologischen Studien beachtet werden: Der Abstand zur Sendeanlage ist zumindest im unmittelbaren Umfeld der Anlage als Schätzer für die Exposition z.B. von Wohnungen wenig geeignet, da die reale Exposition in einer bestimmten Entfernung einer sehr großen Schwankungsbreite unterliegt.

An dieser Tatsache ändert sich auch nichts Entscheidendes, wenn man zwischen Immissionen bei lizenzpflichtigen bzw. lizenzfreien Anlagen unterscheidet (siehe Bild 3.7). Der Trend zur Abnahme der Exposition mit dem Abstand ist nun zumindest bei den Immissionen im lizenzfreien Bereich zwar etwas deutlicher sichtbar, die Schwankungsbreite der Immission ist allerdings mit ca. 20 bis 30 dB weiterhin sehr hoch.

3.3 Einfluss des Vertikalwinkels

In folgendem Bild ist für alle 86 Outdoormesspunkte mit Sicht die Immission in Abhängigkeit des Vertikalwinkels dargestellt. Der Vertikalwinkel ist derjenige Winkel, unter dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht (Bild 3.2). Geringe Vertikalwinkel bedeuten, dass der Messpunkt sehr weit von der Antenne entfernt ist oder sich Messpunkt und Antenne auf nahezu derselben Höhe befinden; bei großem Vertikalwinkel besteht zwischen Messpunkt und Sendeanlage ein großer Höhenunterschied oder ein geringer lateraler Abstand. Negative Vertikalwinkel bedeuten, dass der Messpunkt höher liegt als die Antennen. Der Vertikalwinkel kann damit als Maß dafür dienen, ob der Messpunkt in vertikaler Hauptsenderichtung (Vertikalwinkel im Bereich des Downtilts) oder außerhalb der Hauptsenderichtung liegt.

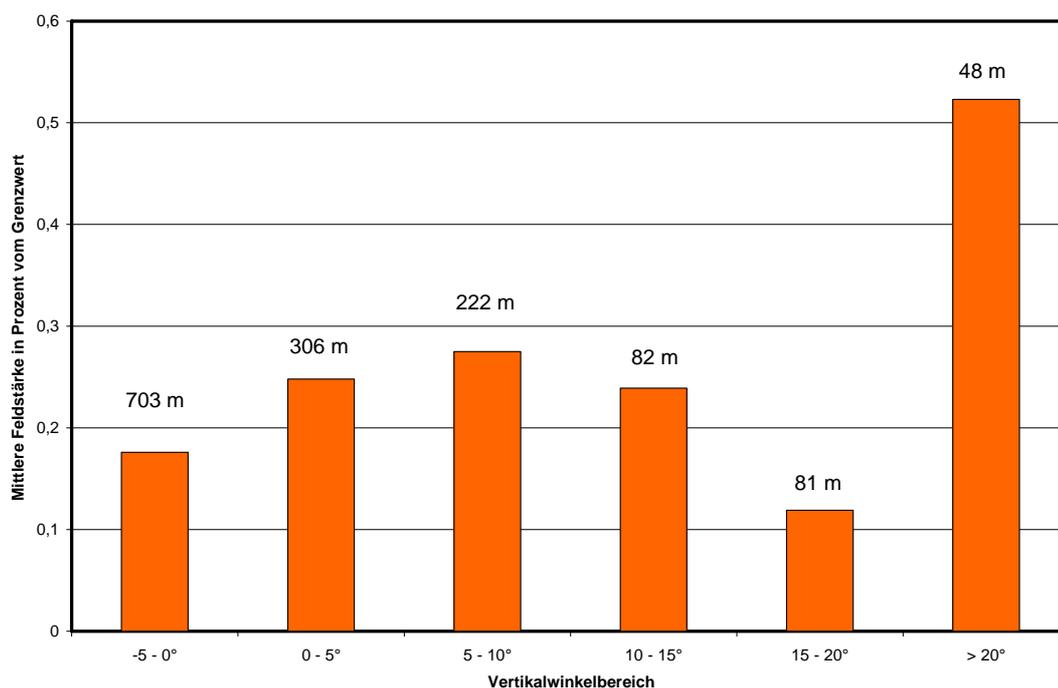


Bild 3.5: Immission in Abhängigkeit des Vertikalwinkels an Outdoormesspunkten mit Sicht. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur Sendeanlage bei der jeweiligen Vertikalwinkelklasse angegeben.

In Bild 3.5 ist die Immission jeweils gemittelt über verschiedene Vertikalwinkelbereiche angegeben. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur Sendeanlage (lateraler Abstand) bei der jeweiligen Vertikalwinkelklasse angegeben.

Hier ist auf den ersten Blick kein eindeutiger Trend ablesbar: Offensichtlich ergeben sich sowohl bei Messpunkten mit Vertikalwinkeln im Bereich üblicher Downtilts (einige Grad) als auch bei sehr großen Vertikalwinkeln höhere Immissionen als bei mittelgroßen Vertikalwinkeln. Betrachtet man allerdings zusätzlich die mittlere Entfernung der Messpunkte, so wird klar, dass der Vertikalwinkel durchaus einen deutlichen Einfluss auf die Größe der Exposition ausübt: Die mittleren Immissionen an Punkten mit Vertikalwinkeln zwischen 0 und 10 Grad sind nur etwa um den Faktor 2 geringer als an den Punkten mit mehr als 20 Grad Vertikalwinkel, obwohl diese Punkte im Mittel um etwa den Faktor 5 weiter von den Antennenstandorten entfernt sind. Der vorhandene Einfluss des Vertikalwinkels wird hier durch die offensichtlich noch zu geringe Messpunktanzahl im Bereich großer Vertikalwinkel überdeckt.

Etwas deutlicher wird die Gesetzmäßigkeit, wenn man die Einzelmessergebnisse in Abhängigkeit des Vertikalwinkels darstellt.

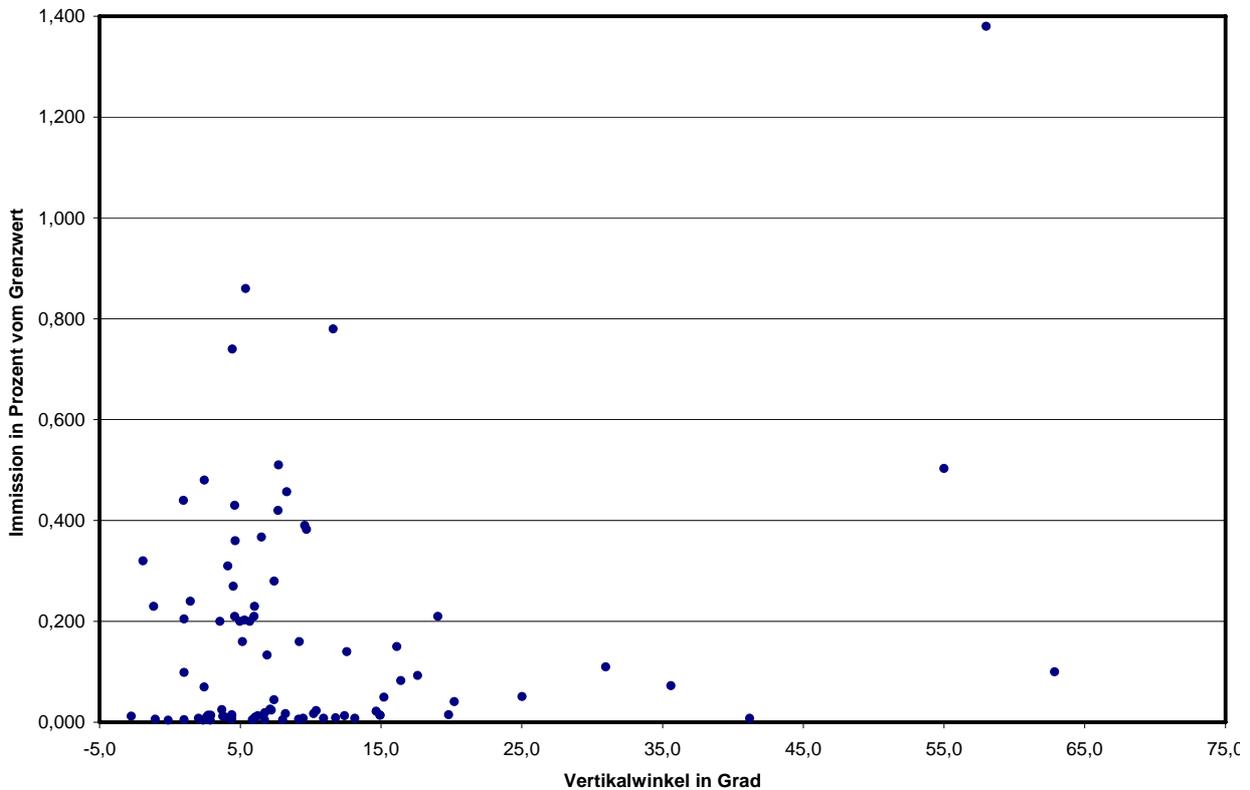


Bild 3.6: Immission in Abhängigkeit des Vertikalwinkels an Outdoormesspunkten mit Sicht.

Nun ist zu erkennen, dass im hier betrachteten Entfernungsbereich an Messpunkten mit kleinem Vertikalwinkel typisch etwas höhere Messwerte auftreten, als an Punkten mit größerem Vertikalwinkel. Der hohe Durchschnittswert für Vertikalwinkel größer 20 Grad in Bild 3.5 wurde im Wesentlichen durch einen einzigen „Ausreißer“ (Größter Messwert, aufgenommen in unmittelbarer Nähe der Antenne) bestimmt.

3.4 Einfluss der Sichtverhältnisse

Hindernisse im Ausbreitungsweg zwischen Sendeantenne und Messpunkt, wie z.B. Gebäude oder auch Bäume, führen theoretisch zu einer Abschwächung der Signale und Verringerung der Immission. Die Funkverbindung ist in der Praxis jedoch nicht vollständig unterbrochen, da die Signale dann oftmals über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden (Mehrwegeausbreitung) zum Messpunkt gelangen. Wie sich der abschattende Effekt bezüglich der Immission auswirkt, soll im Folgenden untersucht werden.

Um den Einfluss einer nicht vorhandenen Sichtverbindung darzustellen, wurden einige Messungen an unmittelbar benachbarten Orten durchgeführt. Es handelt sich um die Messpunkte 10.01 / 10.02, 10.05 / 10.06 und 11.06 / 11.07, wobei jeweils nur von einem der beiden Punkte (Punkt 10.01, 10.05 und 11.06) Sichtverbindung zum Antennenstandort bestand, vom jeweils anderen Punkt (Punkt 10.02, 10.06 und 11.07) hingegen nicht. Ein Vergleich der Ergebnispaare gibt Aufschluss über die Dämpfung der Funksignale durch die vorhandenen Hindernisse (Gebäude). Es ergaben sich folgende Unterschiedsfaktoren:

| Messpunkt mit Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert] | Messpunkt ohne Sicht [% vom Feldstärkegrenzwert] | Unterschied [dB] |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|
| 10.01: 0,026 | 10.02: 0,004 | 16,3 |
| 10.05: 0,012 | 10.06: 0,004 | 9,5 |
| 11.06: 0,014 | 11.07: 0,003 | 13,4 |

Tabelle 3.4: Immission in Abhängigkeit der Sichtverhältnisse

Dies bedeutet: Allein durch Veränderung des Messpunktes um einige Meter hinein in einen Bereich ohne Sichtverbindung reduziert sich die Exposition hier um etwa 10 bis 15 dB.

3.5 Einfluss des Frequenzbereichs

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Immissionsmessungen führten zu einer etwa gleich großen Anzahl von Messpunkten in der Umgebung von Anlagen im lizenzfreien (5,6 GHz) bzw. im lizenzierten Frequenzbereich (3,5 GHz). Da in beiden Bändern deutlich unterschiedliche maximale Sendeleistungen zulässig sind, ist zu vermuten, dass auch die Immissionswerte vom verwendeten Frequenzband der Sendeanlage abhängen. Daher wurde auch eine statistische Auswertung der Immissionswerte in Abhängigkeit vom Frequenzband durchgeführt. Um möglichst von anderen Einflussfaktoren unabhängig zu sein, wurden dazu nur die 86 Outdoormesspunkte mit direkter Sicht zu einer WiMAX-Antenne herangezogen.

Die folgenden beiden Tabellen geben einen Überblick über die gemessenen Maximal- bzw. Minimalimmissionen sowie die sich daraus ergebenden Spannweiten, abhängig vom Frequenzband:

| Kennwert | Resultat |
|-----------------------------------------------------|----------|
| Maximalwert bei 3,5 GHz [% vom Feldstärkegrenzwert] | 1,380 |
| Minimalwert bei 3,5 GHz [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,024 |
| Spannweite [dB] bei 3,5 GHz | 35,2 |
| Maximalwert bei 5,6 GHz [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,051 |
| Minimalwert bei 5,6 GHz [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,004 |
| Spannweite [dB] bei 5,6 GHz | 22,1 |

Tabelle 3.5: Extremwerte für die beiden Frequenzbereiche, Outdoormesspunkte mit Sicht

Im Vergleich zu der in Tabelle 3.2 gefundenen Spannweite über alle Punkte mit Sicht (ca. 50 dB), zeigt sich bei einer getrennten Auswertung für die beiden Bänder eine deutlich reduzierte Spannweite (ca. 35 bzw. 22 dB), was den Schluss zulässt, dass die Messwerte beider Systeme im Mittel signifikant differieren. Dies wird deutlich, wenn man die statistischen Mittelwerte errechnet:

| Statistischer Mittelwert | 3,5 GHz | 5,6 GHz | Delta [dB] |
|----------------------------------------------------------|---------|---------|------------|
| Durchschnittliche Exposition [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,387 | 0,015 | 28,2 |
| Median [% vom Feldstärkegrenzwert] | 0,210 | 0,010 | 26,4 |

Tabelle 3.6: Durchschnittlicher Expositionswert und Median für alle Outdoormesspunkte mit Sicht

Median und Mittelwert sind bei den Messpunkten in der Umgebung der lizenzierten Systeme um mehr als 25 dB größer als bei den Punkten im Bereich der lizenzfreien Anlagen. Diese Differenz kann durch die unterschiedlichen Sendeleistungen begründet werden: Die lizenzierten Anlagen wurden mit EIRP-Werten bis zu einigen Hundert Watt, die lizenzfreien Systeme nur mit etwa 1 Watt betrieben.

In folgendem Bild sind nochmals alle Outdoor-Messpunkte mit Sicht zur Sendeantenne in Abhängigkeit ihres Abstands zu der für die Immission am Messpunkt verantwortlichen WiMAX-Anlage in ein Diagramm eingetragen. Zusätzlich ist jedoch farblich markiert, ob die in der Nachbarschaft befindliche Anlage im 3,5 GHz- oder im 5,6-GHz-Band arbeitet:

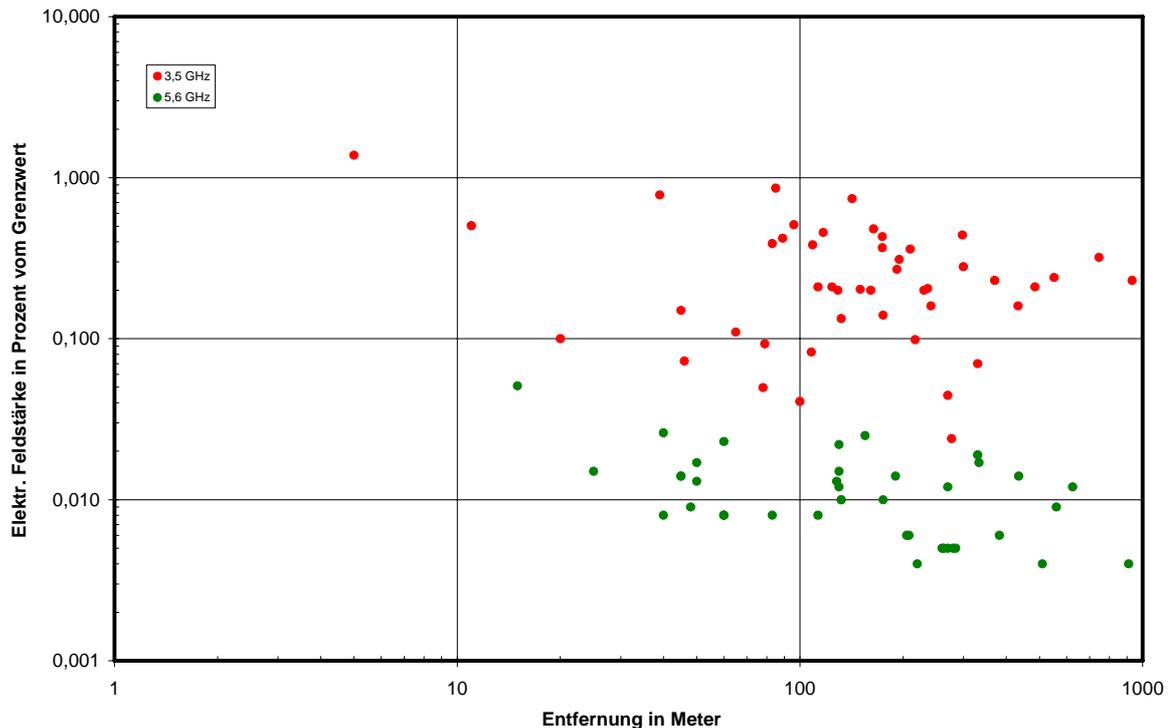


Bild 3.7: Immission in Abhängigkeit des lateralen Abstands für die 86 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne in Abhängigkeit vom Frequenzband der Sendeanlage

Die größten Messwerte in der Umgebung von lizenzfreien Anlagen liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie die niedrigsten Messwerte bei Anlagen im lizenzierten Frequenzband. Das Frequenzband erweist sich somit als sehr wichtiger Einflussfaktor auf die zu erwartende Immission in der Umgebung einer WiMAX-Anlage.

3.6 Fazit

Von den untersuchten Einflussfaktoren

- lateraler Abstand des Messpunktes von der Sendeanlage,
- Vertikalwinkel, mit dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht,
- Sichtbedingungen zwischen Messpunkt und Sendeanlage und
- Frequenzband der Sendeanlage (lizenzierter oder lizenzfreier Frequenzbereich)

ist der *Abstand* im unmittelbaren Umfeld der Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) offenbar als Maß zur Quantifizierung der entstehenden WiMAX-Exposition wenig geeignet. Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission sehr stark durch die Nebenzipfel und Einzüge des stark bündelnden vertikalen Antennendiagramms geprägt ist und daher einen sehr unregelmäßigen Charakter aufweist.

Einen deutlichen Einfluss üben hingegen die *Sichtverhältnisse* aus: Objekte wie Gebäude, aber auch Bäume und Sträucher zwischen Messpunkt und Sendeanlage haben einen dämpfenden Einfluss, der sich erheblich in den Messergebnissen widerspiegelt. Die Immissionsreduzierung, die der Messpunkt erfährt, ist dabei abhängig von der Dämpfungswirkung

des Objektes, aber auch von der Frage, inwieweit die Signale der Basisstation auch über Reflexionen z.B. an benachbarten Gebäuden oder Wänden zum Messpunkt gelangen können.

Der Einfluss des *Vertikalwinkels* konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht sehr deutlich herausgearbeitet werden, da die Anzahl und die Entfernungsstaffelung der Punkte dafür nicht ausreichend war. Allerdings zeigt sich zumindest der Trend zu typisch etwas höheren Messwerten an Punkten mit kleinem Vertikalwinkel.

Sehr deutlich ausgeprägt ist hingegen der Einfluss des *Frequenzbandes* auf die in der Umgebung einer WiMAX-Anlage entstehende mittlere Immission. Die Auswertung der Messergebnisse ergab mit einem Unterschiedsfaktor von mehr als 25 dB einen deutlich sichtbaren Unterschied zwischen lizenzierten und lizenzfreien Anlagen. Die Ursache für diese Differenz ist in den stark unterschiedlichen Sendeleistungen begründet.

4 Vergleich von WiMAX-Immissionen zu denen anderer Funkdienste

4.1 Messtechnischer Vergleich von WiMAX- und UMTS-Immissionen

Im Folgenden werden die in Kapitel 2 für die einzelnen Szenarien detailliert vorgestellten Ergebnisse des Vergleichs zwischen WiMAX- und UMTS-Immissionen zusammengefasst und mit einander verglichen. Wie bereits erläutert, wurden an vier der elf Szenarien zusätzlich zu den WiMAX-Immissionen auch UMTS-Immissionen messtechnisch erfasst, die vom selben oder einem unmittelbar benachbarten Standort abgestrahlt werden. Bei den WiMAX-Anlagen handelte es sich ausschließlich um Systeme im lizenzierten Frequenzbereich. Die Immissionen der UMTS-Anlagen wurden mit dem codeselektiven Messverfahren ermittelt und gemäß 26. BImSchV auf höchste betriebliche Anlagenauslastung extrapoliert. Für einen Vergleich der Immissionsanteile beider Funkssysteme stehen insgesamt 33 Messpunkte zur Verfügung.

In Bild 4.1 ist der Vergleich der UMTS- und WiMAX-Immissionsanteile an allen relevanten Messpunkten hinsichtlich des Grades der Ausschöpfung des Feldstärkegrenzwertes der 26. BImSchV grafisch dargestellt. Aufgetragen sind die Immissionen bei maximaler betrieblicher Anlagenauslastung.

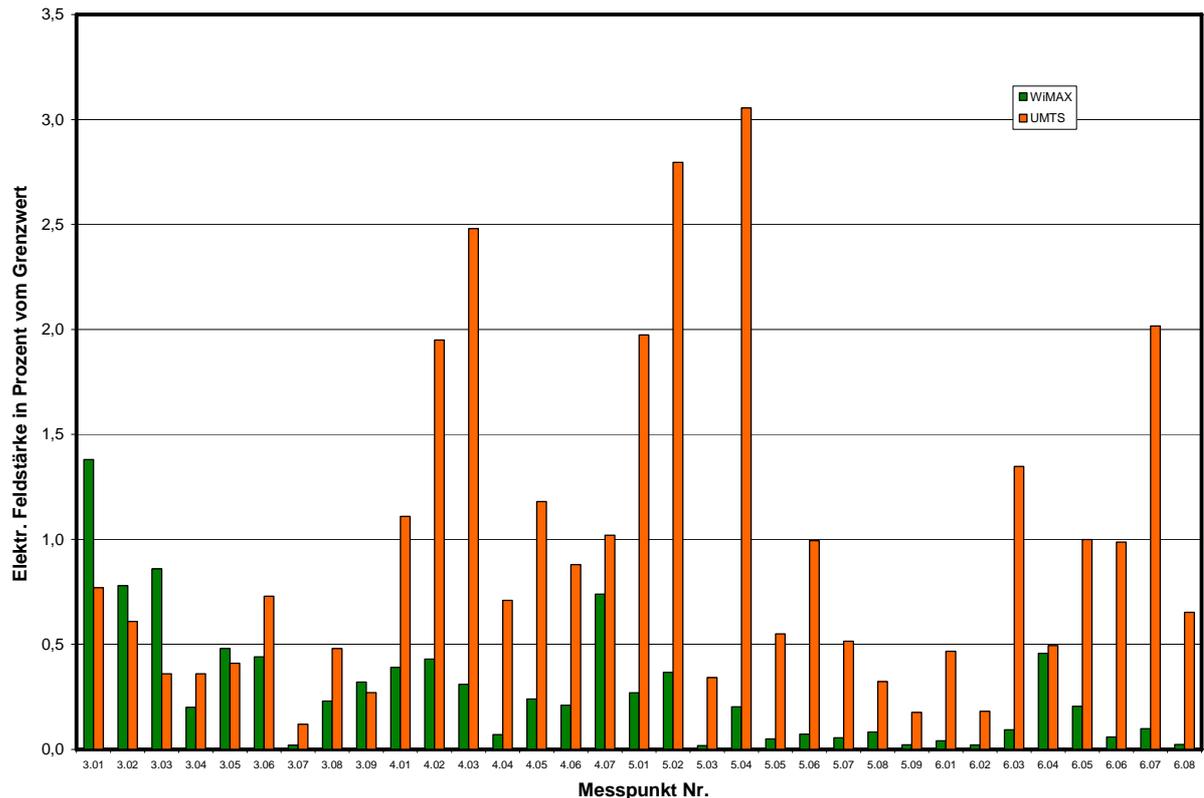


Bild 4.1: Vergleich der UMTS- und WiMAX-Immissionen, prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke

Es dominieren an 28 der 33 Messpunkte die Immissionen durch UMTS (85 %). An lediglich fünf Messpunkten dominieren die WiMAX-Immissionen. Im Mittel sind die UMTS-Immissionen etwa um 13 dB größer, als die Immissionen durch WiMAX-Signale. Anzumerken ist hier nochmals, dass es sich bei den hier betrachteten Punkten um die Umgebung von Anlagen im lizenzierten WiMAX-Frequenzbereich handelt. Berücksichtigt man die in Abschnitt 3.5 erarbeitete Tatsache, dass Sender im lizenzfreien Frequenzbereich deutlich niedrigere Immissionswerte erzeugen, wird bei derartigen Systemen der Unterschied nochmals größer ausfallen (ein Unterschied von etwa 40 dB ist durchaus realistisch).

Ein Grund für die größere Immission durch UMTS-Systeme liegt in der höheren installierten Sendeleistung. Aber auch andere Faktoren, wie die Antennencharakteristik oder die Orientierung der Messpunkte zur Hauptstrahlrichtung der Antenne haben offensichtlich einen Einfluss.

4.2 Vergleich von WiMAX-Immissionen zu Immissionen anderer Sendestationen anhand von Literaturdaten

Die durch WiMAX verursachten Immissionen sollen in diesem Abschnitt zu den Immissionen durch andere Funkfeststationen anhand von Literaturdaten in Beziehung gesetzt werden. Berücksichtigt werden hierbei ortsfeste Sender, die der Erfahrung nach in Wohn- oder Büroumgebungen relevante Immissionsbeiträge liefern. Aufgrund zahlreicher abgeschlossener Projekte aus dem Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramm [DMF 08] liegt mittlerweile

eine ausführliche Datenbasis über diesbezügliche Immissionen vor. Die im folgenden dargestellten Daten stammen aus folgenden Quellen:

1. Mobilfunk-Basisstationen: DMF-Projekt „Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen“, IMST GmbH und EM-Institut GmbH [BOR 06-2]. Die Immissionen sind nach 26. BImSchV räumlich maximiert und auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert.
2. TV: DMF-Projekt „Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk und Fernsehsendern“, IMST GmbH und EM-Institut GmbH [SCH 06]. Hierbei wurden neben Analog-TV und DVB-T auch UKW und DAB-Radio erfasst.
3. UKW+DAB-Radio: siehe 3.
4. LMK-Radio: Studie für die Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe, [BOCH 03]
5. WLAN indoor: Exposition durch indoor installierte WLAN-Anlagen; Werte aus [BOR 05-2] sowie aus den DMF-Projekten „Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro“ (ARC Seibersdorf research GmbH, [SCHM 05]) und „Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten (ARC Seibersdorf research GmbH, [PREI 06]). Die mess- und simulationstechnisch gewonnenen Werte aus [SCHM 05] und [PREI 06] wurden aus Konformitätsgründen nachträglich auf maximale Anlagenauslastung skaliert. Aus [PREI 06] wurden nur die Indoor-Szenarien (Star-Coffee Heidelberg, Flughafen-Lounge, Cebit 2006) verwendet.
6. WLAN outdoor: Exposition durch WLAN-Anlagen zur Versorgung von Ortschaften oder öffentlichen Plätzen und dergleichen, Outdoor-Szenarien aus [PREI 06] sowie WLAN-Werte aus [WUS 07]. Die Werte aus [PREI 06] wurden aus Konformitätsgründen nachträglich auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert.
7. WiMAX unlizenziiert: Alle Messpunkte der Szenarien 8-11 vorliegenden Berichtes.
8. WiMAX lizenziert: Alle Messpunkte der Szenarien 1-7 vorliegenden Berichtes.
9. DECT: DMF-Projekt „Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren im Haushalt und Büro“ [SCHM 05], ARC Seibersdorf research GmbH

Bild 4.2 fasst die Ergebnisse in einem Spannweitendiagramm zusammen: Für jeden Funkdienst ist zusätzlich der Medianwert über die Expositionswerte angegeben. Obwohl der Hintergrund der Expositionserfassung in den verschiedenen zitierten Studien nicht immer identisch ist (z.B. sind nicht in jeder Studie die Messpunkte statistisch verteilt), gibt die Übersicht jedoch einen guten Eindruck über die Relevanz der unterschiedlichen Expositionsquellen im allgemeinen und die Eingruppierung der WiMAX-Anlagen im besonderen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im Gegensatz zu den sonstigen Auswertungen dieses Berichtes die Expositionen in Bild 4.2 als prozentuale Ausschöpfung des *Leistungsflussdichte*-Grenzwertes angegeben sind.

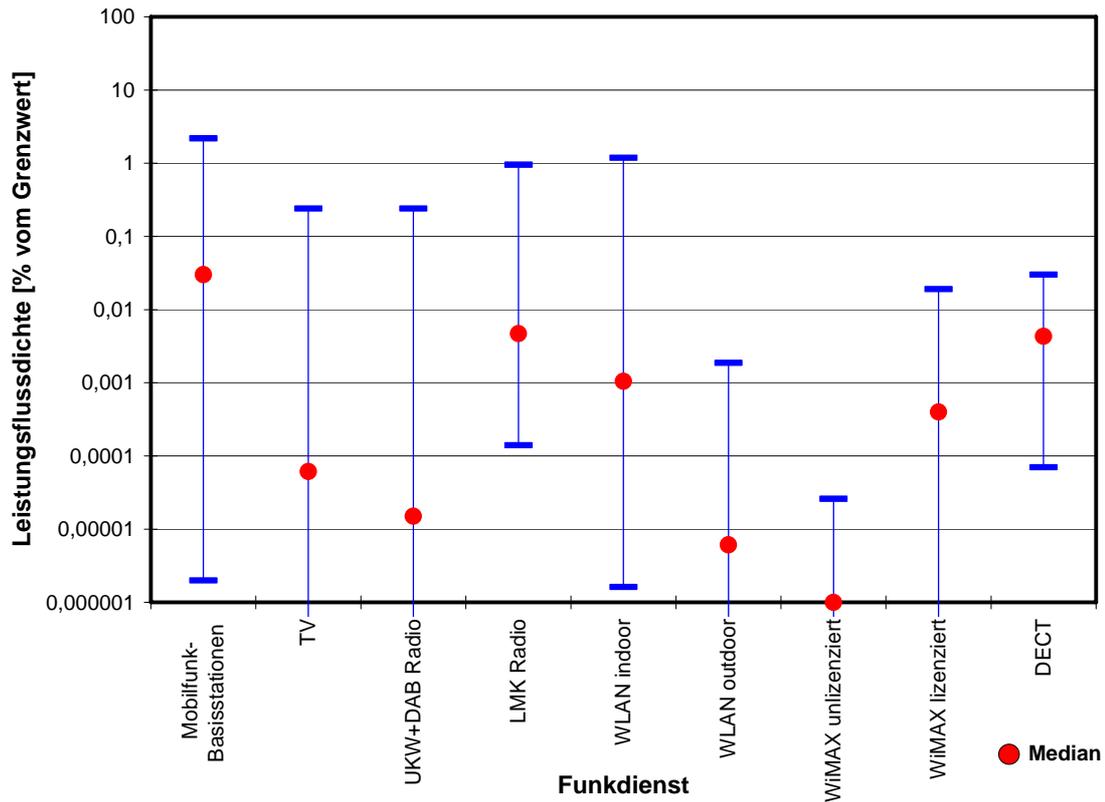


Bild 4.2 Qualitativer Vergleich der Expositionsbeiträge unterschiedlicher Funkdienste zur Exposition der Allgemeinbevölkerung

Aus Bild 4.2 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- WiMAX-Basisstationen leisten relevante Beiträge zur Gesamtimmission durch ortsfeste Sendeanlagen im Hochfrequenzbereich. Allerdings schöpft der maximal ermittelte und auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Messwert gerade einmal 0,02 Prozent des gültigen Leistungsflussdichtegrenzwertes der 26. BImSchV aus (dies entspricht etwa 1,4 Prozent des gültigen Feldstärkegrenzwertes).
- Die Exposition von WiMAX-Anlagen im lizenzierten Frequenzbereich ist mit 0,0004 Prozent leistungsbezogener Grenzwertausschöpfung (Median) im Mittel höher als von Anlagen im lizenzfreien Bereich (Median 0,000001 Prozent). Dies ist durch die Begrenzung der EIRP auf wenige Hundert Milliwatt bis zu maximal 4 Watt im lizenzfreien Bereich begründet. Der resultierende Unterschiedsfaktor von mehr als 25 dB zwischen lizenzierten und lizenzfreien Anlagen wurde bereits in Abschnitt 3.5 diskutiert.
- Bezüglich der Medianwerte zählt WiMAX im unlizenzierten Bereich ebenso wie WLAN-Anlagen zur Außenversorgung zu den Funkanlagen mit den geringsten Immissionen aller hier verglichenen Funkdienste. Im lizenzierten Bereich werden zwar höhere Immissionen erreicht, die bezüglich des Medianwertes über UKW, DAB-Rundfunk und TV liegen (wobei in den entsprechenden Untersuchungen zu Rundfunk und TV die Messpunkte nicht primär in unmittelbarer Nähe der Sender lagen). Allerdings sind die Immissionen durch DECT-Anlagen, Indoor-WLAN-Anlagen, LMK-Radio und Mobilfunk-Basisstationen im Mittel zum Teil erheblich größer als die durch WiMAX-Anlagen im lizenzierten Bereich hervorgerufenen Immissionen.

5 Weitere Charakteristika von WiMAX-Immissionen

5.1 Zeitlicher Verlauf der Immission

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit Langzeitmessungen in der Nähe von WiMAX-Standorten. Hierzu wurden an mehreren Messpunkten die Immissionen von WiMAX-Sendeanlagen im lizenzfreien und auch im lizenzierten Frequenzbereich über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden aufgenommen. Die Messungen sollen mögliche auslastungsabhängige Immissionsschwankungen quantifizieren. Als Messverfahren wurde die frequenzselektive Messung mit RMS-Detektor und entsprechend langer Sweepzeit gemäß Abschnitt 2.2.3 des Teilberichts II verwendet. Als Messantenne kamen Horn- und logarithmisch-periodische Antennen zum Einsatz.

5.1.1 Grundschule Steinberg am See

Der Messpunkt befindet sich in einem lateralen Abstand von ungefähr 120 Meter zu einem WiMAX-Senderstandort (lizenzfreier Frequenzbereich, $f = 5.580$ MHz) in Steinberg am See (Landkreis Schwandorf, Bayern). Die Messeinrichtung wurde in einem Lehrmittellager im ersten Obergeschoss der Grundschule von Steinberg am See aufgebaut. Es bestand *direkte Sicht* zur Sendeanenne (Rundstrahler). In den folgenden Bildern sind die Lage des Senderstandortes und des Messpunktes sowie der Messaufbau zu sehen.



Bild 5.1: Lageplan (links) und Messort (rechts)



Bild 5.2: Messaufbau (links), WiMAX-Antenne vom Messort aus gesehen (rechts)

In Bild 5.3 ist der gemessene Immissionsverlauf über 24 Stunden dargestellt. Das Messsystem war dabei so eingestellt, dass im Zeitbereich mittels einer sehr langen Sweeptime von 5 Sekunden durch den aktivierten RMS-Detektor aus den auslastungsabhängig unterschiedlich ausgeprägten Burstsignalen der Leistungsmittelwert (RMS-Wert) bestimmt und abgespeichert wurde. Es wurde somit etwa alle sechs Sekunden ein Messwert gespeichert.

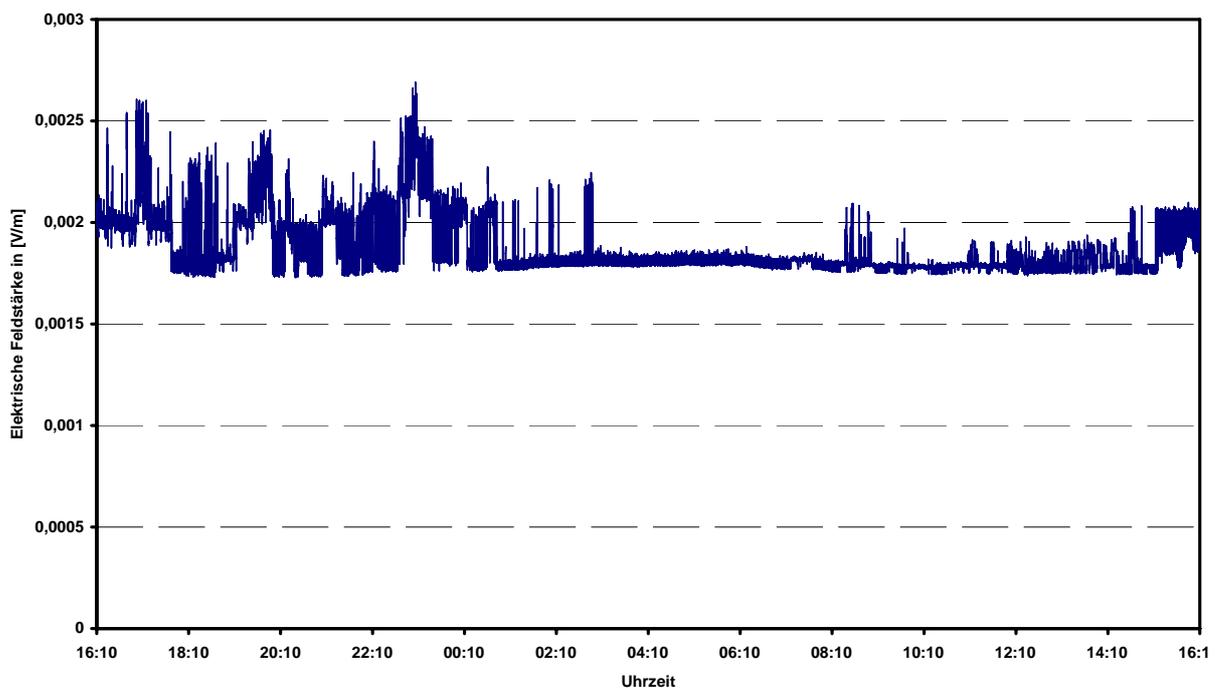


Bild 5.3: Steinberg am See: Feldstärkeverlauf des gemessenen WiMAX-Signals

In den Abendstunden nimmt die Immission etwas zu, da offensichtlich einige Nutzer nun Datentransfer durchführen. In der Nacht hingegen erreichen die gemessenen Felder einen Minimalwert, der durch die immer abgegebenen Signalisierungssignale der Station bedingt ist. Tagsüber ist gelegentlich auch etwas Datenverkehr zu beobachten, allerdings deutlich weniger, als in den Abendstunden. Dies ist auch einleuchtend, da das Versorgungsgebiet der Station hauptsächlich Wohnbereiche abdeckt, und im privaten Umfeld erfahrungsgemäß eher in den Abendstunden das Internet genutzt wird. Die absolute Schwankungsbreite der Exposition beträgt hier etwa 3,5 dB.

5.1.2 Verbandshauptschule Staig

Der Messpunkt befindet sich in einem lateralen Abstand von ungefähr 60 Meter zu einem WiMAX-Senderstandort (lizenzierter Frequenzbereich) am Heizungskamin der Verbandshauptschule Staig (Landkreis Ulm, Baden-Württemberg). Die Messeinrichtung wurde auf dem Schulgelände in einem Sportgerätelager aufgebaut. Es bestand *direkte Sicht* zur Sendeantenne (zwei Sektorantennen in Richtung 200° bzw. 300°). In den folgenden Bildern sind die Lage des Senderstandortes und des Messpunktes sowie der Messaufbau zu sehen.

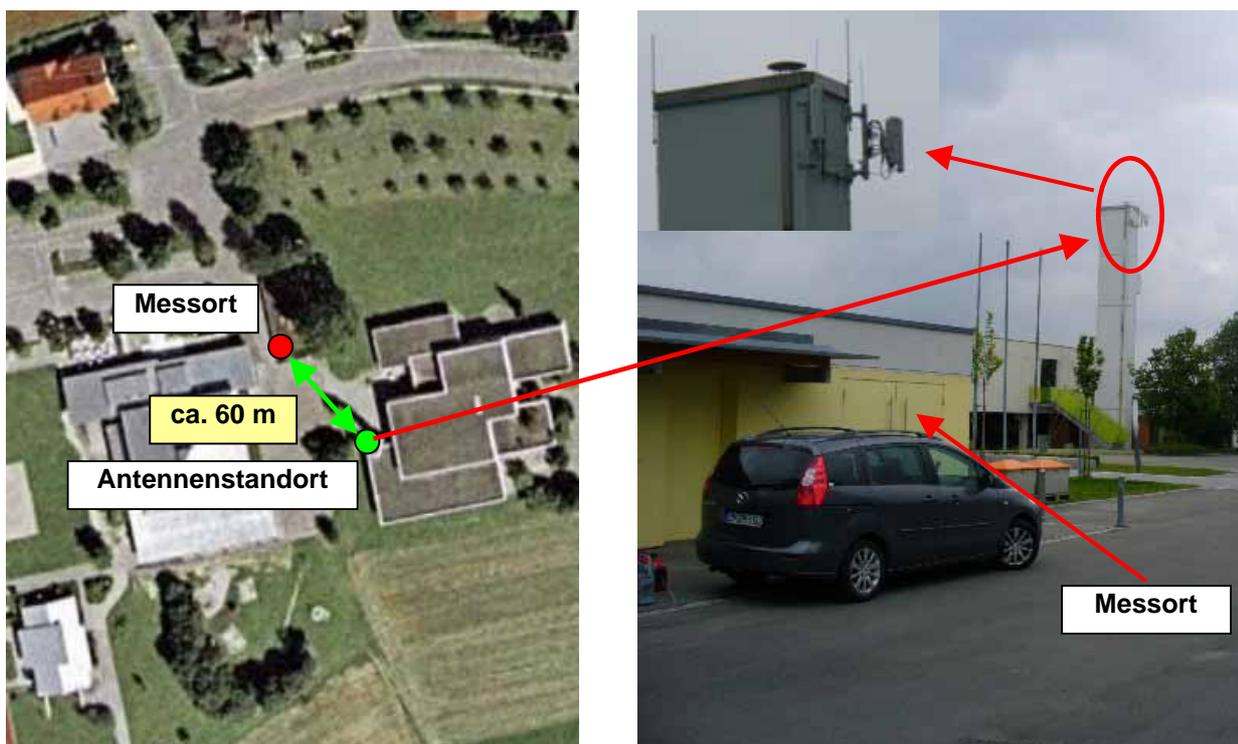


Bild 5.4: Lageplan (links) und Messort und Antennenstandort (rechts)



Bild 5.5: Messaufbau (links), WiMAX-Antennen vom Messort aus gesehen (rechts)

In Bild 5.6 ist der gemessene Immissionsverlauf über 24 Stunden dargestellt. Es wurde etwa alle sechs Sekunden ein Messwert gespeichert.

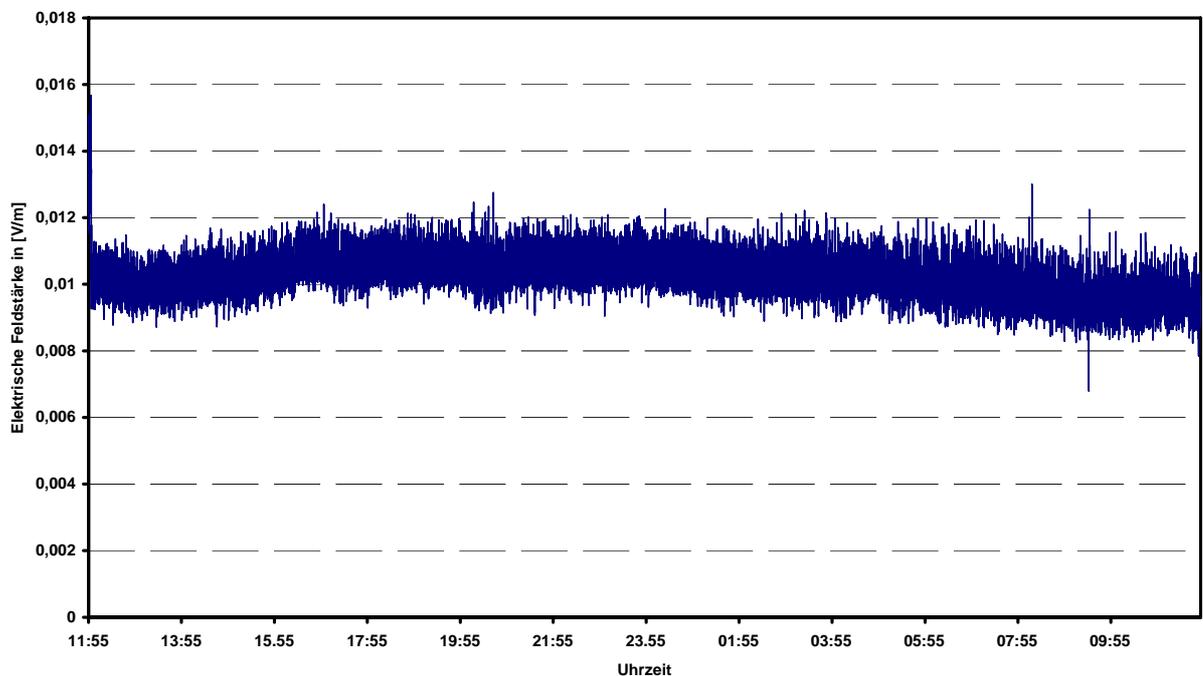


Bild 5.6: Verbandshauptschule Staig: Feldstärkeverlauf des gemessenen WiMAX-Signals

Während der gesamten 24 Stunden wurde keine auslastungsabhängige Immissionsschwankung festgestellt. Es ist also zu vermuten, dass die hier vermessene Sendestation noch nicht von einer nennenswerten Zahl an Kunden genutzt wird.

5.1.3 Büro der Firma IKS in Wadrill

Eine dritte Langzeitmessung über 27 Stunden wurde in einem Büro der Firma IKS in Wadrill (Saarland) durchgeführt. Diese Firma betreut den Betrieb des Mobile WiMAX-Netzes im lizenzierten Frequenzbereich bei 3,5 GHz in Wadrill. Das Büro ist etwa 420 m von der Anlage entfernt und hat Sichtverbindung zu dieser. Die Lage des Messortes entspricht den in Bild 2.7a eingezeichneten Messpunkten 7.07+7.08. Bild 5.7 zeigt den Messaufbau der Langzeitmessung. Während der Messung war das Fenster geschlossen.



Bild 5.7: Messaufbau (links) und WiMAX-Anlage (rechts)

Gemessen wurden die Immissionen des 40°-Sektors, die am Messpunkt gegenüber den Immissionen der anderen Sektoren dominierend waren. Die Langzeitmessung lief von Samstag, 7.6. 19:00 Uhr bis Sonntag, 8.6.2008 22:00 Uhr. Es wurde etwa alle 8 Sekunden ein Messwert abgespeichert. Bild 5.8 zeigt das Ergebnis der Langzeitmessungen.

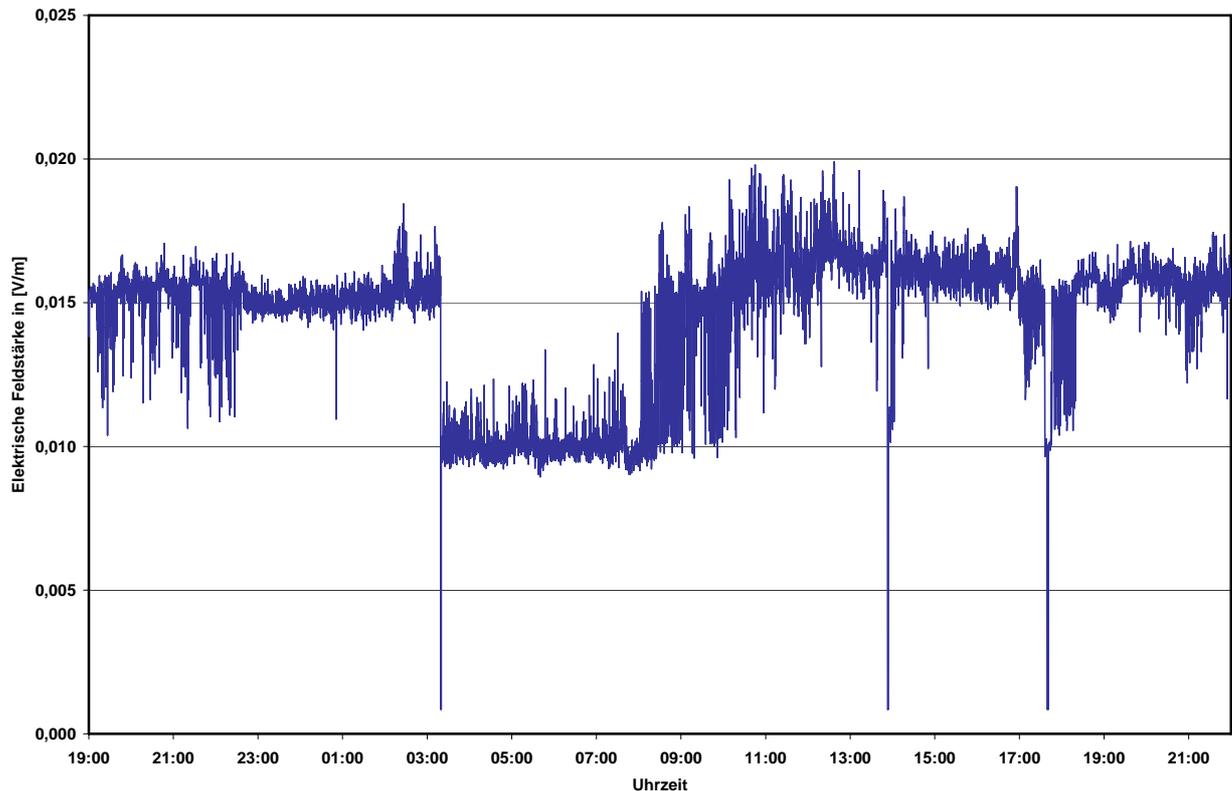


Bild 5.8: IKS-Büro Wadrill: Feldstärkeverlauf des gemessenen WiMAX-Signals

In der Immission sind deutliche Auslastungsschwankungen zu erkennen, die auf intensiven Datenverkehr schließen lassen. Im Gegensatz zu der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Messung ist hier allerdings ein tageszeitlicher Verlauf mit besonders intensiven Verkehrszeiten und weniger intensivem Verkehr nur schwer auszumachen. Dies könnte auch durch den Umstand begründet sein, dass die Messung nicht an einem Wochentag, sondern an einem Wochenende stattfand, bei dem das Internetnutzungsverhalten unter Umständen anders ist als am Wochentag.

Auffällig ist hingegen, dass die Anlage während der Laufzeit der Messungen offenbar drei mal kurzzeitig ausgeschaltet wurde: Kurz nach 3 Uhr Nachts, etwa gegen 14 Uhr und um 17:30 Uhr sinkt der gemessene Pegel auf einen Wert, der die Rauschgrenze des Messsystems darstellt. Wohingegen sich bei der Abschaltung während der Nachmittagstunden sehr rasch wieder Verkehr aufbaut, ist dies während der Nachtabschaltung anders: Da die Verbindung zwischen Endgerät und Basisstation manuell wieder hergestellt werden muss, verblieb die Immission bis in die Morgenstunden auf einem Wert, der offensichtlich die „Grundimmission“ ohne Verkehr repräsentiert. Ab etwa 8 Uhr wurde der Verbindungsabbruch seitens der Endgeräte-Nutzer offenbar bemerkt und die Verbindung neu hergestellt, wodurch sich auf dem Netz dann auch wieder Verkehrslast einstellte.

Die absolute Schwankungsbreite der Exposition beträgt hier etwa 6 dB. Die Rauschgrenze des Messsystems liegt mehr als 20 dB unter der „Grundimmission“ ohne Verkehr.

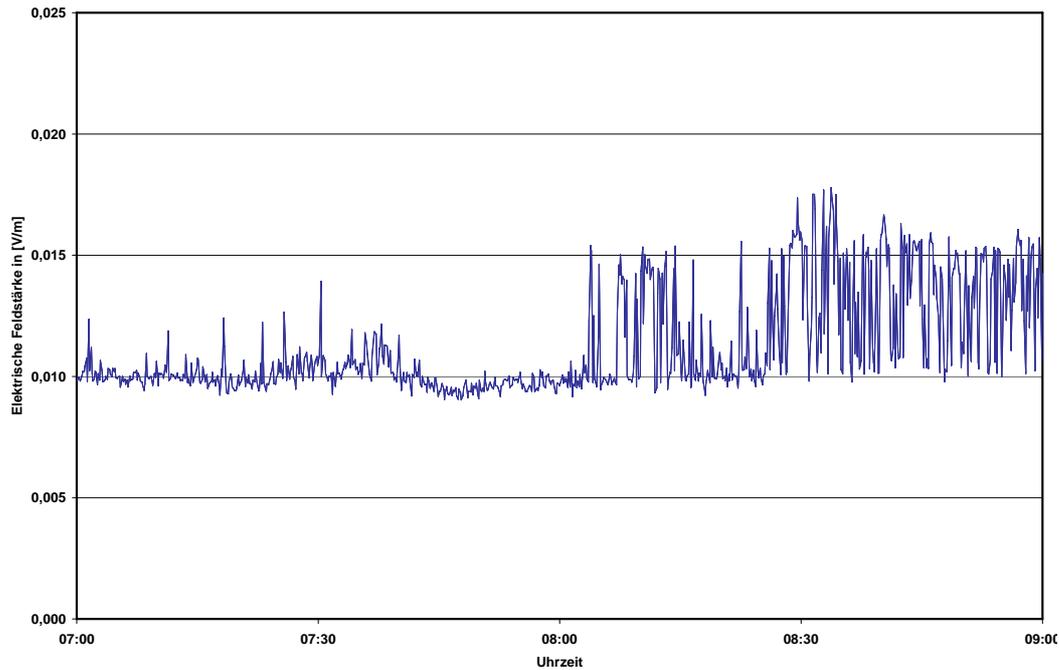


Bild 5.9: IKS-Büro Wadrill: Teilaufnahme von Bild 5.8 zwischen 7 und 9 Uhr

Bild 5.9 zeigt eine Detailaufnahme im Zeitraum zwischen 7 und 9 Uhr, in der nach der nächtlichen Abschaltung die ersten Geräte wieder ans Netz gingen und eine messbare Verkehrslast erzeugten. Durch die kurzen Abspeicherintervalle für die gemessenen Immissionswerte ist auch in diesem Detailbild eine gute Auflösung gegeben.

5.2 Örtliche und zeitliche Durchschnittswerte

Alle in Kapitel 2 vorgestellten Messwerte stellen entsprechend den Vorgaben der 26. BImSchV örtlich und zeitlich *maximierte* Immissionen dar, d.h. sie sind örtlich maximale Feldwerte in einem Untersuchungsvolumen (Schwenkmethode), die auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert wurden.

In diesem Abschnitt soll exemplarisch untersucht werden, wie groß örtlich und zeitlich *gemittelte* Immissionen sind bzw. wie groß typischerweise Unterschiede zwischen örtlich und zeitlich maximierten und gemittelten Immissionen sind.

Die Untersuchungen wurden in den Szenarien

- outdoor, mit Sicht zur Sendeanlage,
- outdoor, ohne Sicht zur Sendeanlage,
- indoor, mit Sicht zur Sendeanlage und
- indoor, ohne Sicht zur Sendeanlage

durchgeführt. Folgende Messungen wurden dabei vorgenommen:

- Örtliches Maximum, zeitlicher Maximalwert mit Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand (Überprüfung der Grenzwerte): Messung mit Schwenkmethode und anschließender Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung. Die Messungen er-

folgten spektral bei 100 ms Sweepzeit mit der isotropen Kugelsonde des Messsystems TS-EMF (Rohde & Schwarz), um eine Vergleichbarkeit zu den folgenden Durchschnittswert-Messungen sicherzustellen. Die Antennenfaktoren wurden im Labor der IMST GmbH messtechnisch ermittelt. Diese Messung dient als Referenz. Die Hochrechnung erfolgte auf das Pegelniveau der Präambel unter Berücksichtigung des Tastverhältnisses beim untersuchten TDD-Szenario (siehe Abschnitt 2.2.1 in Teilbericht II).

- **Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert:** In einem Volumen von ca. 1 m x 1 m x 1 m (L x B x H) wurde eine Langzeitmessung mit der isotropen 3-Achsen-Kugelsonde durchgeführt, bei der die Sonde punktrasterartig nacheinander an 27 Messpunkten (Würfel mit 3x3x3 Punkten) positioniert wurde. Als Messverfahren wurde die Kanalleistungsmessung mit einer Sweepzeit von 2,5 s pro Achse der Isotropsonde verwendet; damit wird eine Verweildauer pro Pixel von genau einer Rahmenlänge des untersuchten WiMAX-Signals von 5 ms erreicht. Die entstehenden Messwerte wurden leistungsbezogen gemittelt; weiterhin wurden auch die im Volumen auftretenden Maximal- und Minimalwerte extrahiert. Bei den Indoormessungen wurde das Messvolumen an die vorliegende örtliche Situation angepasst, wobei immer ein Mindestabstand der Messantenne von 50 cm zu Wänden und Mobiliar gewährleistet wurde.

Die Untersuchungen wurden im Umfeld der bereits im Abschnitt 2.7 beschriebenen Mobile-WiMAX Anlage in Wadrill (Saarland) durchgeführt, die im lizenzierten Frequenzbereich bei 3,5 GHz arbeitet. Es wurden speziell die Immissionen durch den 40°-Sektor untersucht.

Outdoor mit Sicht

Das Szenario „Outdoor mit Sicht“ befindet sich direkt vor der Sendeanlage etwa am Messpunkt 7.01 (Abschnitt 2.7) mit direkter Sicht zu den Sendeantennen. In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse der Messungen aufgelistet. Als Referenz dient die Messung zur Überprüfung der Grenzwerte. In der rechten Spalte „Differenz“ ist der Unterschied der Messwerte zum auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Referenzwert aufgelistet. Hierdurch kann beurteilt werden, inwieweit „reale“ Immissionen und „maximale“ Immissionen differieren.

| Szenario: Outdoor mit Sicht | | Referenzwert: 106,4 dB μ V/m |
|-----------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert | | Differenz zum Referenzwert |
| örtlicher Maximalwert | 101,7 dB μ V/m | -4,7 dB |
| örtlicher Minimalwert | 89,4 dB μ V/m | -17,0 dB |
| örtl. und zeitl. Durchschnittswert | 97,7 dB μ V/m | -8,7 dB |
| Spanne (Max-Min) | 12,3 dB | |

Tabelle 5.1: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Outdoor mit Sicht

Im hier dargestellten Fall beträgt der Unterschied zwischen örtlich und zeitlich gemitteltem Wert und dem maximierten Referenzwert 8,7 dB, was einem leistungsbezogenen Faktor von 7,4 entspricht.

Outdoor, ohne Sicht

Das Szenario „Outdoor ohne Sicht“ befindet sich ebenfalls direkt an der Sendeanlage, allerdings diesmal ohne Sichtverbindung zu den Sendeantennen. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Messungen dokumentiert.

| Szenario: Outdoor ohne Sicht | | Referenzwert: 91,8 dB μ V/m |
|-----------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert | | Differenz zum Referenzwert |
| örtlicher Maximalwert | 86,7 dB μ V/m | -5,1 dB |
| örtlicher Minimalwert | 80,7 dB μ V/m | -11,1 dB |
| örtl. und zeitl. Durchschnittswert | 84,1 dB μ V/m | -7,7 dB |
| Spanne (Max-Min) | 6,0 dB | |

Tabelle 5.2: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Outdoor ohne Sicht

Insgesamt lässt sich in vorliegendem Szenario eine geringere Spannbreite der Immission beim Durchführen der örtlichen und zeitlichen Mittelung feststellen (6,0 dB im Vergleich zu 12,3 dB im vorangegangenen Szenario mit Sichtverbindung). Der „reale“, d.h. örtlich und zeitlich gemittelte Wert liegt 7,7 dB unter dem für die Grenzwertüberprüfung relevanten Referenzwert. Dies entspricht leistungsmäßig einem Faktor von 5,9.

Indoor, mit Sicht

Das Szenario „Indoor mit Sicht“ befindet sich in einer etwa 350 m von der Anlage entfernten Wohnung. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse für dieses Szenario aufgelistet.

| Szenario: Indoor mit Sicht | | Referenzwert: 94,5 dB μ V/m |
|-----------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert | | Differenz zum Referenzwert |
| örtlicher Maximalwert | 88,6 dB μ V/m | -5,9 dB |
| örtlicher Minimalwert | 76,9 dB μ V/m | -17,6 dB |
| örtl. und zeitl. Durchschnittswert | 84,2 dB μ V/m | -10,3 dB |
| Spanne (Max-Min) | 11,7 dB | |

Tabelle 5.3: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Indoor mit Sicht

Die festgestellten Schwankungsbreiten entsprechen in etwa den Ergebnissen des Szenarios „Outdoor mit Sicht“. Der „reale“, d.h. örtlich und zeitlich gemittelte Wert liegt 10,3 dB unter dem für die Grenzwertüberprüfung relevanten Referenzwert. Dies entspricht leistungsmäßig einem Faktor von 10,7.

Indoor, ohne Sicht

Das Szenario „Indoor ohne Sicht“ befindet sich in einem anderen Zimmer der schon im Szenario „Indoor mit Sicht“ untersuchten Wohnung; diesmal jedoch ohne Sicht auf die Sendeanlage. In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse der Messungen aufgelistet.

| Szenario: Indoor ohne Sicht | | Referenzwert: 82,7 dB μ V/m |
|-----------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Örtlicher Volumen-Mittelwert, zeitlicher Mittelwert | | Differenz zum Referenzwert |
| örtlicher Maximalwert | 76,1 dB μ V/m | -6,6 dB |
| örtlicher Minimalwert | 67,3 dB μ V/m | -15,4 dB |
| örtl. und zeitl. Durchschnittswert | 72,3 dB μ V/m | -10,4 dB |
| Spanne (Max-Min) | 8,8 dB | |

Tabelle 5.4: Vergleich zwischen Durchschnittswerten und dem normativen Maximalwert, Szenario Indoor ohne Sicht

Die festgestellten Werte sind größenmäßig wesentlich geringer als in den anderen Szenarien. Aufgrund der relativ großen Entfernung zur Anlage und der fehlenden Sichtverbindung wurde hier knapp über der Rauschgrenze des Messsystems gearbeitet; die Messwerte wurden entsprechend korrigiert. Der „reale“, d.h. örtlich und zeitlich gemittelte Wert liegt 10,4 dB unter dem für die Grenzwertüberprüfung relevanten Referenzwert. Dies entspricht leistungsmäßig einem Faktor von 11,0.

Fazit:

Beim hier untersuchten Mobile-WiMAX-System wurden für unterschiedliche Szenarien Unterschiede zwischen „realen“ raum- und zeitgemittelten Werten und dem auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Wert zwischen 7,7 und 10,4 dB festgestellt. Dies entspricht leistungsbezogenen Unterschiedsfaktoren zwischen etwa 6 und 11. Während der Messungen war Verkehr auf dem WiMAX-Netz vorhanden.

Es ist jedoch einschränkend anzumerken, dass aufgrund der unterschiedlichen WiMAX-Systemkonfigurationen (Mobile vs. Fixed, lizenzfrei vs. lizenziert) diese Werte zwar als Anhaltspunkte dienen können, allerdings nicht ohne weiteres auf andere Systeme übertragbar sind. Weiterhin ist zu beachten, dass die Isotropie der verwendeten Messantenne gewissen Einschränkungen unterliegt, wie in Abschnitt 2.2.2.2 des Teilberichts II beschrieben. Trotzdem erscheinen die hier festgestellten Ergebnisse durchaus plausibel und liegen zwischen den unterschiedlichen Szenarien in vergleichbarer Größenordnung.

Aufgrund der für eine korrekte Mittelung notwendige lange Sweepzeit (eine kompletter dreiachsigen Durchlauf für einen Messpunkt dauerte etwa 10 Sekunden) kann die Mittelungsmessung nur als Punktrastermessung erfolgen; keinesfalls ist eine kontinuierliche Bewegung des Sensors durch das Prüfvolumen möglich.

5.3 Kleinskalige örtliche Schwankungsbreite

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Messungen zur kleinskaligen örtlichen Schwankungsbreite von Immissionen durch WiMAX Basisstationen vorgestellt. Die Messungen wurden mit einem zweidimensionalen Scannersystem (Isel) über eine Gesamtstrecke von 40 cm durchgeführt. Im Vergleich zu ähnlichen Untersuchungen bei GSM- und UMTS-Immissionen [BOR 06-2] wurde hier aufgrund der höheren Frequenz eine deutlich kleinere Abtastschrittweite von 5 mm gewählt (im Vergleich zu 2 cm in [BOR06-2]). Durch diese hohe Auflösung wird erreicht, dass sich innerhalb einer Wellenlänge des untersuchten 3,5 GHz WiMAX-Signals (ca. 8,6 cm) mehrere Abtastpunkte befinden und ein „Fast Fading“ somit detailliert erfasst werden kann.

Die Untersuchungen wurden im Umfeld der bereits im Abschnitt 2.7 beschriebenen Mobile-WiMAX Anlage in Wadrill (Saarland) durchgeführt, die im lizenzierten Frequenzbereich bei 3,5 GHz arbeitet. Es wurden speziell die Immissionen des 40°-Sektors untersucht.

Als Messorte wurden zwei Raumbereiche innerhalb eines Büros der Firma IKS ausgewählt. Vom ersten Raumbereich bestand Sichtverbindung zur Anlage (LOS), vom zweiten Raumbereich hingegen nicht (NLOS); in diesen konnten die Immissionen primär durch Reflexionen gelangen.

Auf das Scannersystem wurde eine isotrope Antenne (3-Achsen-Sonde des TS-EMF-Systems, Rohde & Schwarz) montiert, die zur Aufnahme des Feldes diente. Die Isotropie dieser Antenne wurde bereits im Teilbericht II bewertet. Als Messverfahren wurde die Kanalleistungsmessung mit Max-Hold Funktion eingesetzt; die Verweilzeit pro Pixel war kleiner als die Dauer des Beacon-Pulses.

In den nachfolgenden Bildern ist der Messort, das Messsystem sowie die Ergebnisse für den LOS- und den NLOS-Raumbereich dokumentiert.



Bild 5.10: Scannermessungen im Büro der IKS in Wadrill (Saarland)

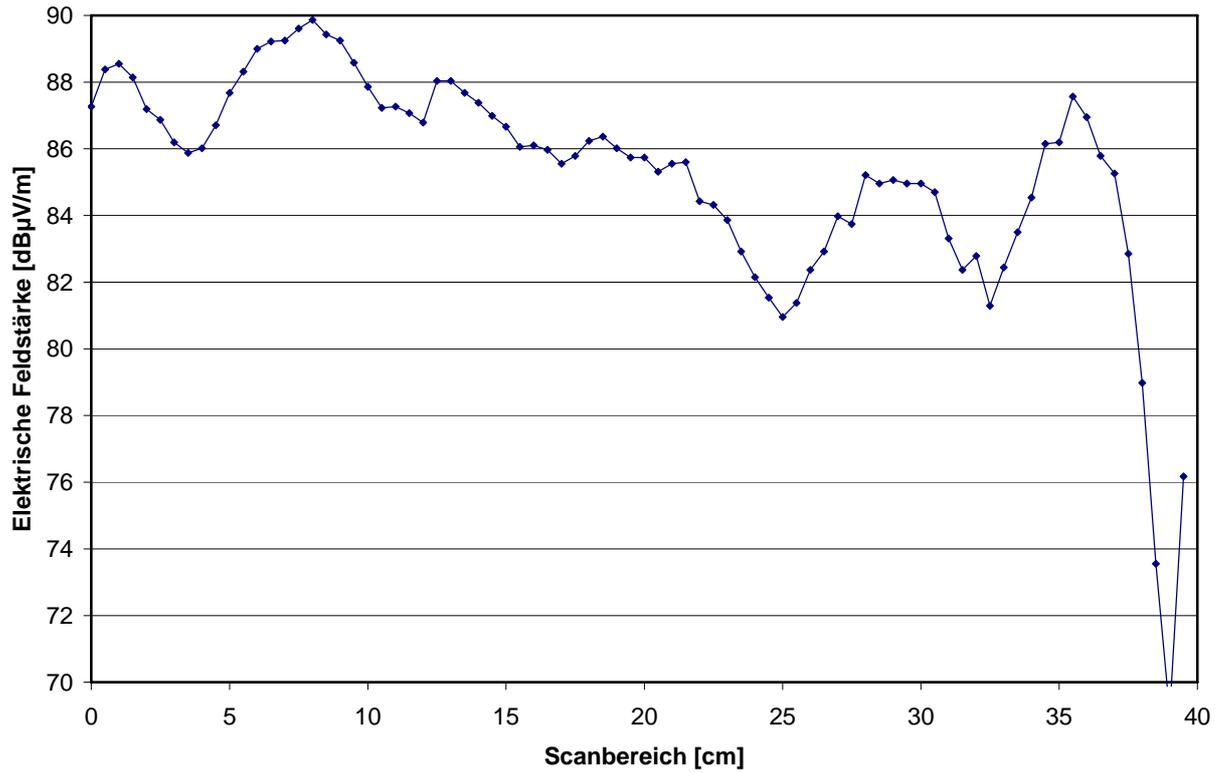


Bild 5.11: Feldstärkeprofil im Raumbereich mit Sicht auf die WiMAX-Anlage

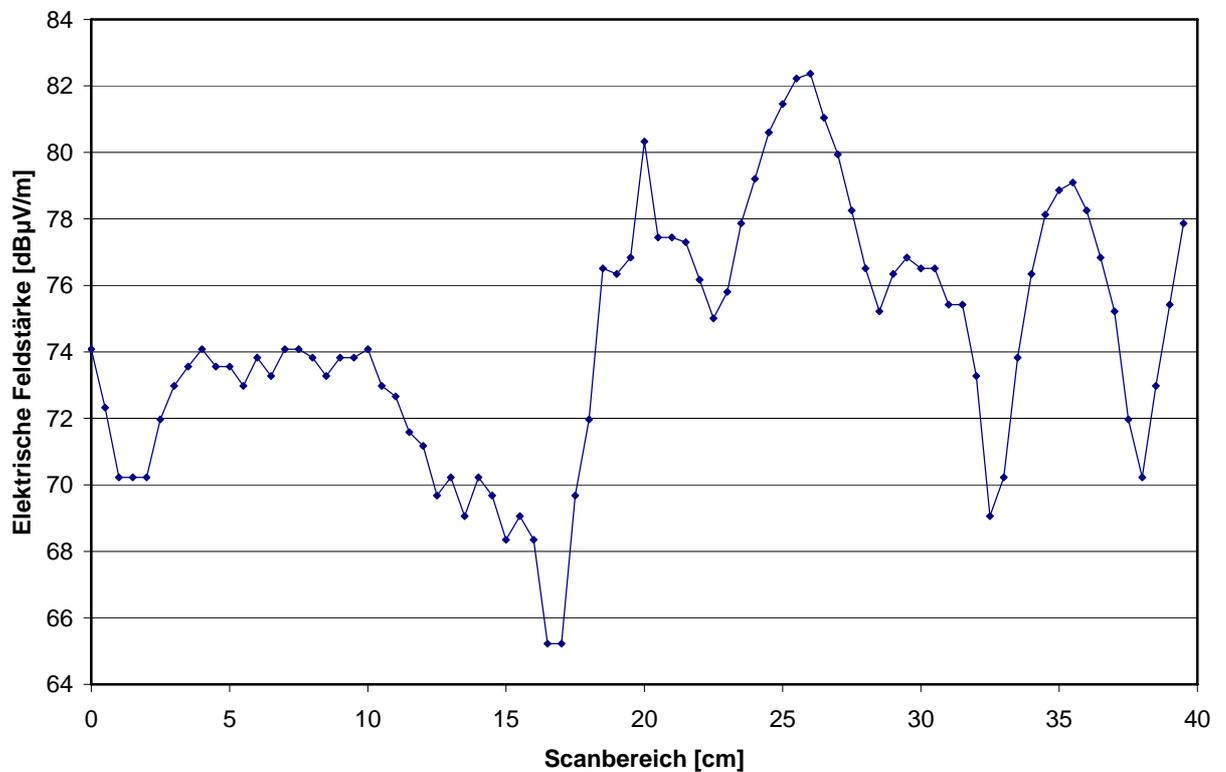


Bild 5.12: Feldstärkeprofil im Raumbereich ohne Sicht auf die WiMAX-Anlage

Zum Vergleich ist in Bild 5.13 das Ergebnis einer kleinskaligen Messung von GSM- und UMTS-Immissionen aus [BOR 06-2] in einer Umgebung dargestellt, die mit dem hier untersuchten Szenario „Raumbereich ohne Sicht auf die WiMAX-Anlage“ vergleichbar ist. Zu beachten ist, dass die Längen der Scanwege zwischen GSM/UMTS (Bild 5.13) und WiMAX (Bilder 5.11 und 5.12) unterschiedlich sind.

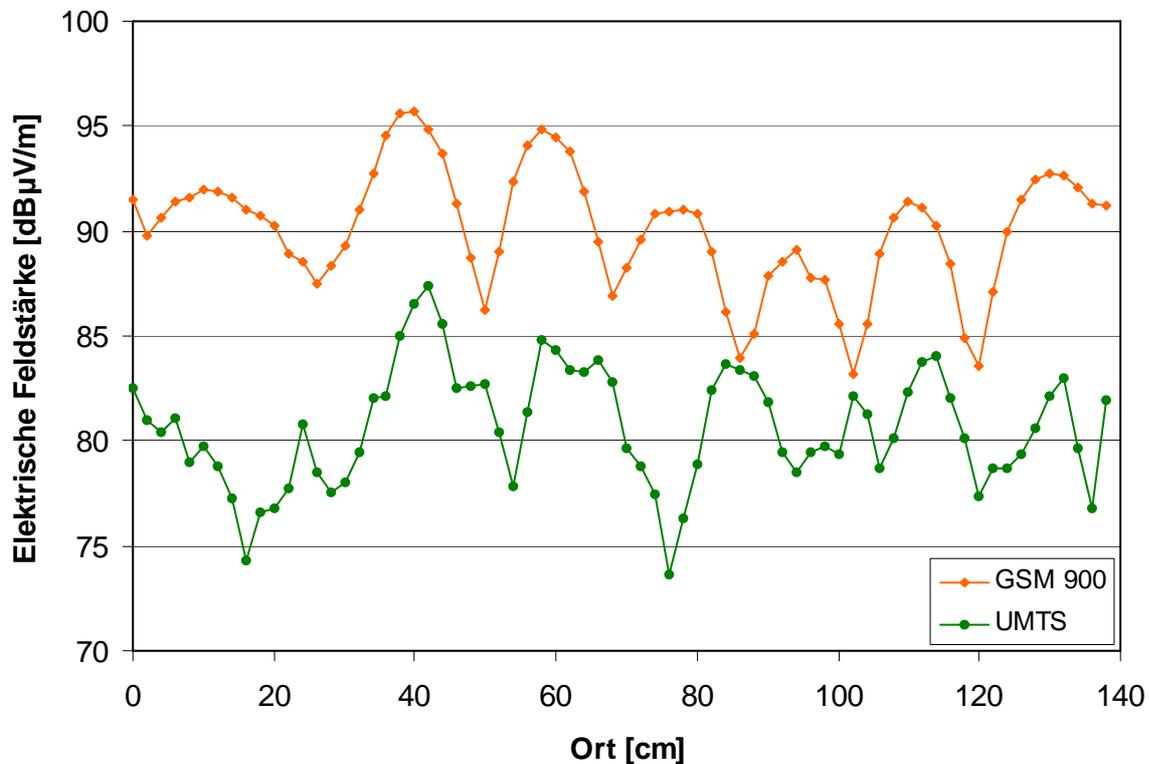


Bild 5.13: Feldstärkeprofil bei GSM/UMTS, Szenario ohne Sicht auf die Anlage, aus [BOR 06-2]

Aus den Messergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Ähnlich wie bei den Untersuchungen zu GSM und UMTS sind auch bei WiMAX ausgeprägte kleinskalige örtliche Schwankungen durch „Fast Fading“ Effekte zu sehen.
- Die Schwankungsamplitude ist beim Szenario ohne Sicht mit typisch 10 dB größer als beim Szenario mit Sicht (typisch 4 dB; der starke Feldabfall ab etwa 36 cm in Bild 5.11 ist auf einen Abbruch der Sichtverbindung zurückzuführen).
- Die Schwankungsamplitude beim Szenario ohne Sicht erreicht damit ähnliche Werte wie im vergleichbaren Szenario bei GSM und UMTS. Damit hat sich auch hier bestätigt, dass eine im Vergleich zu GSM wesentlich größere spektrale Bandbreite (beim hier untersuchten WiMAX-Signal ca. 4,8 MHz) offenbar nicht mit einem wesentlich geringerem „Fast Fading“ verbunden ist. Diese Effekt trat bereits bei den Untersuchungen zu UMTS in [BOR 06-2] auf. Die Untersuchungen belegen somit, dass bei der Messung von WiMAX-Immissionen die Maximalwertsuche im Messvolumen ebenso sorgfältig durchgeführt werden muss wie bei der Messung von GSM- und UMTS-Immissionen.

6 Ermittlung der Exposition durch Endgeräte

Wohingegen die Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel auf die Immissionen durch die fest installierten WiMAX-Basisstationen fokussiert waren, soll im folgenden die Exposition durch die mobilen Endgeräte näher betrachtet werden.

Ähnlich wie bei Mobiltelefonen verfügen auch WiMAX-Endgeräte über Leistungsregelungsmechanismen, so dass hier zwischen einer „worst case“ Exposition (bei maximaler Sendeleistung) sowie einer „typischen“ Exposition unter Alltagsbedingungen unterschieden werden muss. Zusätzlich zur Regelung der Sendeleistung erfolgt, vergleichbar z.B. mit der WLAN-Technik, eine Variation der mittleren abgestrahlten Leistung auch über die Änderung der zeitlichen Belegung des für den Uplink zur Verfügung stehenden Teilframes. Dies ist in Abschnitt 2.3.1 des Teilberichts II näher beschrieben.

Für die Expositionsbeurteilung haben sowohl die Betrachtung der maximalen, als auch der typischen Exposition von Endgeräten ihre Berechtigung. Dies soll exemplarisch an einigen derzeit zur Verfügung stehenden Endgeräten in den nächsten Abschnitten erfolgen:

Die „Feldmessungen unter Laborbedingungen“ in Abschnitt 6.1 wurden bei maximaler Sendeleistung durchgeführt, um unabhängig von der momentanen Verkehrslast Aussagen über Abstands- und Richtungsabhängigkeiten der Exposition im Umfeld von Endgeräten zu erhalten. Die „Feldmessungen unter realen Bedingungen“ in Abschnitt 6.2 erfassen die Exposition an verschiedenen Raumpunkten bei typischen, alltäglichen Nutzungsbedingungen der Endgeräte.

Im Gegensatz zu Feldmessungen, die bei Messungen im Fernfeld oder zumindest im strahlenden Nahfeld Verwendung finden (d.h. ab Abständen von einigen Zentimetern), sind bei kürzeren Abständen aufgrund der Verkopplung des Menschen mit dem Endgerät SAR-Messungen durchzuführen. Diese werden unter maximalen Sendeleistungsbedingungen durchgeführt und sind in Abschnitt 6.3 beschrieben.

6.1 Feldmessungen unter Laborbedingungen

6.1.1 Untersuchte Geräte

Für die Messungen unter definierten Laborbedingungen wurden drei Endgeräte des Mobile WiMAX Standards (3 GHz Band) untersucht, die bereits in einem operativen Netz eingesetzt werden (Wadrill/Saarland). Es handelt sich um zwei Indoor und eine Outdoor Unit der Firma Zyxel. Bei den Indoor Units wurden ein Gerät ohne und ein Gerät mit WLAN ausgewählt. Die Outdoor Unit besteht aus einer außerhalb des Gebäudes zu montierenden Antenne, die mittels eines Kabels mit einem indoor installierten Gerät verbunden wird, das ebenfalls über WLAN verfügt. Die Geräte sind in Bild 6.1 abgebildet; ihre wichtigsten Parameter sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

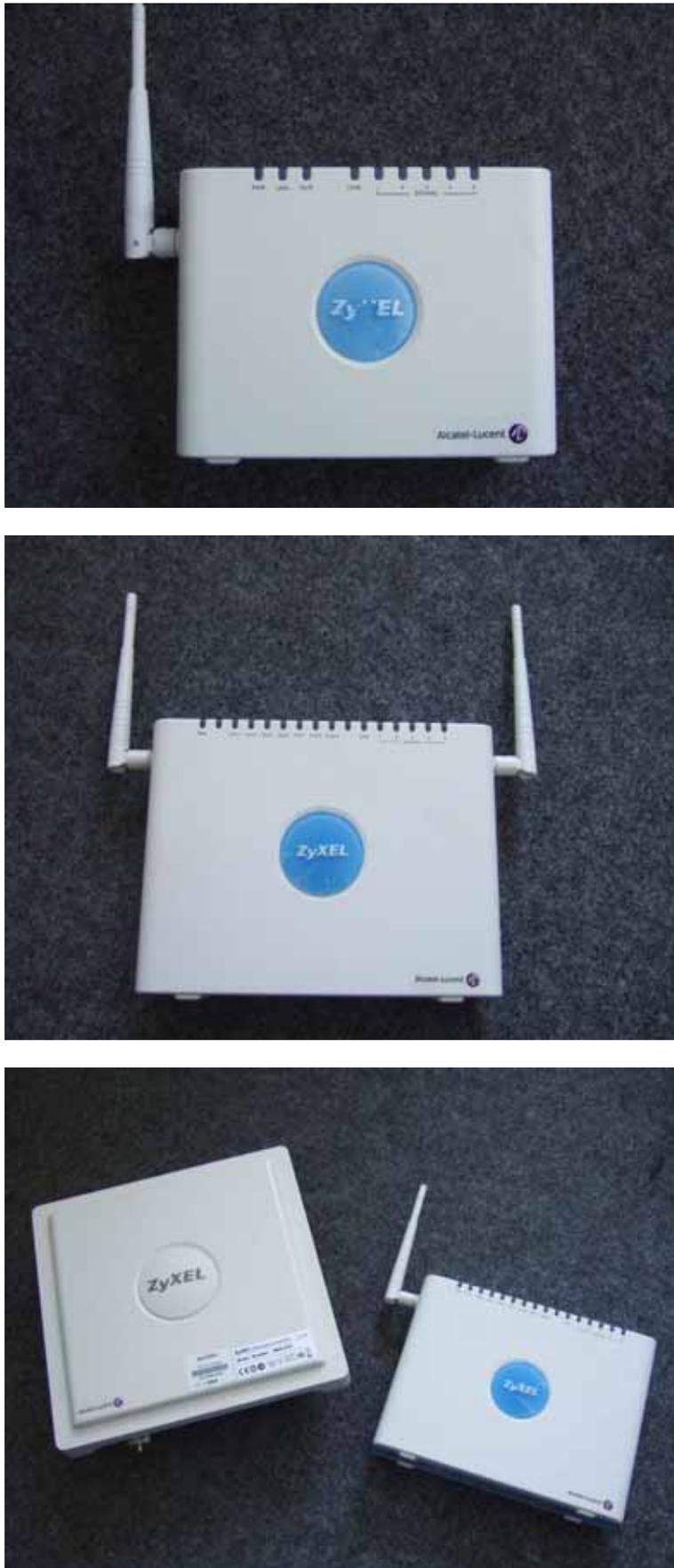


Bild 6.1: Fotos der untersuchten Endgeräte: ZyXel MAX-210M1 (oben), ZyXel MAX-210HW2 (Mitte) und ZyXel MAX-310 + MAX-3X0HW2 (unten)

| Bezeichnung | Indoor 1 | Indoor 2 | Outdoor |
|------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|
| Gerätetyp | MAX-210M1 | MAX-210HW2 | MAX-310 + MAX-3X0HW2 |
| Hersteller | Zyxel | Zyxel | Zyxel |
| Beschreibung | Indoor Unit | Indoor Unit mit WLAN | Outdoor Unit mit WLAN |
| Standard | Mobile WiMAX | Mobile WiMAX | Mobile WiMAX |
| Frequenzbereich | 3,4 - 3,6 GHz | 3,4 - 3,6 GHz | 3,4 - 3,6 GHz |
| Maximale Sendeleistung | 27 dBm | 27 dBm | 23 dBm |
| Antennengewinn | 6 dBi | 6 dBi | 14 dBi |

Tabelle 6.1: Daten der untersuchten Endgeräte

6.1.2 Messaufbau

Die Messung der durch die Endgeräte hervorgerufenen Exposition wurde in der EMV-Absorberkammer der IMST GmbH in Kamp-Lintfort durchgeführt. Die Kammer besteht aus einer metallischen Schirmhülle und hat die Außenmaße 13,0 m x 8,5 m x 6,3 m (LxBxH). Durch die Auskleidung mit einer Kombination aus Ferrit- und Schaumabsorbern an den Wänden und der Decke wird eine definierte und elektromagnetisch störungsfreie Messumgebung geschaffen, die weitgehend frei von Reflexionen ist. Der Aufbau der Expositionsmessungen ist in Bild 6.2 dargestellt:



Bild 6.2: Messaufbau bei der Expositionsmessung unter Laborbedingungen

Das zu untersuchende Endgerät wurde auf einen 80 cm hohen Holztisch platziert. In radialer Richtung wurde in Abständen von 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m und 5 m mit einer logarithmisch-periodischen Antenne (Schwarzbeck USLP-9142) und einem Spektrumanalysator (Rohde & Schwarz FSP-7) die Expositionen gemessen. Der Spektrumanalysator wurde im Zeitbereich in der Betriebsart Zero Span betrieben. Gemessen wurde die maximale Amplitude des Sendepulses, die dann mit dem verwendeten Puls-Pausen-Verhältnis auf eine zeitlich gemittelte Immission heruntergerechnet wurde. Die Messfrequenz betrug 3,5385 GHz; auf diese waren die zu messenden Geräte softwareseitig eingestellt. Die Messung erfolgte dabei jeweils in drei verschiedenen Höhen von 0,5 m, 1 m und 1,5 m über dem Boden. Die Messungen in den drei Höhen dienen zur Bildung eines Mittelwertes über der Längsachse eines stehenden bzw. sitzenden Menschen. Der metallische Boden der Kammer war nicht mit Absorbern ausgelegt.

Da die Messung der Endgeräte nicht in einem realen Netz mit zugehörigen Basisstationen erfolgte, war zur Ansteuerung der Endgeräte ein so genannter Basisstationssimulator notwendig. Hierfür wurde leihweise von der Firma Rohde & Schwarz der „WiMAX Communication Tester R&S CMW270“ zur Verfügung gestellt. Dieser Tester dient zur Überprüfung vielfältigster Funktionen von WiMAX-Endgeräten; für die hier vorliegenden Untersuchungen wurden allerdings nur die Funktionalitäten Verbindungsaufbau zum Endgerät sowie Veranlassung zum Senden mit konstanter, maximaler Sendeleistung benötigt. Der Tester wurde außerhalb der Absorberkammer aufgebaut und mit einer Antenne verbunden, die hinter den Absorbern unter dem Holztisch (siehe Bild 6.2) installiert war.

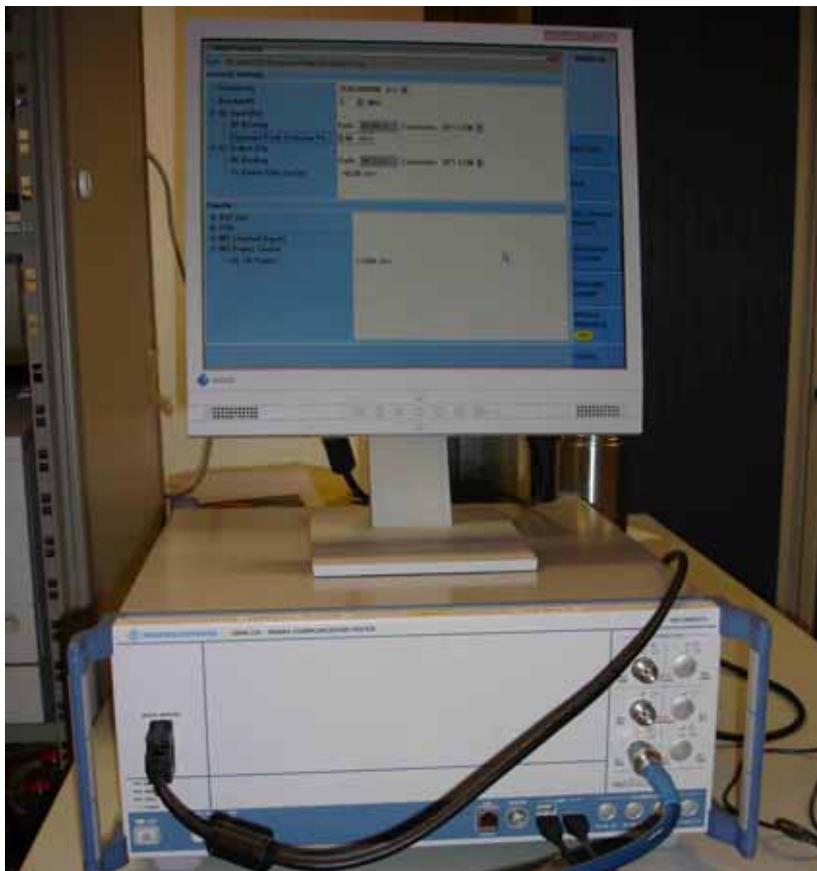


Bild 6.3: WiMAX Communication Tester R&S CMW270 zur Ansteuerung der Endgeräte

Bei der Verbindungsaufnahme zu den Endgeräten wurde das Endgerät zum Senden auf maximaler Sendeleistung veranlasst. Die Leistung am Antennenanschluss des Endgerätes wurde über einen Richtkoppler leitungsgeführt mit einem Spektrumanalysator überprüft. Sofern sich Abweichungen von den Herstellerangaben ergaben, wurden die Ergebnisse der Expositionsmessungen auf die Leistungsangabe des Herstellers skaliert (die hierbei gemessenen Pegel waren in keinem Fall höher als die vom Hersteller angegebenen). Außerdem wurden zur Kontrolle die in 3-4 m Entfernung zum Endgerät gemessenen Strahlungspegel mit den theoretisch zu erwartenden Werten bei Freiraumausbreitung verglichen.

Die Messergebnisse wurden jeweils in vier verschiedenen Richtungen vom Gerät aufgenommen, um eventuelle Richtungsabhängigkeiten der Immission zu untersuchen. Die Lage der verschiedenen Achsen ist in Bild 6.4 dargestellt.

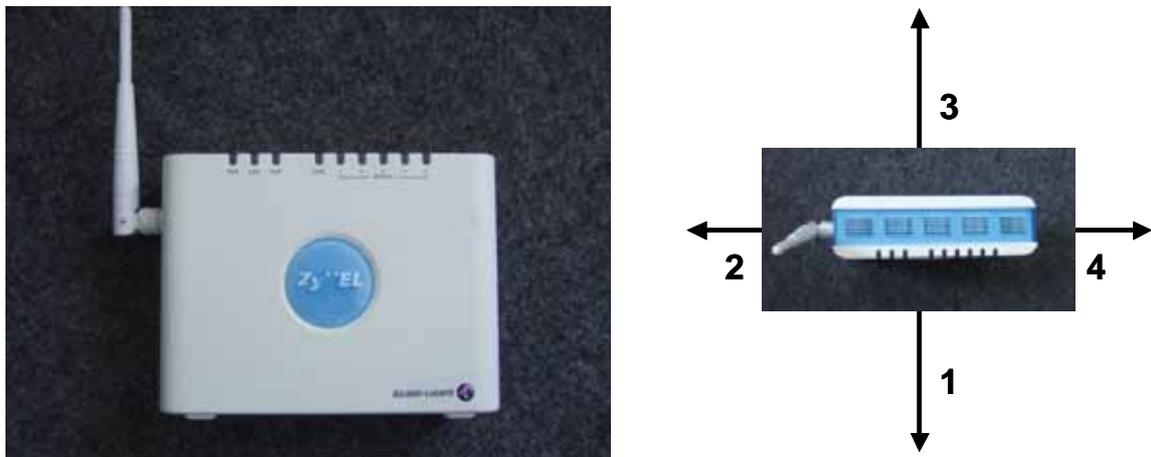


Bild 6.4: Lage der Richtungsachsen für die Immissionsmessungen

6.1.3 Ergebnisse

In Bild 6.5 ist das Ergebnis der abstandsabhängigen Immission vom Endgerät ZyXel MAX-210M1 in einer Messhöhe von 1 m über dem Boden dargestellt. Die Exposition ist als feldstärkebezogene Ausschöpfung des Referenzwertes nach [ICNIRP 98] bzw. [99/519/EG] in Prozent angegeben.

In Bild 6.6 ist die über die drei Messhöhen gemittelte Exposition dargestellt. Die Feldstärke wurde hierbei quadratisch gemittelt. Hier beginnt die Kurve erst ab 1 m Abstand, da sich in 50 cm Abstand vom Gerät aufgrund der Blockierung durch den Holztisch kein sinnvoller Messwert aufnehmen ließ.

Die Exposition nimmt in der Regel gleichmäßig mit dem Abstand ab. Wohingegen sie bei 50 cm Abstand in 1 m Höhe Werte bis etwa 10,1 V/m (17 % vom Feldstärke-Referenzwert) erreicht, ist sie in 5 m Entfernung bereits auf maximal 1,2 V/m (2 % vom Referenzwert) gesunken. Die Mittelung über die Längsachse einer Person führt nur bei Entfernungen bis etwa 2 m zu nennenswerten Abweichungen von den Messwerten, die in 1 m Höhe ermittelt wurden. Außerdem ist eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Geräteseite zu erkennen: An der Vorderseite (Richtung 1) ergeben sich tendenziell etwas höhere Immissionen als an den anderen Geräteseiten.

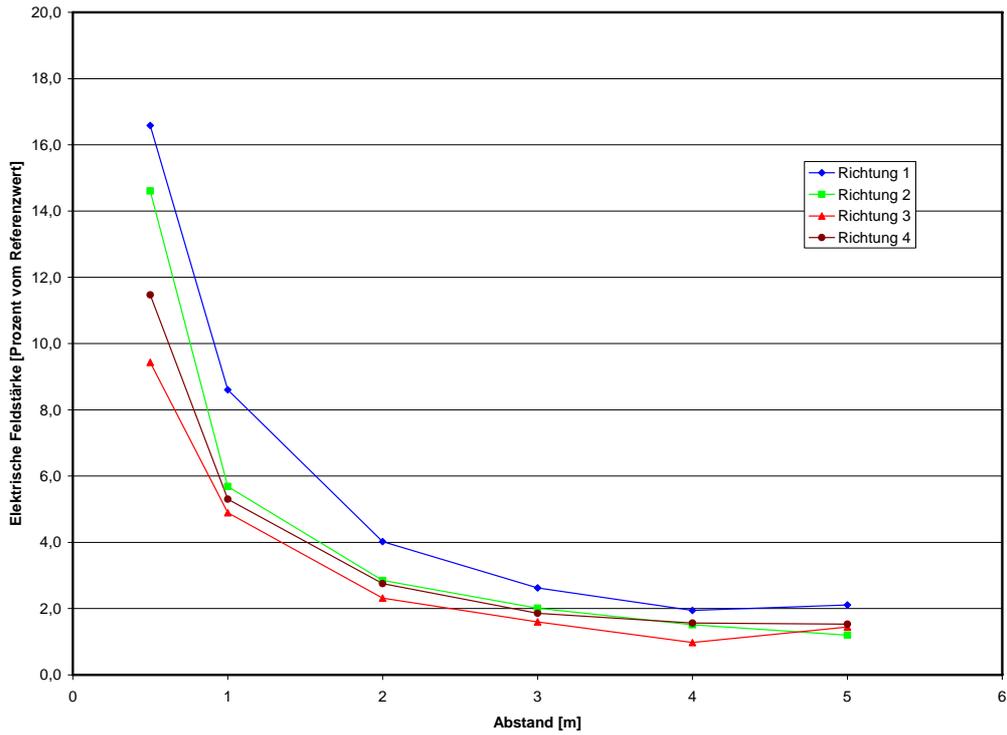


Bild 6.5: Abstandsabhängigkeit der Exposition für Zyxel MAX-210M1, Messhöhe 1,0 m

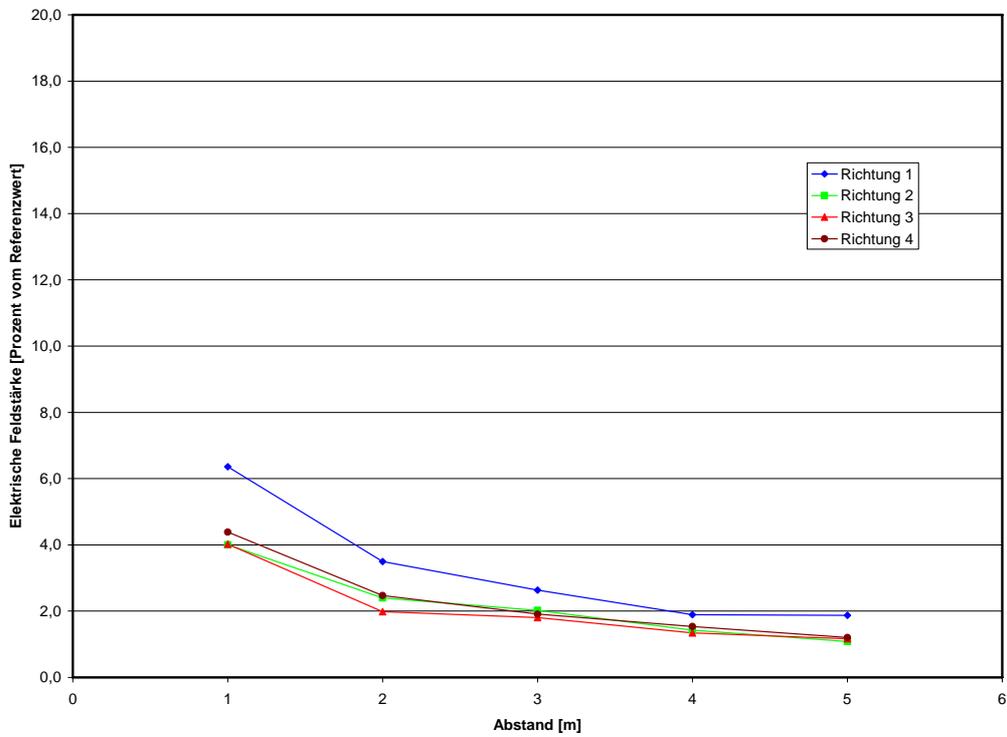


Bild 6.6: Abstandsabhängigkeit für Zyxel MAX-210M1, Mittelwert für die drei Messhöhen 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m

In den Bildern 6.7 und 6.8 sind die entsprechenden Abstandsabhängigkeiten für das Endgerät Zyxel MAX-HW2 dargestellt.

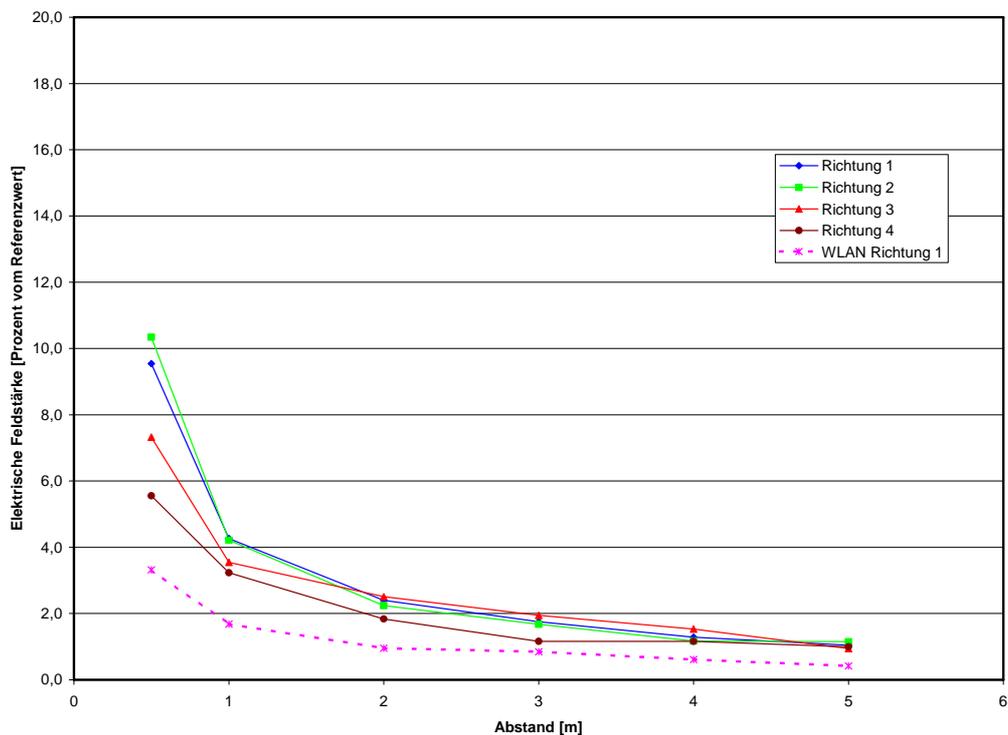


Bild 6.7: Abstandsabhängigkeit der Exposition für Zyxel MAX-210HW2, Messhöhe 1,0 m

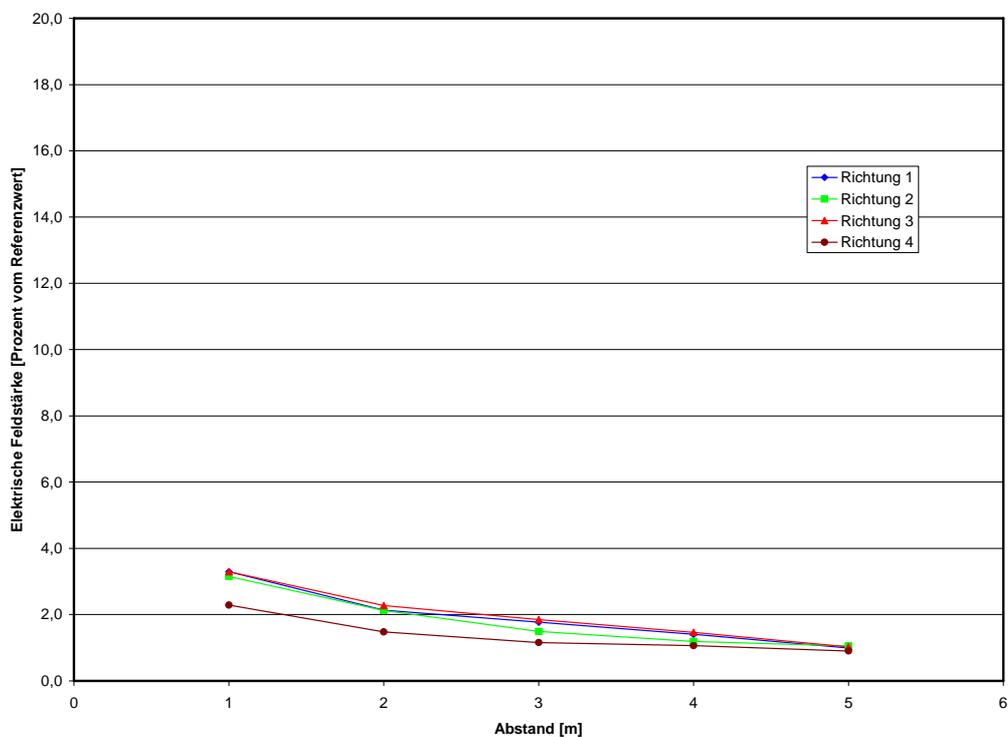


Bild 6.8: Abstandsabhängigkeit für Zyxel MAX-210HW2, Mittelwert für die drei Messhöhen 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m

Beim Zyxel MAX-210HW2 ergibt sich eine ähnliche Abstandsabhängigkeit wie beim vorangegangenen Gerät, allerdings mit etwas differierenden Absolutwerten. Interessanterweise erscheint hier die Abstrahlung von der Vorderseite im Vergleich zu den anderen Seiten nicht mehr die stärkste zu sein, sondern liegt mit der linken Seite (Richtung 2) gleichauf. Dies könnte unter Umständen mit dem geänderten Hardwareaufbau zusammenhängen, da hier zusätzlich zum WiMAX-Funkteil auch ein WLAN-Funkteil enthalten ist. Da dieses Gerät über WLAN verfügt, wurde in 1 m Höhe in Richtung 1 zusätzlich die Immission durch WLAN vermessen. Eingestellt war der Standard 802.11g (2,4 GHz); die Immissionen des Beacon-Pulses wurden auf eine maximal mögliche Auslastung von 90 % des Zeitrahmens skaliert [SCHM 05]. Die Immissionsverhältnisse sind in Bild 6.7 dargestellt und zeigen, dass die Immission durch WLAN unter denen von WiMAX liegen. Hier macht sich die geringere maximale Sendeleistung von WLAN (laut Gerätebeschreibung etwa 14 dBm bei 802.11g) gegenüber dem WiMAX-Funkteil bemerkbar.

Das dritte untersuchte Gerät ist eine Outdoor Unit und besteht aus einer außerhalb des Gebäudes zu montierenden Antenne, die mittels eines Kabels mit einem indoor installierten Gerät verbunden wird. Zur Simulation einer möglichst realen Umgebung wurde hierbei die Antenne außerhalb der Absorberkammer positioniert. Durch die angelehnte Kammertür wurde das HF-Kabel zum Steuergerät geführt, das ähnlich wie die beiden Indoor Units auf dem Holztisch positioniert war. Bild 6.9 zeigt den verwendeten Aufbau.



Bild 6.9: Positionierung der Außenantenne (links) und des Steuergerätes (rechts) bei den Messungen der Outdoor Unit Zyxel MAX-310 + MAX-3X0HW2

Die Ergebnisse sind in Bild 6.10 und 6.11 dargestellt. Zu beachten ist hier, dass im Unterschied zu den vorangegangenen Diagrammen die Obergrenze gerade einmal 0,5 % Ausschöpfung des Feldstärke-Referenzwertes entspricht. Es ist also eindeutig zu sehen, dass durch die Outdoor Unit unter bestimmungsgemäßen Montagebedingungen im Vergleich zu den Indoor Units nur vergleichsweise geringe Immissionen beim Indoor Nutzer erzeugt werden. Dies ist verständlich, da das „felderzeugende Element“, die Außenantenne, nicht im Inneren eines Zimmers untergebracht ist, sondern in der Regel außen vor dem Fenster oder auf dem Dach, so dass seitens der Antenne höchstens Streustrahlungsanteile in das Zimmer gelangen können.

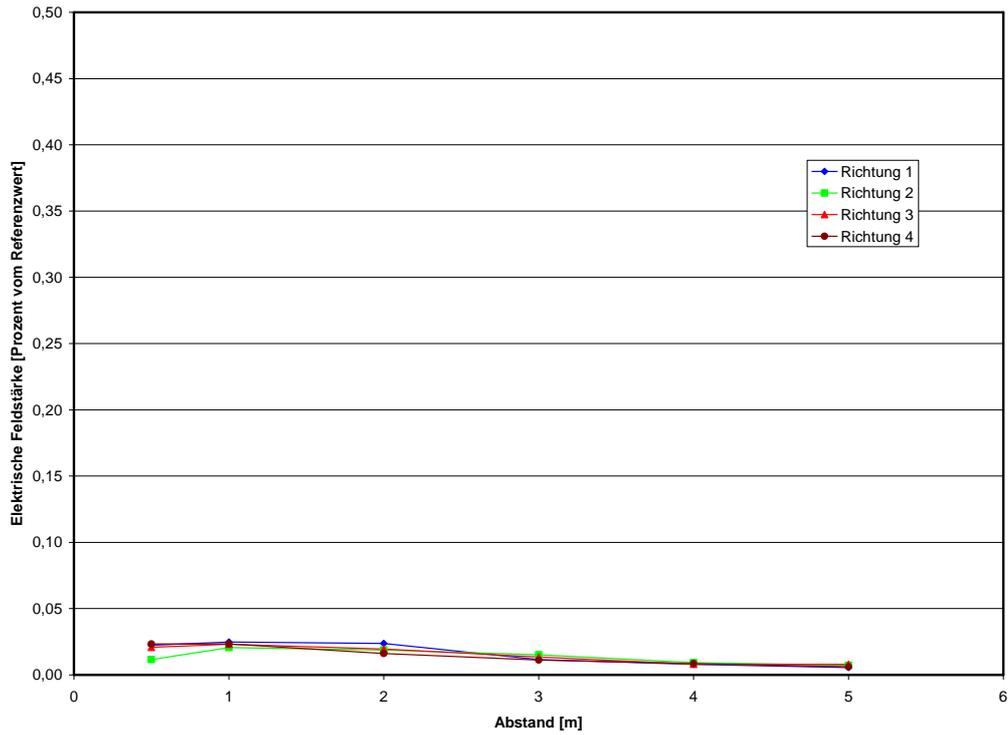


Bild 6.10: Abstandsabhängigkeit der Exposition für Zyxel MAX-310 + MAX-3X0HW2, Messhöhe 1,0 m

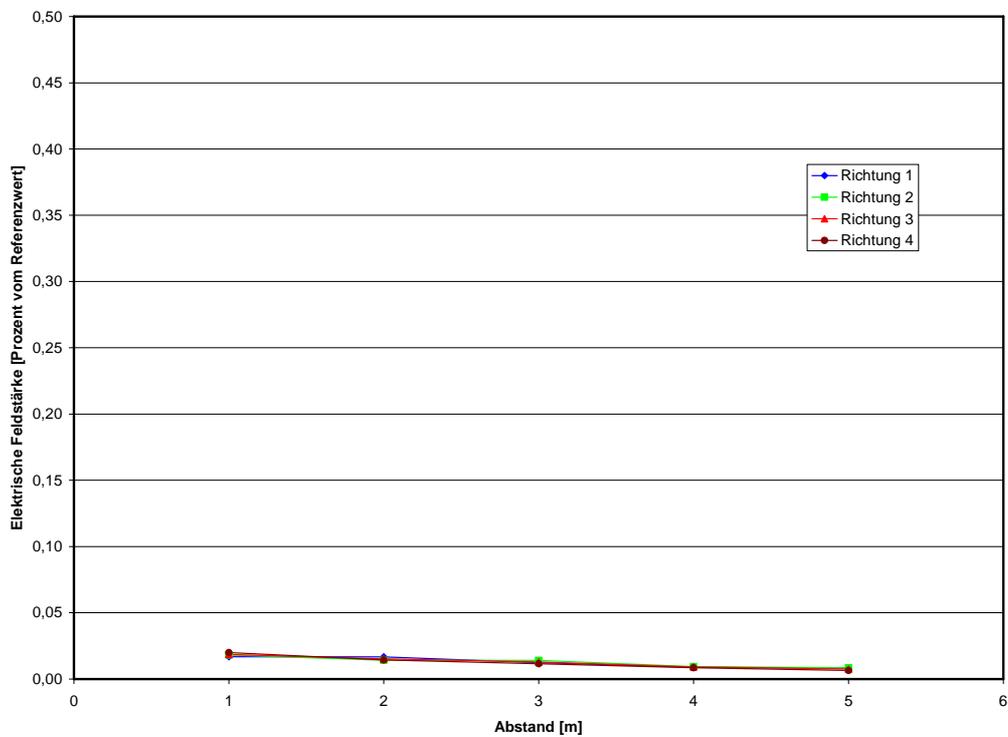


Bild 6.11: Abstandsabhängigkeit für Zyxel MAX-310 + MAX-3X0HW2, Mittelwert für die drei Messhöhen 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m

Fazit:

In typischen Nutzungsszenarien, d.h. bei Abständen von wenigen Metern, werden bei den hier untersuchten Endgeräten zur Indoor Anwendung bei maximalem Betriebszustand deutlich höhere Expositionen beim Nutzer erreicht als durch WiMAX Basisstationen.

Bei Volllastung wurde eine maximale Feldstärke von 10,1 V/m (17 % vom Feldstärke-Referenzwert) in 50 cm Abstand gemessen, die aber sehr schnell mit der Entfernung abnahm und in 5 m Abstand nur noch Werte von maximal 1,2 V/m (2 % vom Referenzwert) erreichte. Durch die örtliche Mittelung über mehrere, die Person eines Nutzers nachbildende, Punkte reduziert sich die Immission vor allem bei Abständen von weniger als 2 m vom Gerät deutlich. Die Exposition weist dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Geräteseite auf. Bei einem Gerät mit paralleler WLAN Funktionalität konnte gezeigt werden, dass die Immission durch WiMAX größer als die durch WLAN bei jeweils maximalem Betriebszustand ist. Im Gegensatz zu den Indoor Units ist die Exposition bei der gemessenen Outdoor Unit vernachlässigbar klein, da die richtende Antenne sich außerhalb der Wohnung befindet und nicht zum Nutzer hin ausgerichtet ist.

6.2 Feldmessung unter realen Bedingungen

Unter realen Bedingungen unterliegt die Sendeleistung der Endgeräte einer verbindungsqualitätsabhängigen Leistungsregelung; außerdem ist zu erwarten, dass die Länge und Häufigkeit der Uplinkbursts und damit auch die durch das Endgerät erzeugte mittlere Immission von der Art der Nutzung (z.B. Standby, Download, Upload) abhängt. Um die dabei auftretenden Immissionsverhältnisse zu studieren, wurden Untersuchungen in zwei unterschiedlichen Wohnumgebungen durchgeführt.

6.2.1 Wohnumgebung 1

Als erste Wohnumgebung wurde eine etwa 630 m von der Sendeanlage entfernte Wohnung im saarländischen Wadrill ausgewählt (Mobile WiMAX Netz), siehe Bild 6.12.



Bild 6.12: Standort für die Immissionsuntersuchungen in einer Wohnumgebung

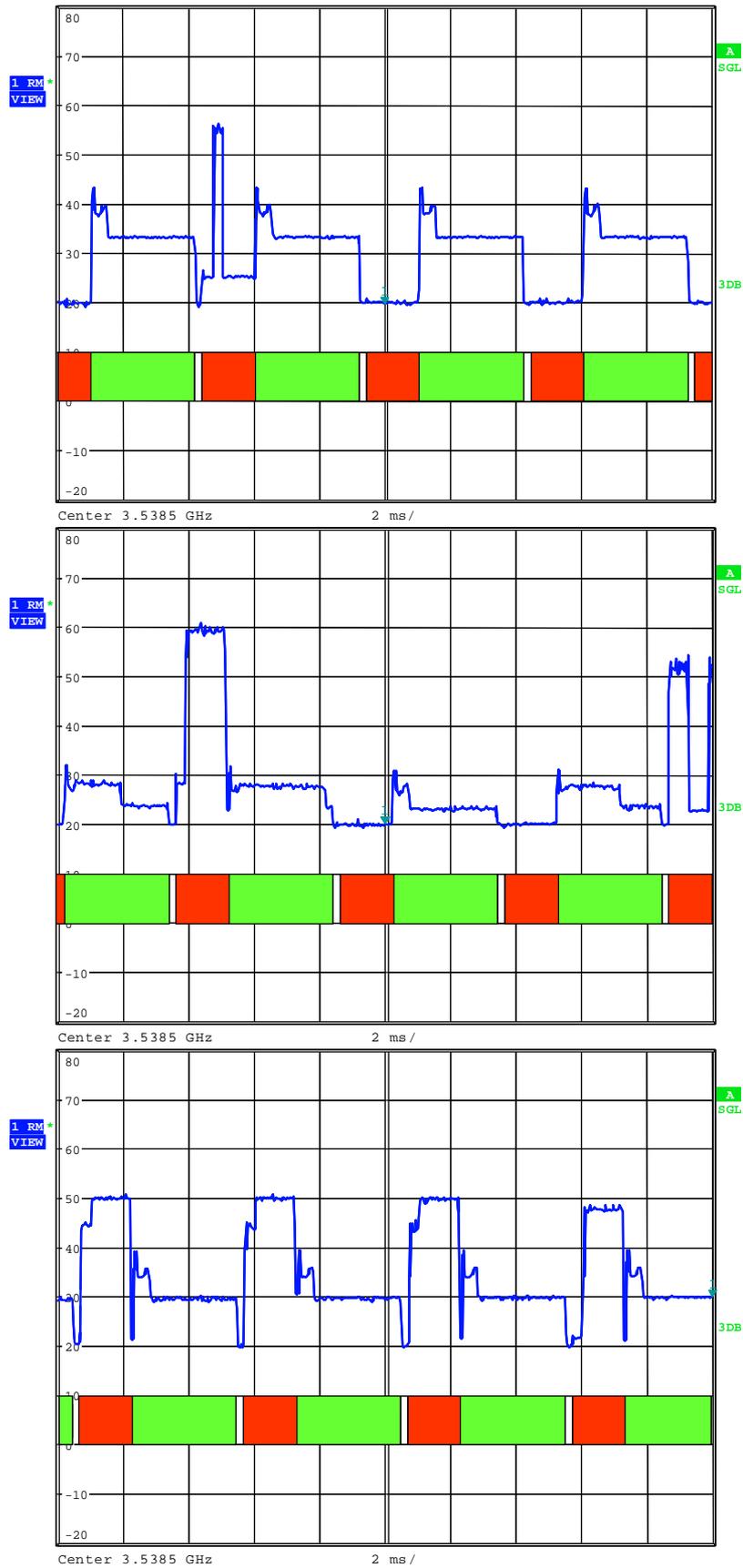


Bild 6.13: Momentaufnahmen von Standby (oben), Download (Mitte) und Upload (unten); grün: durch Basisstation belegter Teilframe; rot: durch Endgerät belegter Teilframe. Die Messung der drei Betriebsarten erfolgt nicht von derselben Messposition.

Im der Wohnung wurde ein Endgerät (die bereits in Abschnitt 6.1 untersuchte Indoor Unit Zyxel MAX-210M1) im Netz der realen WiMAX-Station betrieben.

In einem ersten Schritt wurden die Pulsschemata bei den drei typischen Betriebszuständen Standby, Download und Upload aufgenommen (Bild 6.13). In den Bildern ist der durch die Basisstation belegte Teil des Frames in grün und der durch das Endgerät belegte Teil in rot gekennzeichnet. Hieraus lässt sich ablesen, dass im Standby und im Download das Endgerät nur sporadisch Sendeimpulse abgibt, wohingegen während eines Uploads jeder Uplink-Frame mit nahezu konstanter Sendeleistung vollbelegt ist.

Die Messungen wurden sodann bei verschiedenen Abständen vom Endgerät in ca. 80 m Höhe durchgeführt. Das Endgerät befand sich auf dem in Bild 6.12 sichtbaren Tisch in ca. 80 cm Höhe.

Die Messungen wurden mit der bereits in Abschnitt 2.2.2.2 des Teilberichts II untersuchten Isotropsonde des Rohde & Schwarz Messsystems „TS-EMF“ durchgeführt, so dass Raumreflexionen in der im Vergleich zur Absorberkammer „nicht idealen“ Messumgebung korrekt berücksichtigt werden. Als Betriebsart am Spektrumanalysator wurde die Channel Power Methode mit einer Sweepzeit von 2,5 s pro Achse des Isotropsensors gewählt. Durch diese lange Sweepzeit ist gewährleistet, dass die Verweilzeit des Spektrumanalysators pro Pixel genau einer Rahmenlänge des WiMAX-Signals von 5 ms entspricht, so dass die *mittlere* Feldstärke eines Rahmens gemessen wird.

Das Ergebnis der Messungen ist in Bild 6.14 dargestellt.

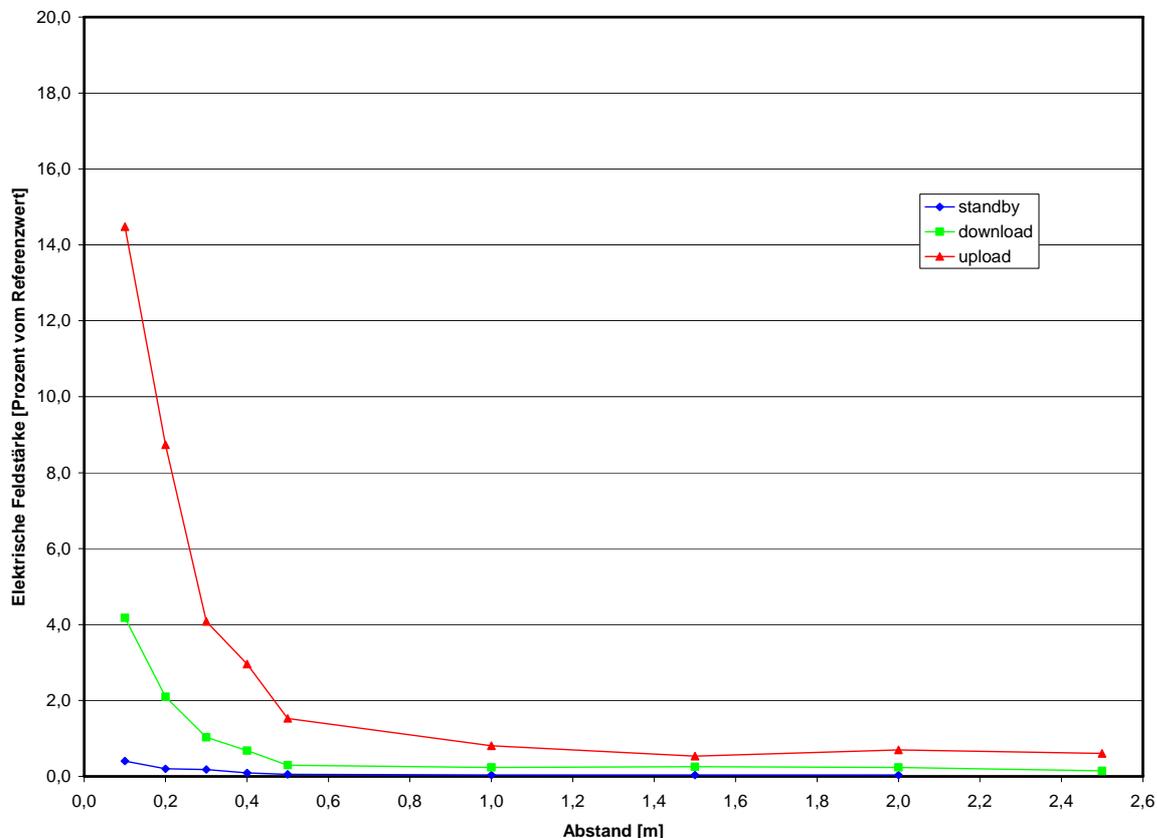


Bild 6.14: Ergebnisse der Messung des Endgerätes Zyxel MAX-210M1 in einer Wohnumgebung

Die bereits bei den Messungen unter Laborbedingungen festgestellte prinzipielle Abnahme der Exposition mit steigender Entfernung vom Endgerät lässt sich auch hier feststellen. Lediglich in der den Upload repräsentierenden Kurve ist die Feldabnahme zwischen 1,5 und 2,5 m geringfügig verzerrt, was möglicherweise durch Raumreflexionen verursacht sein kann.

Sehr gut sichtbar sind hier die durch unterschiedliche Betriebszustände hervorgerufenen Immissionsunterschiede: Während im Standbybetrieb auch in unmittelbarer Nähe des Gerätes keine nennenswerten, normgerecht über die Zeit gemittelten Immissionen auftreten, erreichen diese in 10 cm Entfernung vom Endgerät während des Uploads Werte bis etwa 15 % des Feldstärke-Referenzwertes. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Messdaten beim Abstand von 10 cm mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind, da einerseits der Abstand gerade eine Wellenlänge entspricht (strahlendes Nahfeld) und der Abstand vom Endgerät zum Messaufnehmer in der Isotropsonde aufgrund dessen Dimension (Durchmesser etwa 18 cm) gerade bei kurzen Distanzen nur recht ungenau bestimmbar ist. Allerdings zeigen die Messkurven eine recht gleichmäßige Abnahme der Immission bis zu einer Entfernung von 1,5 m, so dass die Unsicherheiten offensichtlich begrenzt sind. Hingewiesen sei an dieser Stelle auch noch einmal auf die eingeschränkte Isotropie der verwendeten 3-Achsen-Antenne (siehe Abschnitt 2.2.2.2 des Teilberichts II). Die festgestellte Abhängigkeit vom Betriebsmodus spiegelt sehr gut die bereits aus Bild 6.13 abgeleiteten Verhältnisse wider.

Die Immissionen liegen je nach Betriebszustand mehr oder weniger deutlich unter den bei maximalen Sendebedingungen festgestellten Immissionen (Abschnitt 6.1). Referenziert man auf den Maximalwert des Gerätes Zyxel MAX-210M1 aus den Messungen unter Laborbedingungen bei einem Abstand von 50 cm, dann werden im hier untersuchten realen Szenario beim Standby etwa 0,3 %, beim Download etwa 1,8 % und beim Upload etwa 9 % der Immission, die bei maximalem Betriebszustand auftreten, erreicht. Diese Verhältnisse sind selbstverständlich auch von der Verbindungsqualität zur WiMAX Basisstation und der damit verbundenen Leistungsregelungsstufe abhängig; dies wurde in vorliegendem Forschungsprojekt aber nicht detailliert untersucht. Außerdem ist hierbei anzumerken, dass es sich beim unter Realbedingungen untersuchten Gerät zwar um den gleichen Gerätetyp, aber nicht um das selbe Gerät wie bei den Labormessungen handelt.

Fazit:

Im realen Betrieb hat sich erwartungsgemäß gezeigt, dass die unter Laborbedingungen bei maximaler Sendeleistung ermittelten Immissionen nicht erreicht werden. Die Größe der unter realitätsnahen Bedingungen auftretenden Expositionen ist abhängig vom Betriebszustand des Endgerätes sowie der Verbindungsqualität zur Basisstation. Während im Standbybetrieb auch in unmittelbarer Nähe des Gerätes keine nennenswerten Expositionen auftreten, wurde an einem konkreten Szenario während des Uploads etwa 9 % der unter maximalen Sendeleistungsbedingungen auftretenden Exposition erreicht.

6.2.2 Wohnumgebung 2

Die Messung der Exposition verursacht durch eine WiMAX-Outdoorunit (lizenzfreier Frequenzbereich) in einem zweiten typischen Wohnumfeld wurde in 92253 Schnaittenbach (Landkreis Amberg-Sulzbach) durchgeführt. Auf dem Dach eines Wohnhauses (Kohlberger Str.) ist eine WiMAX-Outdoorunit (Betreiber: MVOX AG) installiert, die Verbindung zu einer etwa 3,9 Kilometer entfernten Basisstation auf dem „Monte Kaolino“ aufrecht erhält (Bild 6.15). Die Immission wurde mittels einer spektralen Messung unter Verwendung einer Hornantenne (Schwenkmethode) erfasst.



Bild 6.15: Auf dem Dach montierte Outdoor Unit (links) und dazugehörige Basisstation (rechts)

Aufgrund der großen Entfernung konnte sichergestellt werden, dass das Signal von der Basisstation um mehr als 20 dB schwächer ist als das Signal der Teilnehmeranlage (dieser Sachverhalt wurde auch messtechnisch verifiziert), so dass eine frequenzselektive Immissionsmessung möglich war. Gemessen wurden die Immissionen an zwei Punkten: Der erste Messpunkt befand sich auf dem Balkon im 1. OG (siehe Bild 6.15), von dem aus gerade noch Sichtverbindung zur Outdoor Unit herrschte. Der zweite Messpunkt befand sich im Gebäudeinneren (Kinderzimmer, 1. OG) ohne Sicht zur Outdoor Unit. Während der Messungen wurde ein Datenaustausch zwischen Outdoor Unit und Basisstation angestoßen. Die Ergebnisse der Messungen (extrapoliert auf maximal mögliche Auslastung der Outdoor Unit) sind in folgender Tabelle dokumentiert:

| Punkt Nr. | Beschreibung | Elektr. Feldstärke E in V/m | Elektr. Feldstärke E in % vom Referenzwert (61 V/m) nach [ICNIRP 98], [99/519/EG] | Leistungsflussdichte S in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ |
|-----------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | Balkon (1. OG) | 0,028 | 0,046 | 20,6 |
| 2 | Kinderzimmer (1. OG) | 0,005 | 0,008 | 0,7 |

Tabelle 6.2: WiMAX-Exposition, verursacht durch eine Outdoor Unit im Wohnumfeld

Die gefundenen Immissionswerte sind absolut gesehen sehr niedrig. Sie bleiben feldstärkebezogen unter einem Promille des Feldstärke-Referenzwertes. Relativ betrachtet, finden sich im Gebäudeinneren erwartungsgemäß niedrigere Immissionswerte als auf dem Balkon mit direkter Sicht zur Antenne (Unterschiedsfaktor: 15 dB).

6.3 SAR-Messungen

6.3.1 Messaufbau

Zur Beurteilung der Exposition bei körpernahen Betriebsbedingungen wurden SAR-Messungen durchgeführt. In Ermangelung geeigneter Untersuchungsobjekte aus operativen WiMAX-Netzen, die im Körperkontakt betrieben werden, wie z.B. WiMAX-USB-Karten oder auch PCMCIA-Karten im Notebook, wurden die Untersuchungen an einem „körpernahen“ Endgerät durchgeführt. Hierfür wurde das bereits im Abschnitt 6.1 untersuchte Indoor Endgerät Zyxel MAX-210HW2 ausgewählt (lizenzierter Frequenzbereich, 3,4 - 3,6 GHz). Ungeachtet der Tatsache, dass dieses Gerät üblicherweise im Abstand von mindestens einigen Zentimetern vom Körper betrieben wird, wurden die Messungen in unmittelbarem Körperkontakt durchgeführt. Natürlich sind bei dieser Vorgehensweise höhere Werte als in einigen Zentimetern Abstand zu erwarten; trotzdem geben sie einen guten Eindruck über maximal zu erwartende Immissionen.

Für die Durchführung von SAR-Messungen wurde die Norm IEC 62209-2 „*Human Exposure to Radio Frequency Fields from Handheld and Body-Mounted Wireless Communication Devices - Human models, Instrumentation, and Procedures - Part 2: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for mobile wireless communication devices used in close proximity to the human body (frequency range of 30 MHz to 6 GHz)*“ angewendet. In der IEC 62209-2 wird ein elliptisches Flachphantom als Nachbildung des menschlichen Körpers definiert. Ebenfalls definiert sind die dielektrischen Eigenschaften der gewebesimulierenden Flüssigkeiten sowie die Anweisungen zur Herstellung dieser. Bild 6.16 zeigt den Messaufbau mit Flachphantom sowie das für die Messungen eingesetzte SAR-Messsystem DASY4 (SPEAG).



Bild 6.16: Flachphantom und DASY4 für SAR-Messungen am Endgerät

Als Messsonde im DASY4 wurde eine E-Feld Sonde des Typs EX3DV4 verwendet, die vom Hersteller mit einer Mindestempfindlichkeit von $10 \mu\text{W/g}$ (entsprechend $0,01 \text{ W/kg}$) spezifiziert ist.

Die Ansteuerung des Endgerätes in den Dauersendezustand mit maximaler, konstanter Sendeleistung wurde wie im Abschnitt 6.1 beschrieben mit dem „WiMAX Communication Tester R&S CMW270“ der Firma Rohde & Schwarz realisiert. Da die am Antennenabschluss des Endgerätes Zyxel MAX-210HW2 gemessene Sendeleistung $24,5 \text{ dBm}$ (statt der nominal angegebenen 27 dBm) betrug, wurde zu allen Messergebnissen $2,5 \text{ dB}$ hinzuaddiert.

Die WLAN-Antenne des Zyxel MAX-210HW2 war während der SAR-Messungen abgeschraubt und der WLAN Sendebetrieb deaktiviert.

Die SAR-Messung erfolgte in drei unterschiedlichen Gerätepositionen, die in Bild 6.17 dokumentiert sind. Dabei wurde normativ das Endgerät bis zum Kontakt an das Flachphantom positioniert.



Bild 6.17: Positionierung des Endgerätes für die SAR-Messungen am Flachphantom: Position 1 (links oben), Position 2 (rechts oben) und Position 3 (unten)

6.3.2 Messergebnisse

In den Bildern 6.18-6.20 sind die Ergebnisse der SAR-Messungen grafisch dargestellt. Aufgetragen ist hier der Peak-SAR-Wert, wobei die Extrapolation um 2,5 dB noch nicht berücksichtigt ist.

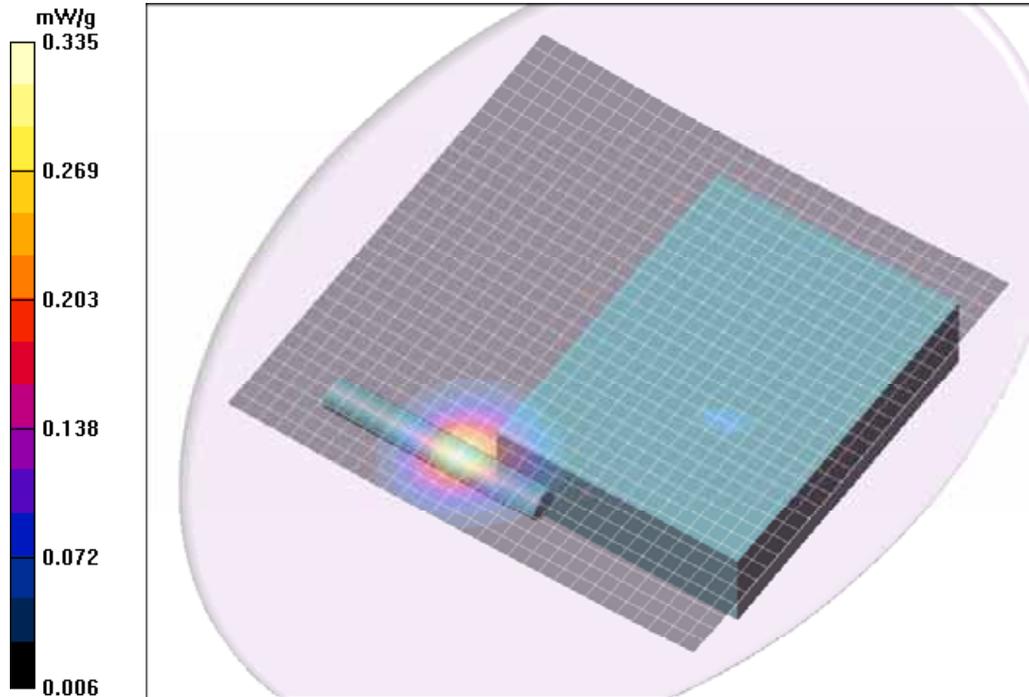


Bild 6.18: SAR-Messergebnisse für Position 1

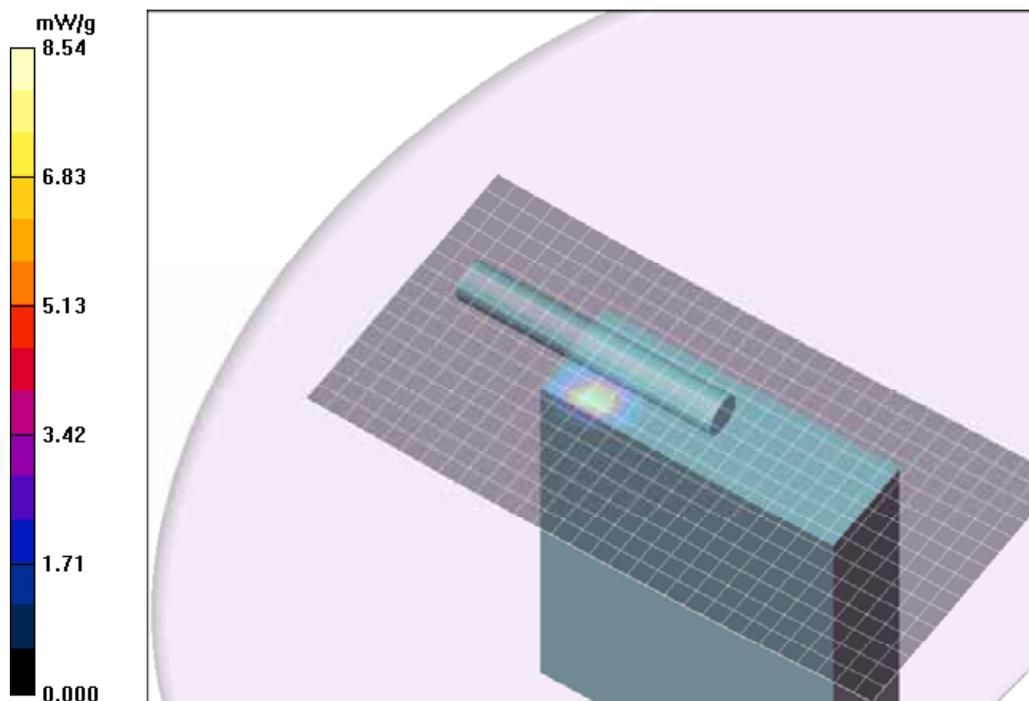


Bild 6.19: SAR-Messergebnisse für Position 2

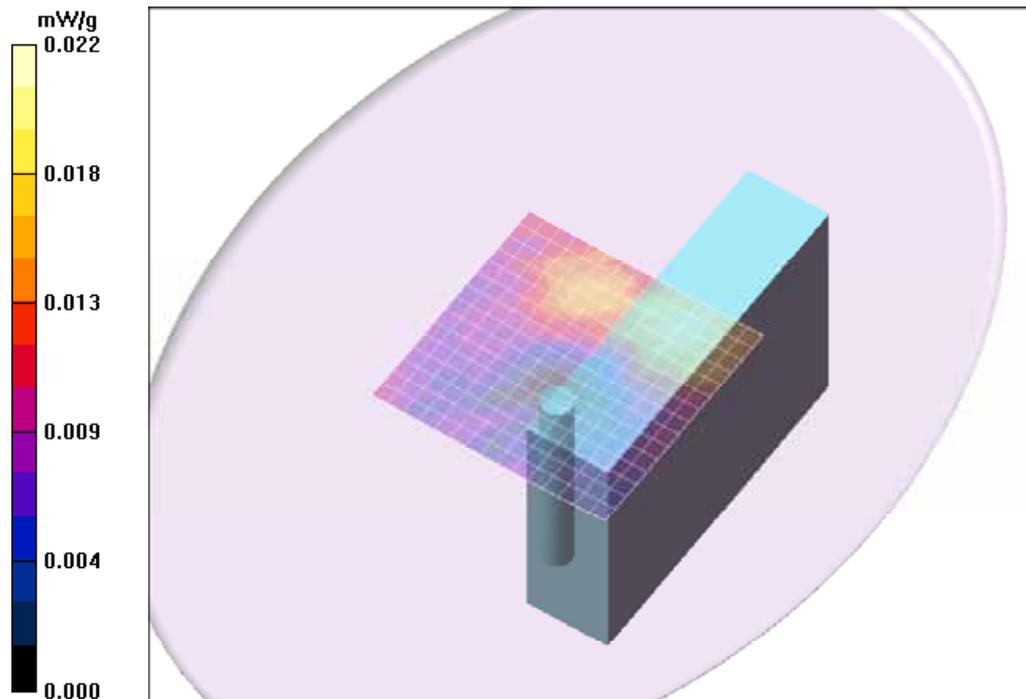


Bild 6.20: SAR-Messergebnisse für Position 3

In Tabelle 6.3 sind die über 10 g gemittelten SAR-Werte angegeben. Hier ist die Extrapolation auf die nominale Sendeleistung bereits berücksichtigt.

| Position | gemessene SAR 10 g | Basisgrenzwert | Grenzwertausschöpfung |
|----------|--------------------|----------------|-----------------------|
| 1 | 0,21 W/kg | 2 W/kg | 10,3 % |
| 2 | 3,91 W/kg | 2 W/kg | 195,5 % |
| 3 | 0,01 W/kg | 2 W/kg | 0,55 % |

Tabelle 6.3: Über 10 g gemittelte SAR-Werte

Fazit:

Die gemessenen SAR-Werte sind für Position 3 am geringsten und für Position 2 am höchsten. Zwar hatte Position 3 unmittelbaren Kontakt zur Antenne, allerdings ist an dieser Stelle durch deren monopolartige Abstrahlcharakteristik ein Strahlungsminimum. Position 1 und 2 unterscheiden sich dadurch, dass nur in Position 2 das Flachphantom unmittelbaren Kontakt zur Antenne hat. In Position 1 beträgt der Abstand etwa 1 cm, was sich in einer deutlichen Reduzierung der SAR widerspiegelt. In Position 2 überschreitet die Grenzwertausschöpfung 100 %, wobei hier angemerkt werden muss, dass diese Position keine typische Position des Betriebs im Alltag ist, da sich der Nutzer im Regelfall immer mindestens einige Zentimeter vom Gerät entfernt aufhält. Bei länger andauerndem, unmittelbarem Kontakt kann jedoch, wie hier gezeigt, die Exposition den Basisgrenzwert überschreiten.

7 Vergleich der Messungen mit Berechnungen

Im folgenden Kapitel werden die betrachteten Softwarepakete aus dem Teilbericht II auf *reale Konfigurationen* angewendet. Die gewonnenen simulierten Ergebnisse werden anschließend mit entsprechenden Messergebnissen aus denselben Konfigurationen verglichen.

Um für die Eignung von Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Immissionen durch WiMAX-Sendeanlagen (sowohl Basisstationen als auch Endgeräte) eine allgemeine Aussage treffen zu können, wird der Vergleich an mehreren Konfigurationen mit unterschiedlichen Eigenschaften durchgeführt. Hierbei wurden folgende berücksichtigt

- Basisstation in ländlicher Umgebung
 - Outdoor-Szenario
 - Niedrige Stationsinstallation
 - 6 Vergleichsgebiete unter Berücksichtigung differierender Sichtbedingungen (Sicht und ohne Sicht) und unterschiedlicher Abstände zur Basisstation
 - Niedrige, lockere Bebauung in hügeligem Gelände

- Basisstation in städtischer Umgebung
 - Outdoor-Szenario
 - Hohe Stationsinstallation
 - 6 Vergleichsgebiete unter Berücksichtigung differierender Sichtbedingungen (Sicht und ohne Sicht) und unterschiedlicher Abstände zur Basisstation
 - Hohe, lockere bis dichte Bebauung in bergigem Gelände

- Immission eines WiMAX-Endgerätes
 - Indoor-Szenario
 - Typische Büroumgebung
 - 8 Vergleichsgebiete unter Berücksichtigung differierender Sichtbedingungen (Sicht und ohne Sicht) und unterschiedlicher Abstände zum Endgerät
 - Betrachtung von Nachbarbüros im selben Gebäude (über bzw. neben dem Büro mit dem Endgerät)

Anhand dieser typischen Anwendungsfälle werden die Softwarepakete im folgenden *durch einen Vergleich mit entsprechenden Messungen* auf ihre Eignung für vorliegende Aufgabenstellung überprüft.

Es werden die Softwarepakete Winprop (AWE Communications), Wireless Insite (Remcom) und EFC-400 (FGEU Berlin) verwendet (vgl. Teilbericht II, Abschnitt 3.1). Zusätzlich wird noch eine Berechnung mit dem Programm Fieldview (EM Institut) durchgeführt, das auf

reiner Freiraumausbreitung beruht und keine Gebäude oder andere Hindernisse berücksichtigt. Zur Berücksichtigung von Reflexionen wird hierbei ein Aufschlag von 3 dB zur Sendeleistung hinzu addiert. Generell ist diese Art der Berechnung natürlich auch mit den anderen betrachteten Programmen ohne weiteres möglich.

Alle Berechnungen wurden im Gegensatz zum Teilbericht II auf einem Computer mit folgenden Eckdaten durchgeführt:

- Betriebssystem: Microsoft Windows XP
- Prozessor: Intel Core™2 CPU
- Taktfrequenz: 2,4 GHz
- Arbeitsspeicher: 1 GB
- Grafikkarte: NVIDIA Quadro NVS 285

7.1 Eingabeparameter

Die erforderlichen Eingabeparameter für die oben vorgestellten Softwarepakete lassen sich grob in die drei Bereiche anlagenbezogene Parameter, Gelände- und Gebäudedaten aufteilen und werden der Vollständigkeit halber an dieser Stelle nochmals kurz erwähnt. Für detailliertere Angaben sei auf den Abschnitt 3.2 des Teilberichts II verwiesen.

Zur Beschaffung der technischen Parameter der WiMAX-Basisstationen ist die Mithilfe der Betreiber unumgänglich. Dies betrifft die Angaben über Antennenart, Sendeleistung am Antenneneingang, azimutale Ausrichtung usw. In den Berechnungen wird wie im Teilbericht II beschrieben ein *synthetisiertes* Antennendiagramm verwendet, wodurch die Abhängigkeiten von der Frequenz, dem elektrischen Downtilt und der Montageumgebung berücksichtigt werden. Bei den technischen Daten von Endgeräten kann auf Herstellerinformationen oder eigene Messungen zurückgegriffen werden.

Neben den technischen Daten sollte in einer Berechnung auch das Geländeprofil (vgl. [BOR 06-2]) berücksichtigt werden. Für diese Studie werden als Grundlage die SRTM Elevationsdaten [SRTM] verwendet. Die Höheninformationen wurden hierbei durch die „Shuttle Radar Topography Mission“ aus vom Spaceshuttle ausgesandten und an der Erdoberfläche rückgestreuten Radarsignalen ermittelt. Die SRTM-Daten werden zunächst in das USGS¹ ASCII DEM – Format umgewandelt und anschließend wie in Abschnitt 3.2.2 des Teilberichts II beschrieben in die Softwarepakete integriert.

Die Gebäudedaten für die nachfolgenden Simulationen wurden von dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (<http://www.lv-bw.de>) bzw. der Bezirksregierung Köln, Dezernat 74-Geodatenzentrum käuflich erworben. Die Daten wurden als 2-dimensionale Gebäudeumrisse im DXF-Format aus geschlossenen Polylinien zur Verfügung gestellt. Die weitere

¹USGS: U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA

Vorgehensweise zur Integration der Daten in die verschiedenen Softwareprogramme ist im folgenden Bild dargestellt.

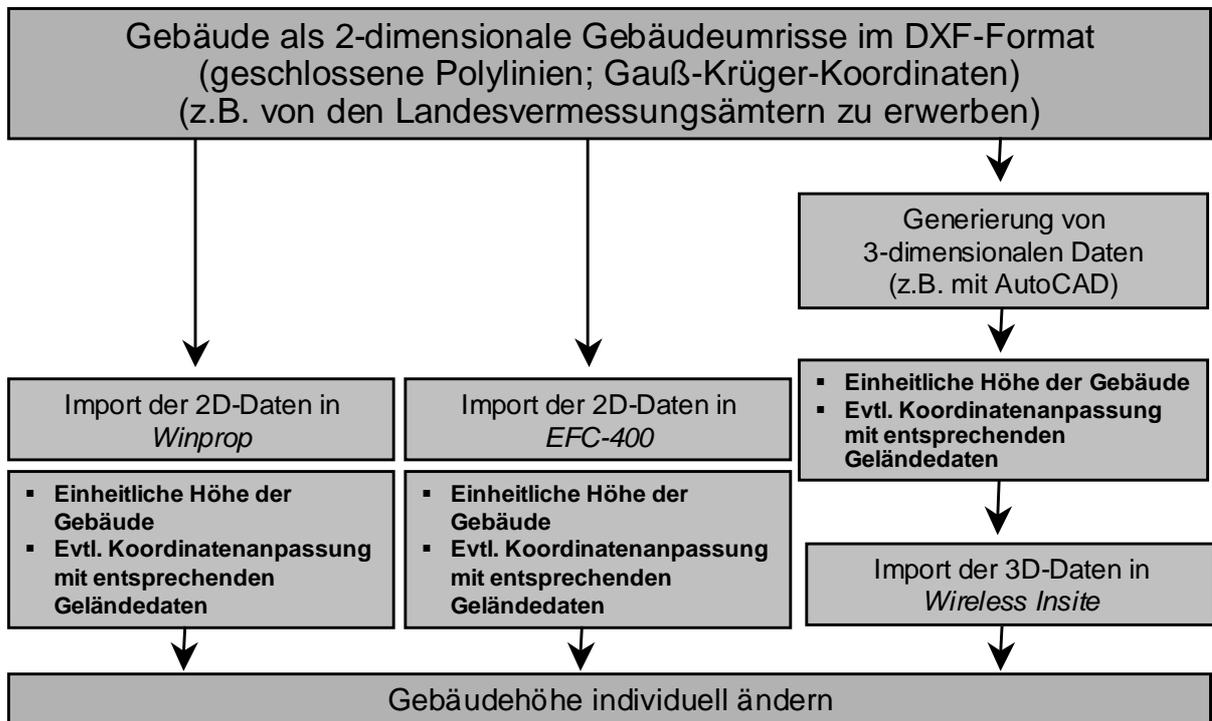


Bild 7.1: Gebäudeintegration auf Grundlage einer DXF-Datei

Neben den 2-dimensionalen Gebäudeumrissen konnten vom Geodatenzentrum in Köln auch die einzelnen Gebäudehöhen im Shape-Format erworben werden. Auf diese Weise konnten die einzelnen Gebäudehöhen nach Import in den Softwarepaketen individuell angepasst werden.

Für die Gebäudedaten wurden in den nachfolgend dargestellten Simulationen Materialien mit den in Tabelle 7.1 dargestellten entsprechenden Parametern verwendet (siehe hierzu auch Abschnitt 3.2.4 aus dem Teilbericht II).

| Material | Relative Permittivität | Leitfähigkeit (3500 MHz) [S/m] | Transmissionsdämpfung [dB] (3500 MHz) | Leitfähigkeit (5800 MHz) [S/m] | Transmissionsdämpfung [dB] (5800 MHz) |
|----------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Beton | 6 | 0,136 | 20 | 0,226 | 47 |
| Glas | 6 | 0,0089 | 1,5 | 0,017 | 5,5 |
| Gips | 4 | 0,0778 | 7,5 | 0,128 | 32,5 |
| Holz | 2 | 0,069 | 1,3 | 0,103 | 8 |
| Metall | 1 | 1000 | 400 | 1000 | 400 |

Tabelle 7.1: Materialparameter

Während in Winprop und Wireless Insite die Materialien über die relative Permittivität und die Leitfähigkeit charakterisiert werden, wird in EFC-400 programmbedingt die Transmissionsdämpfung verwendet.

7.2 Konfiguration 1: Ländliche Umgebung

Die im folgenden Abschnitt betrachtete Konfiguration ist das Szenario „Exposition in der Umgebung von niedrig montierten Antennen im ländlichen Umfeld“ aus dem Abschnitt 2.1. Die WiMAX-Basisstation befindet sich im Zentrum von Schnürpflingen im Landkreis Ulm (Baden-Württemberg).

Die folgenden zwei Bilder zeigen zum einen die topografische Umgebung und eine Aufsicht über das Szenario mit der WiMAX-Basisstation und den fünf Vergleichsgebieten.

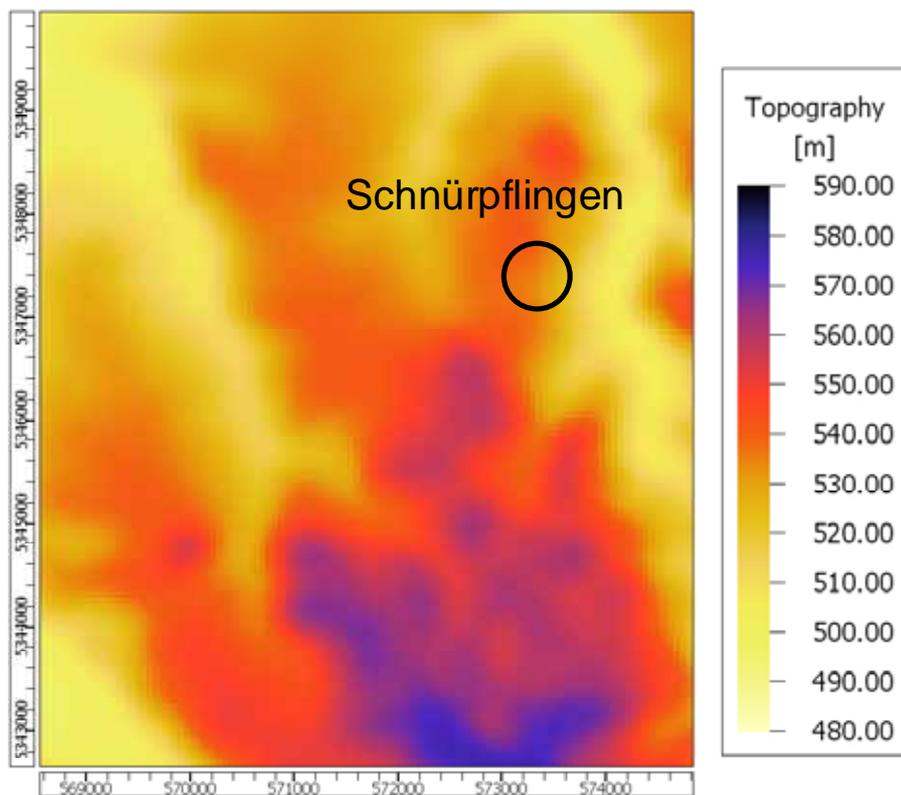


Bild 7.2: Topografische Umgebung von Schnürpflingen

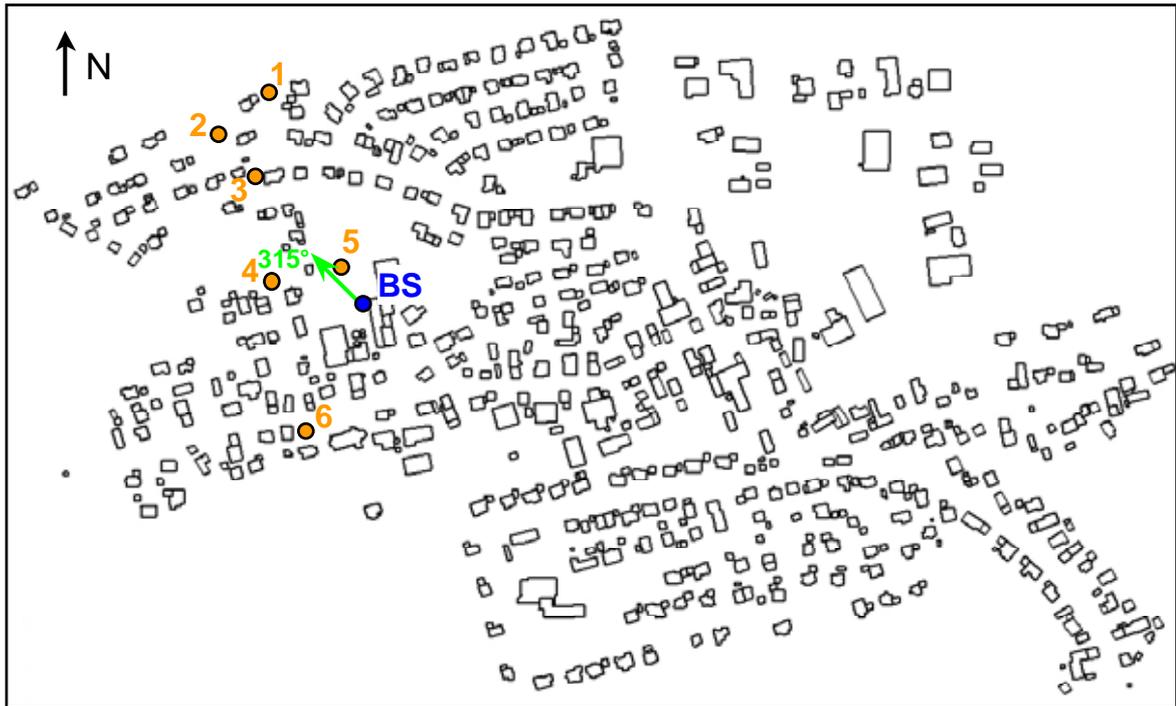


Bild 7.3: Gebäudedaten, Lage der WiMAX-Basisstation (BS) und der Vergleichsgebiete 1-6

Bei den Berechnungen wurde die Immission des 315°-Sektors der Sendeanlage betrachtet. Der Vergleich zwischen Messung und Berechnung wird anhand der auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung hochgerechneten Immissionen durchgeführt, die nach Abschnitt 2.0 auf dem Pegel des Präambel-Signals unter Berücksichtigung des Tastverhältnisses beruht. Weiterhin sind folgende vom Anlagenbetreiber bereitgestellten technischen Parameter der WiMAX-Sendeanlage Grundlage der Berechnung:

- Sendeanenne: APW235-X6015-ON (Hersteller: Andrew)
- Sendeleistung: 1,077 W (30,32 dBm)
- Sendefrequenz: 3.438 MHz
- Antennenhöhe: 14 m (Unterkante)
- Azimut: 315° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdreh Sinn)
- Downtilt: 1°

Vorangegangene Studien, die sich mit der Exposition von GSM und UMTS Sendeanlagen beschäftigt haben (siehe [BOR 05, BOR 06-2]), haben gezeigt, dass ein Vergleich der Immission an einem bestimmten Punkt aufgrund der örtlich kleinskaligen Immissionschwankungen nicht sinnvoll ist. Daher wird analog zu der Vorgehensweise bei den Messungen eine Maximalwertsuche in dem während der Messungen abgeschwenkten Bereich angewendet. Die Simulationsergebnisse werden für die in Bild 7.3 dargestellten Areale mit entsprechenden Messwerten verglichen.

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Sichtverhältnisse in den jeweiligen Vergleichsgebieten zur Sendeantenne und die zugehörigen lateralen Abstände zur WiMAX-Basisstation.

| Szenario | Basisstation in ländlicher Umgebung | |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| | Sichtverhältnis zur Basisstation | Laterale Entfernung zur Basisstation in [m] |
| Vergleichsgebiet 1 | LOS | 230 |
| Vergleichsgebiet 2 | LOS | 210 |
| Vergleichsgebiet 3 | LOS | 161 |
| Vergleichsgebiet 4 | LOS | 89 |
| Vergleichsgebiet 5 | LOS | 45 |
| Vergleichsgebiet 6 | nLOS | 133 |

Tabelle 7.2: Überblick über die Sichtverhältnisse und Abstände für das Szenario 1

Im folgenden werden die Simulationsergebnisse der einzelnen Softwarepakete vorgestellt. Bei den flächig dargestellten Immissionsverteilungen ist die Berechnungsebene in einer Höhe von 1,7 m über dem Erdboden in den Bildern zu sehen.

Der für den Vergleich mit der Messung herangezogene Wert ist die maximale Feldstärke aus den Ebenen in 1,6 m, 1,7 m bzw. 1,8 m Höhe. Bei Wireless Insite wurden in den jeweiligen Vergleichsgebieten in den drei Höhen etwa 100 Empfangsantennen dreidimensional platziert.

Bei den Farbschemata entspricht der Maximalwert einer Immission von $140^{\circ}\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ($10\text{ V}/\text{m}$) und der Minimalwert von $50\text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ($0,0003\text{ V}/\text{m}$). Im Anschluss an die einzelnen flächigen Simulationsergebnisse folgt ein Vergleich der maximalen Immission in den bereits oben beschriebenen Vergleichsgebieten.

In Bild 7.4 sind die Resultate von EFC-400 dargestellt. Da bei EFC-400 alle Ausbreitungswege inkohärent überlagert werden, ist eine Betrachtung in verschiedenen Ebenen nicht notwendig, da sich im vertikalen Abstand von wenigen Zentimetern keine nennenswerten Unterschiede ergeben. Die Auflösung betrug in diesem Szenario 0,5 m.

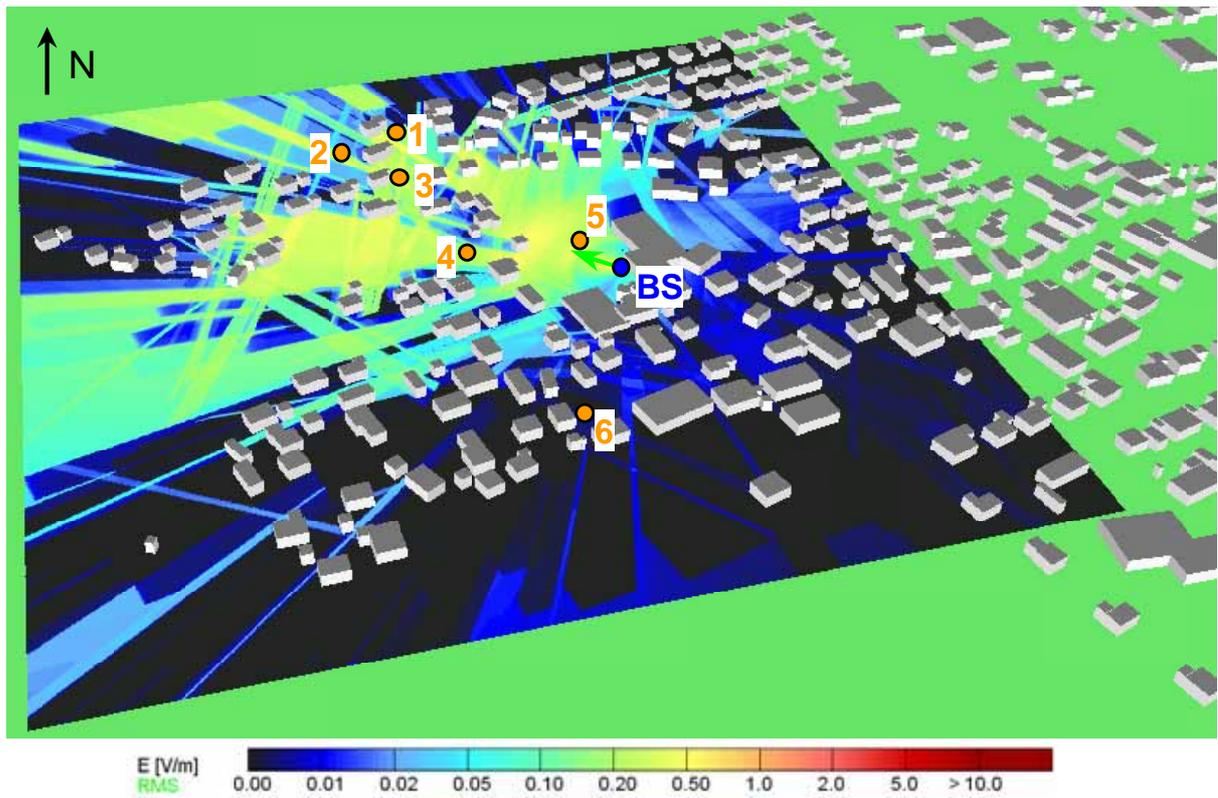


Bild 7.4: Simulationsergebnis von EFC-400

Für das Simulationsergebnis von Wireless Insite sind in folgendem Bild die Ausbreitungsweg für die Vergleichsgebiete 1 bis 6 zu sehen.

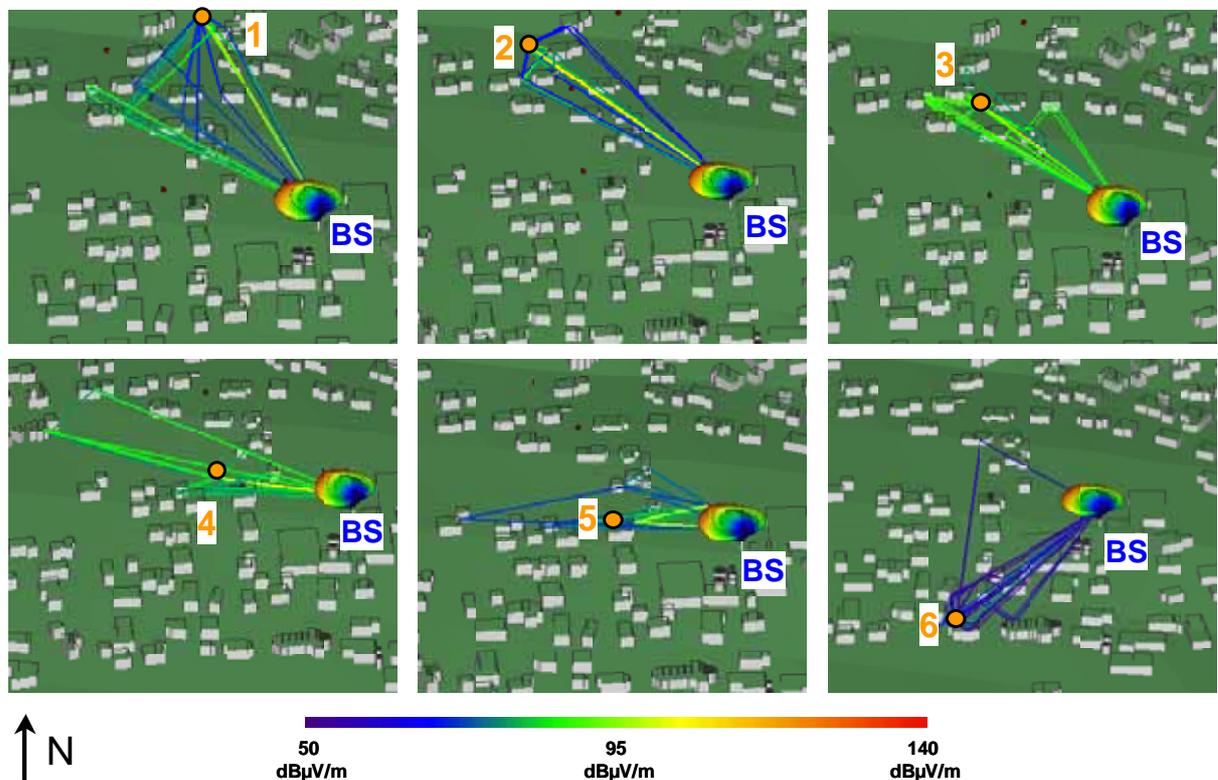


Bild 7.5: Simulationsergebnis von Wireless Insite (Ausbreitungspfade)

Im Gegensatz zu dem Simulationsergebnis von EFC-400 ist bei Wireless Insite die Bestimmung einer flächigen Verteilung der Immission im gesamten Simulationsgebiet aus rechnerischer Kapazität und Simulationszeit nicht sinnvoll.

Bild 7.6 zeigt die flächig berechnete Immissionsverteilung von Winprop. Entsprechend der vorangegangenen Darstellungsweise sind die Nordrichtung und die der Berechnung zugrunde liegenden Hauptstrahlrichtung der WiMAX-Basisstation eingezeichnet.

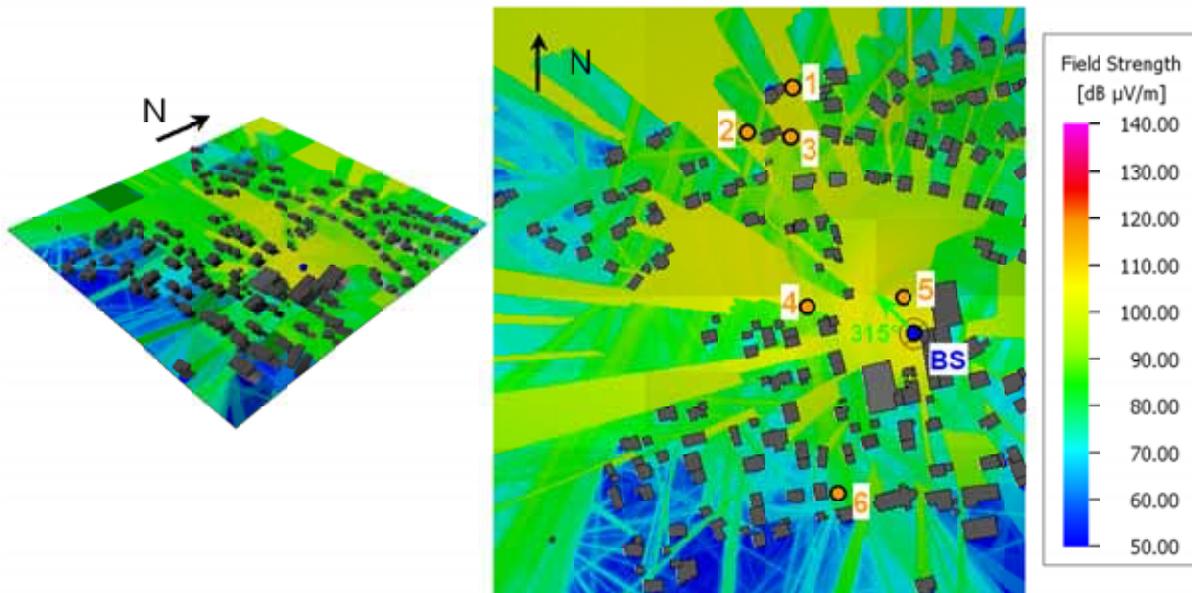


Bild 7.6: Simulationsergebnis von Winprop

Die Feldstärkewerte innerhalb der sechs Vergleichsgebiete werden im folgenden den entsprechenden messtechnisch ermittelten Immissionen gegenüber gestellt. Zusätzlich zu den drei bereits beschriebenen Berechnungen wurde noch eine Berechnung durchgeführt, die auf Freiraumausbreitung ohne Berücksichtigung von Gebäuden inklusive eines Zuschlags von 3 dB zur Berücksichtigung von Reflexionen beruht. Diese wurde mit dem Programm Fieldview durchgeführt.

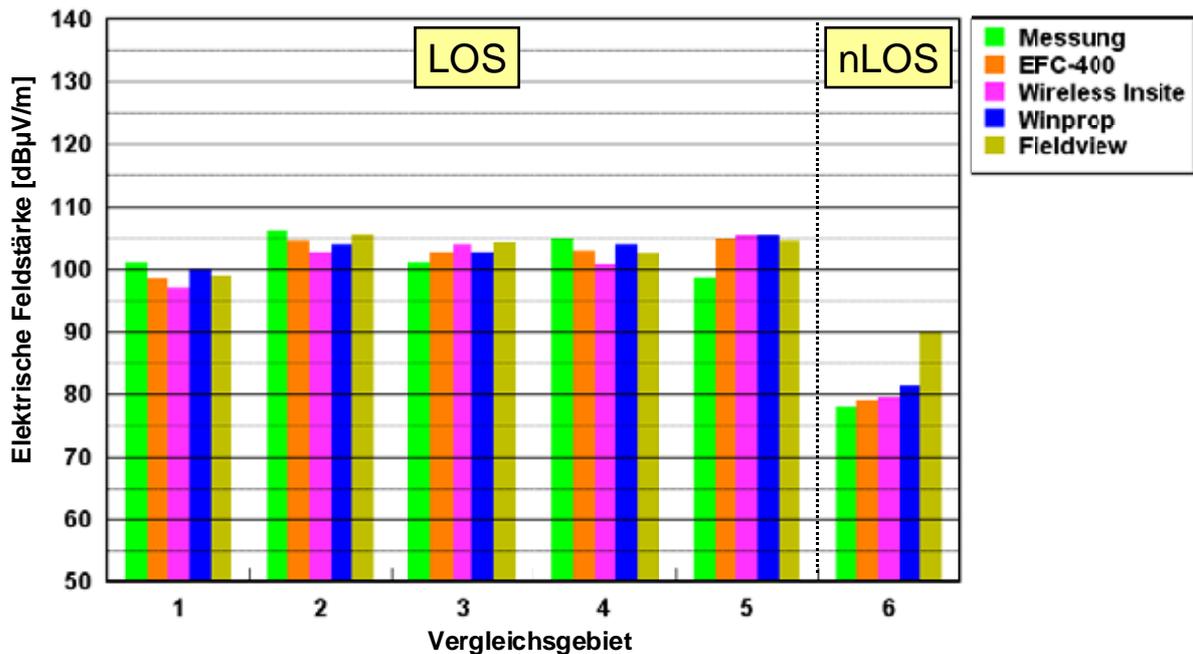


Bild 7.7: Simulationsergebnisse im Vergleich zum Messergebnis für die verschiedenen Vergleichsgebiete für das Szenario 1

Bei der Betrachtung der Situationen mit vorliegender Sichtverbindung zur Basisstation (LOS) weisen die Programme eine Schwankungsbreite der Berechnungsergebnisse von 0,8 - 3,2 dB auf. Diese liegt bei Vergleichsgebieten ohne Sicht bei 11 dB, was sich durch die Überschätzung der Berechnungsmethode „Freiraum + 3 dB“ ergibt. Unter Vernachlässigung dieser Methode liefern die anderen Programme Berechnungsergebnisse mit einer Schwankungsbreite von 2,2 dB.

Auffällig an obigen Bild ist, dass die Überbewertung aller Programme beim Vergleichsgebiet 5 nahezu gleich ist. Das Vergleichsgebiet 5 liegt nur 45 m von der WiMAX Basisstation entfernt und befindet sich daher noch nicht in der vertikalen Hauptstrahlrichtung der Sendeanenne, sondern in deren Nebenzipfelbereich. Wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, wird in den Simulationen ein synthetisiertes Antennendiagramm zur Kompensation der Abhängigkeit vom elektrischen Downtilt, Frequenz und Montageumgebung verwendet. Diese Synthese ist in Bild 7.8 für den hier vorliegenden Fall schematisch dargestellt.

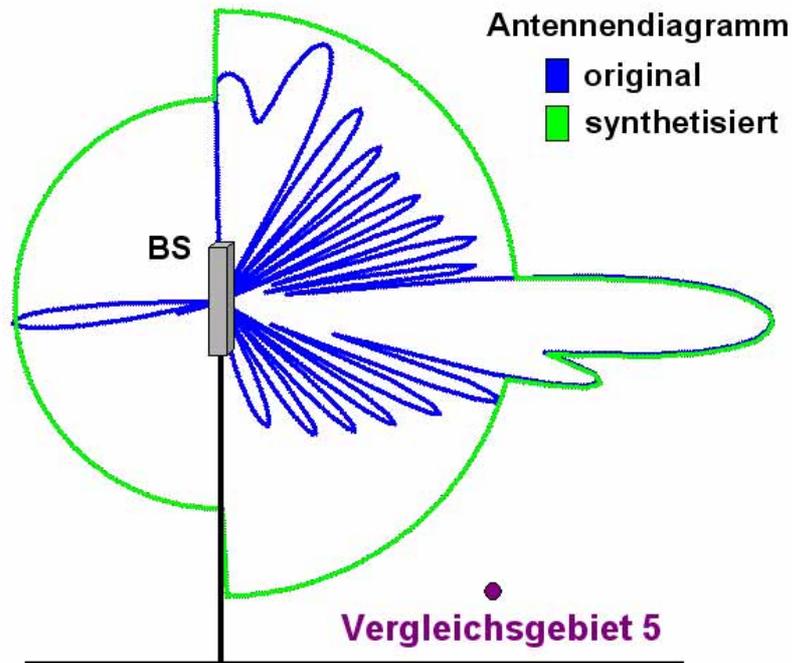


Bild 7.8: Überbewertung durch Auffüllung im synthetisierten Antennendiagramm

Die Überbewertung der Softwarepakete resultiert nach obigen Bild für das Vergleichsgebiet 5 wohl aus der „Auffüllung“ im Nebenzipfelbereich des synthetisierten Antennendiagramms.

Zur besseren Beurteilung der Berechnungsergebnisse im Vergleich zur Messung sind im nachfolgenden Bild die Abweichungen der einzelnen Programme zur messtechnisch bestimmten Immission dargestellt.

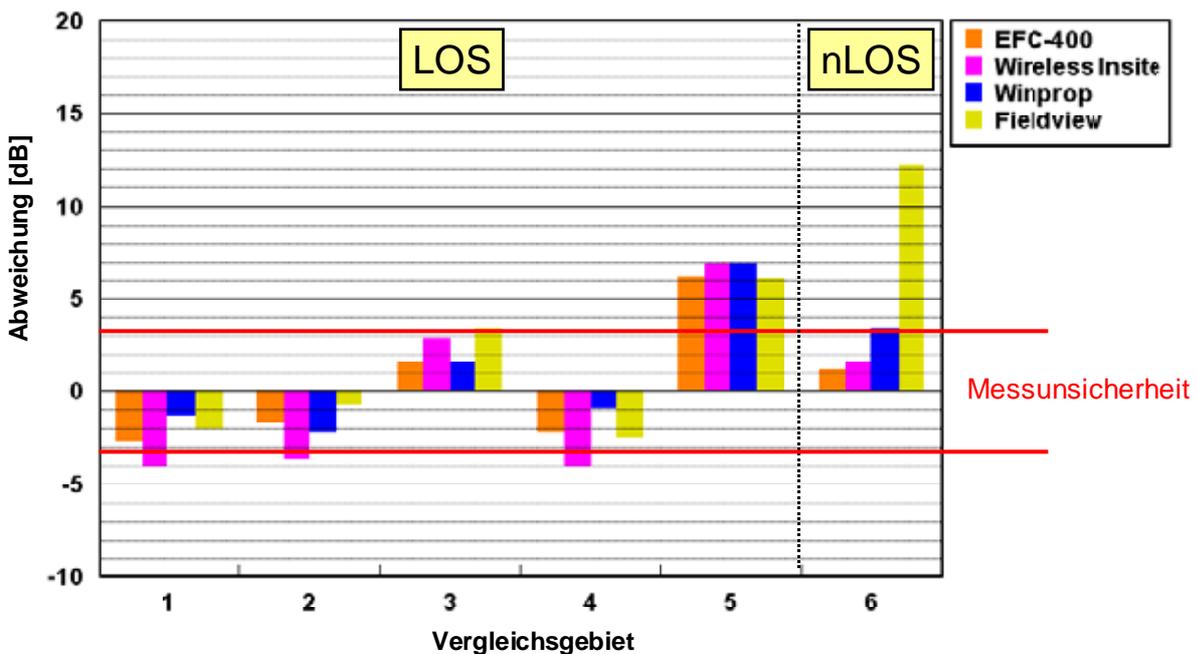


Bild 7.9: Abweichung zwischen Berechnung und Messung für das Szenario 1 (Berechnungswert minus Messwert in [dB])

Die Ergebnisse in obigen Bild ergeben sich aus der Differenz zwischen dem berechneten und dem gemessenen Feldstärkewert. Eine positive Abweichung entspricht demnach einer Überschätzung und eine negative Abweichung einer Unterschätzung. Darüber hinaus ist der Bereich der Messunsicherheit von ungefähr 3,2 dB eingezeichnet. Liegt ein Berechnungsergebnis innerhalb dieses Bereiches, kann von einer guten Vorhersage gesprochen werden.

In Bild 7.9 resultiert die Überbewertung der gemessenen Immissionen im Vergleichsgebiet 5 wie oben bereits beschrieben aus der Auffüllung des Nebenzipfelbereichs im synthetisierten Antennendiagramm. Unter Vernachlässigung dieses Vergleichsgebietes zeigt Bild 7.9, dass die Softwarepakete in der Mehrzahl der Situationen mit Sicht zur Sendeanlage (LOS) unter Berücksichtigung der Messunsicherheit eine gute Prognose liefern. Die maximalen Abweichungen liegen zwischen -4,1 und 3,4 dB. Unter Vernachlässigung der leichten Unterschätzungen von Wireless Insite ergeben sich Abweichungen zwischen -2,7 und 3,4 dB.

Im Gegensatz zu Szenarien mit Sichtverbindung, liefert die Berechnungsmethode „Freiraum + 3 dB“ bei Szenarien ohne Sicht (nLOS) eine deutliche Überbewertung der Immission, während die anderen Programme die Immission bis auf eine leichte Überbewertung von Winprop gut prognostizieren. Die Abweichungen liegen hier ohne Berücksichtigung der Berechnungsmethode „Freiraum + 3 dB“ nur zwischen 1,2 und 3,4 dB.

In der folgenden Tabelle sind die jeweiligen Simulationszeiten für das in diesem Abschnitt betrachtete Szenario dargestellt.

| | EFC-400 | Wireless Insite | Winprop | Fieldview |
|--------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------|
| Zeitdauer in [min] | 70 | 80 | 60 + 20 | 5 |

Tabelle 7.3: Zeitdauer für die Simulationen

Bezüglich der Simulationsdauer der einzelnen Programme sind folgende Punkte zu beachten: Bei Wireless Insite ist anzumerken, dass die Immissionsverteilung nicht flächendeckend berechnet wurde, sondern nur in den jeweiligen Vergleichsgebieten. Die Zeitdauer von Winprop setzt sich aus zwei Zeiten zusammen: Zunächst wird ein sogenanntes „Preprocessing“ einmalig durchgeführt. Für die anschließende Immissionsberechnung wird dann für beliebige Senderstandorte eine geringere Simulationszeit benötigt. Bei Variation von Senderstandorten innerhalb einer Modellierungsumgebung bietet dies eine deutliche Zeitminimierung.

Die Modellierungszeit des Szenarios in den einzelnen Programmen hängt sehr stark von den folgenden zwei Faktoren ab

1. Dateiformat der Eingabedaten
Liegen die Eingabedaten (Topografie und Gebäude) in einem Dateiformat vor, das direkt in das jeweilige Programm eingelesen werden kann, entfallen zum Teil aufwendige Umkonvertierungen.
2. Geo-Referenzierung der Eingabedaten
Beim Import in die Programme müssen die Topografie und die Gebäudedaten die gleiche Geo-Referenzierung haben. Diese muss in Abhängigkeit der vorliegenden

Eingabedaten u.U. erst durch aufwendige Konvertierungen, die mit einer entsprechenden Verifikation einher gehen, hergestellt werden.

Je nach verfügbarem Eingabeformat und dem Aufwand der Umkonvertierungen, kann die Modellierungszeit bei den Softwarepaketen mehrere Stunden betragen.

Generell ist im Gegensatz dazu die Modellierungszeit bei der Methode „Freiraum + 3 dB“ in allen Szenarien mit wenigen Minuten anzugeben, da hier ja keine Gebäude oder andere Hindernisse modelliert, sondern lediglich das Antennendiagramm, Sendeleistung und Ausrichtung angegeben werden müssen.

7.3 Konfiguration 2: Städtische Umgebung

Die im folgenden Abschnitt betrachtete Konfiguration basiert auf dem Szenario „Vergleich WiMAX-UMTS an einer hoch montierten Anlage im Innenstadtbereich“ aus dem Abschnitt 2.5. Die WiMAX-Basisstation befindet sich auf dem Bethesda-Krankenhaus an der Hainstrasse in Wuppertal.

Die folgenden zwei Bilder zeigen zum einen die topografische Umgebung und eine Aufsicht über das Szenario mit der WiMAX-Basisstation und den sechs Vergleichsgebieten.

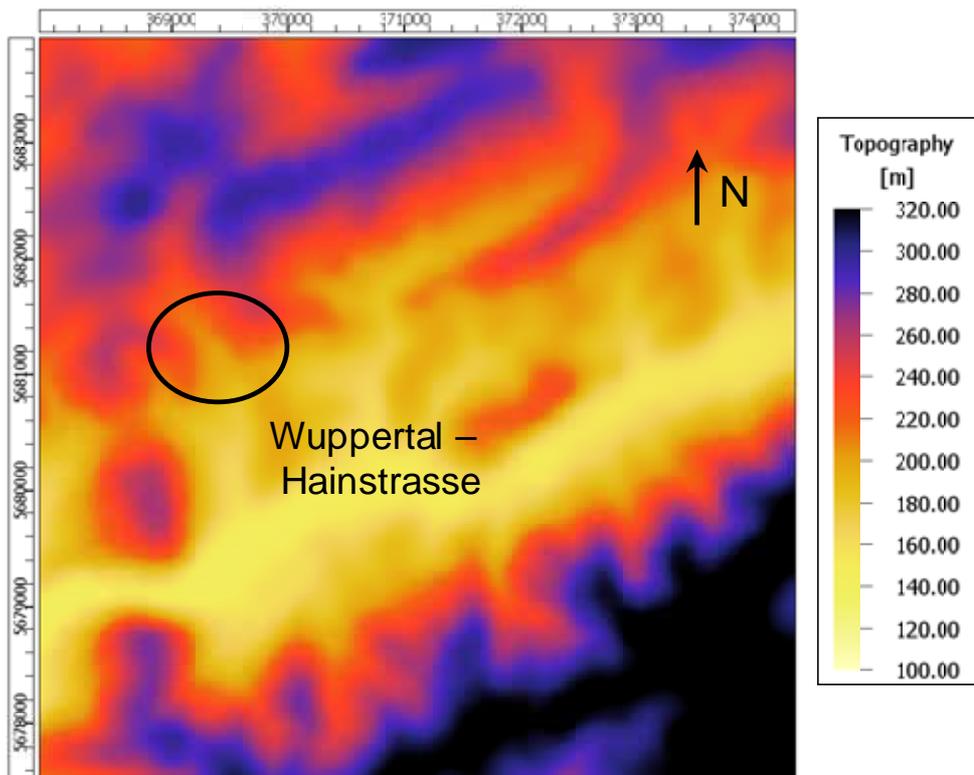


Bild 7.10: Topografische Umgebung von der Hainstraße in Wuppertal

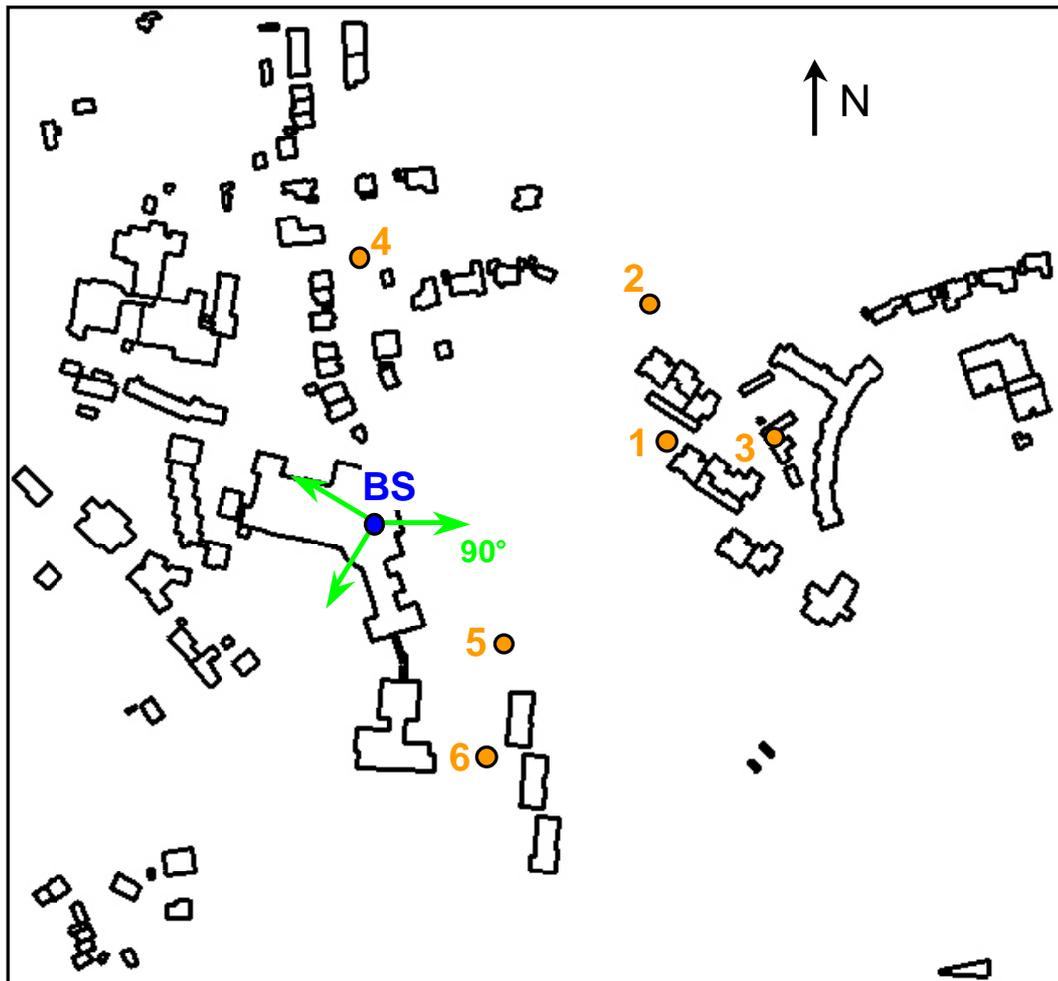


Bild 7.11: Gebäudedaten, Lage der WiMAX-Basisstation (BS) und der Vergleichsgebiete 1-6

Bei den Berechnungen wurde der 90°-Sektor der Sendeanlage betrachtet, da dieser maßgeblich für die Immission an den Vergleichsgebieten ist. Weiterhin sind folgende vom Anlagenbetreiber bereitgestellten technischen Parameter der WiMAX-Sendeanlage Grundlage der Berechnung:

- Sendeanenne: RACAL 2311
- Sendeleistung: 1,259 W (31 dBm)
- Sendefrequenz: 3.588,75 MHz
- Antennenhöhe: 27,9 m (Unterkante)
- Azimut: 90° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdreh Sinn)
- Downtilt: 6° (mechanisch: 4°; elektrisch 2°)

Die anschließende Tabelle gibt einen Überblick über die Sichtverhältnisse der Vergleichsgebiete zu den jeweiligen Messpunkten und die entsprechenden Abstände zur WiMAX-Basisstation.

| Szenario | Basisstation in städtischer Umgebung | |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| | Sichtverhältnis zur Basisstation | Laterale Entfernung zur Basisstation in [m] |
| Vergleichsgebiet 1 | LOS | 174 |
| Vergleichsgebiet 2 | LOS | 192 |
| Vergleichsgebiet 3 | nLOS | 230 |
| Vergleichsgebiet 4 | LOS | 150 |
| Vergleichsgebiet 5 | LOS | 108 |
| Vergleichsgebiet 6 | nLOS (nur durch Bäume verdeckt!) | 160 |

Tabelle 7.4: Überblick über die Sichtverhältnisse und Abstände für das Szenario 2

In Bild 7.12 ist die flächige Immissionsverteilung von EFC-400 dargestellt. Neben der Lage der Basisstation, der Vergleichsgebiete und der Hauptstrahlrichtung der Sendeanlage ist auch die Nord-Richtung eingezeichnet.

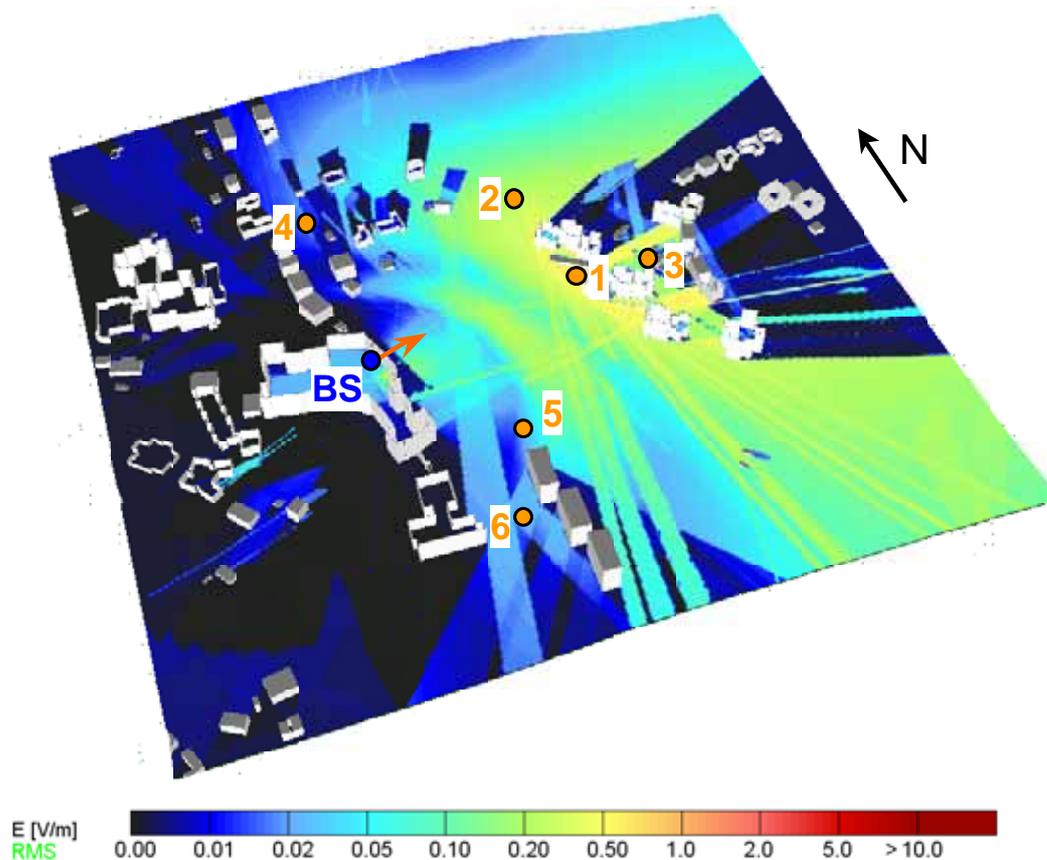


Bild 7.12: Simulationsergebnis von EFC-400 für das Szenario 2

Auffällig an obigen Bild ist, dass neben anderen Gebäuden auch das Bethesda-Krankenhaus, auf dem die WiMAX-Basisstation montiert ist ohne Dach dargestellt sind. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass EFC-400 nur Gebäude mit rechteckigem Grundriss als

„komplettes“ Gebäude importieren kann (siehe Bild 7.13a). Darüber hinaus gibt es aber noch die Möglichkeit, lediglich die Wände eines Gebäudes zu integrieren (siehe Bild 7.13b).

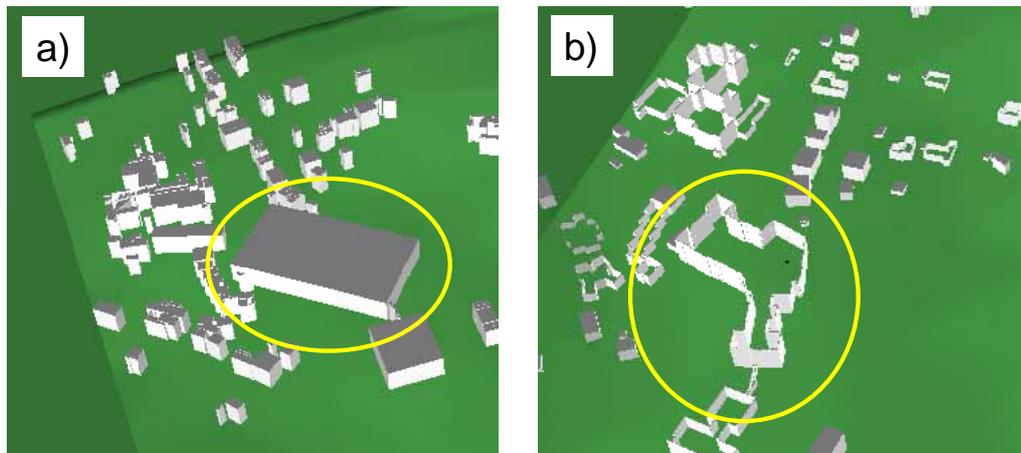


Bild 7.13: Unterschiedliche Integration der Gebäudedaten in EFC-400
a) „komplettes“ Gebäude als Quader
b) Integration von Gebäuden aus einzelnen Wänden

Bei der Simulationsvariante mit den Wänden muss darauf geachtet werden, dass für die Wände des Gebäudes, auf dem die Basisstation montiert ist, ein wesentlich höherer Dämpfungswert angegeben wird, um Anteile aus Reflexionen innerhalb des Gebäudes außen zu unterdrücken.

Die Modellierungsumgebung und die Ausbreitungswege zu den jeweils etwa 100 Empfangsantennen in den sechs Vergleichsgebieten von Wireless Insite sind in den Bildern 7.14-15 dargestellt.

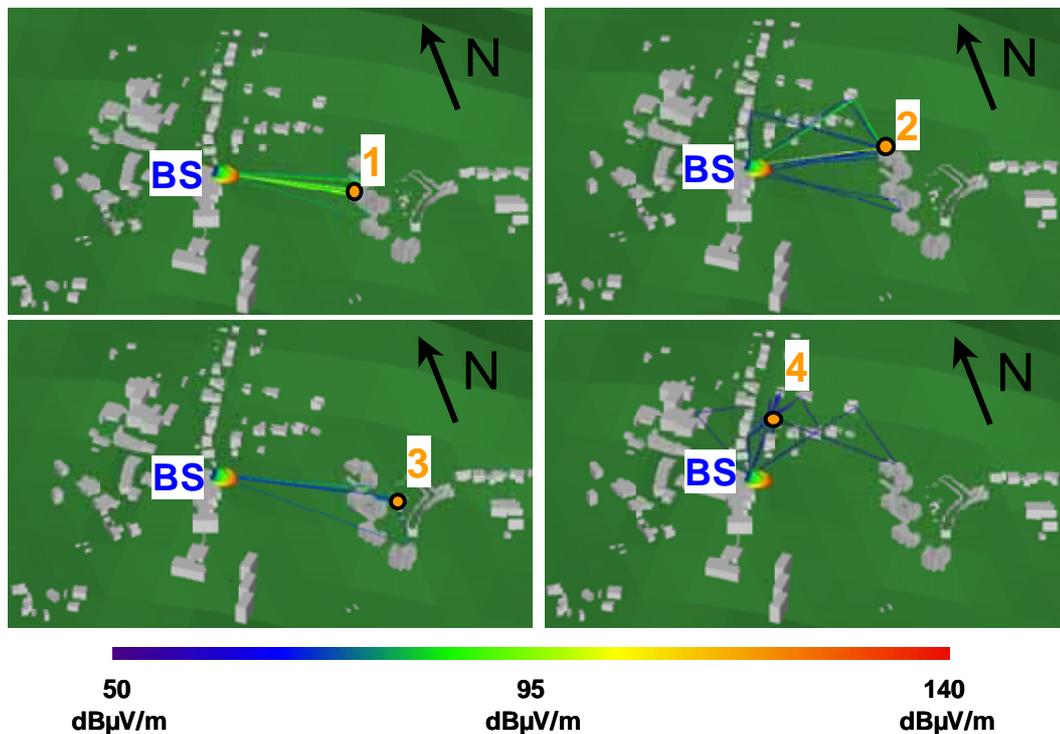


Bild 7.14: Simulationsergebnis von Wireless Insite für das Szenario 2, Ausbreitungswege für die Vergleichsgebiete 1-4

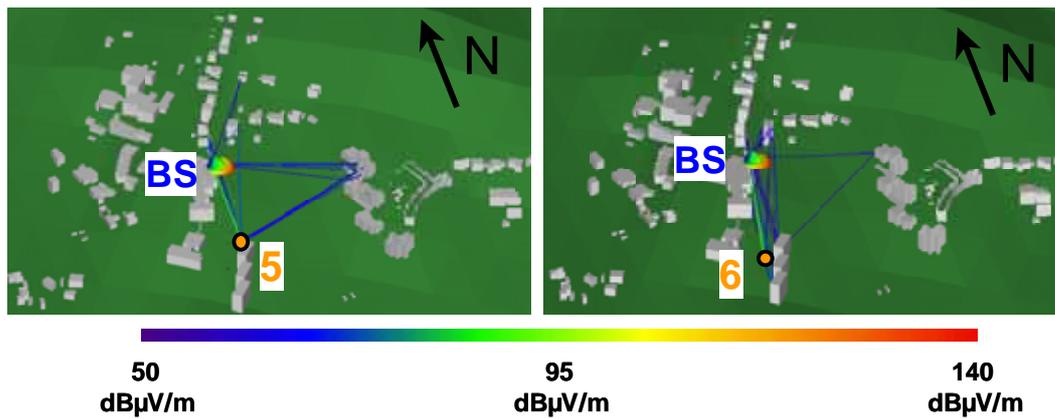


Bild 7.15: Simulationsergebnis von Wireless Insite für das Szenario 2, Ausbreitungswege für die Vergleichsgebiete 5-6

Bild 7.16 zeigt die flächig berechnete Immissionsverteilung von Winprop. Entsprechend der vorangegangenen Darstellungsweise sind auch hier die Nordrichtung, die Hauptstrahlrichtung der betrachteten Sendeanlage und die Vergleichsgebiete eingezeichnet.

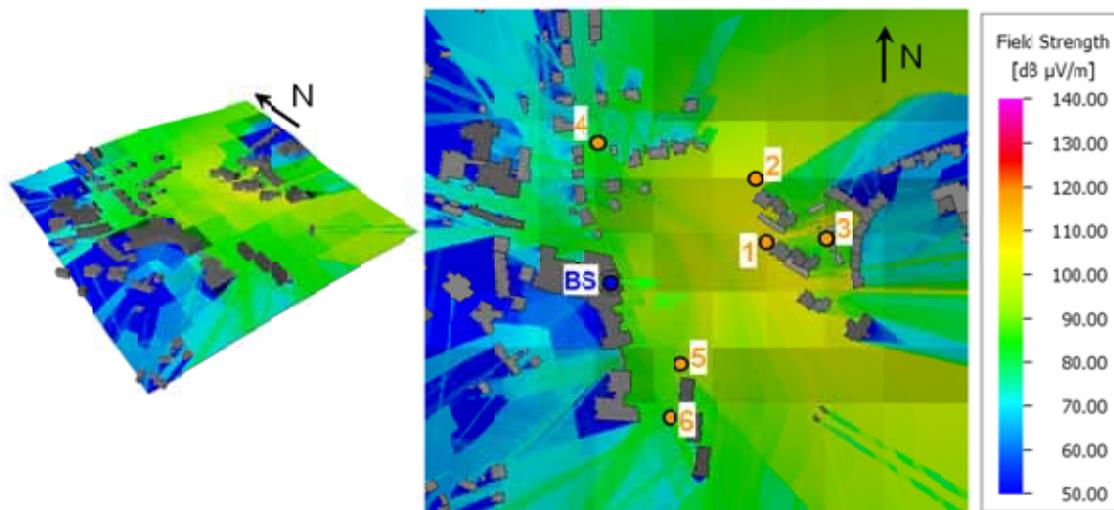


Bild 7.16: Simulationsergebnis von Winprop für das Szenario 2

Im folgenden werden die berechneten Feldstärkewerte innerhalb der sechs Vergleichsgebiete mit entsprechenden messtechnisch ermittelten Immissionen verglichen. Zusätzlich zu den drei bereits beschriebenen Berechnungen wurde, wie schon aus dem vorangegangenen Szenario bekannt, eine Berechnung durchgeführt, die auf Freiraumausbreitung ohne Berücksichtigung von Gebäuden inklusive eines Zuschlags von 3 dB beruht.

In Bild 7.17 sind zunächst die absoluten Feldstärkewerte dargestellt und in Bild 7.18 die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung. Eine positive Abweichung entspricht hierbei einer Überschätzung und eine negative Abweichung einer Unterschätzung. Darüber hinaus ist wieder der Bereich der Messunsicherheit von ungefähr 3,2 dB eingezeichnet. Liegt ein Berechnungsergebnis innerhalb dieses Bereiches, kann von einer guten Vorhersage gesprochen werden.

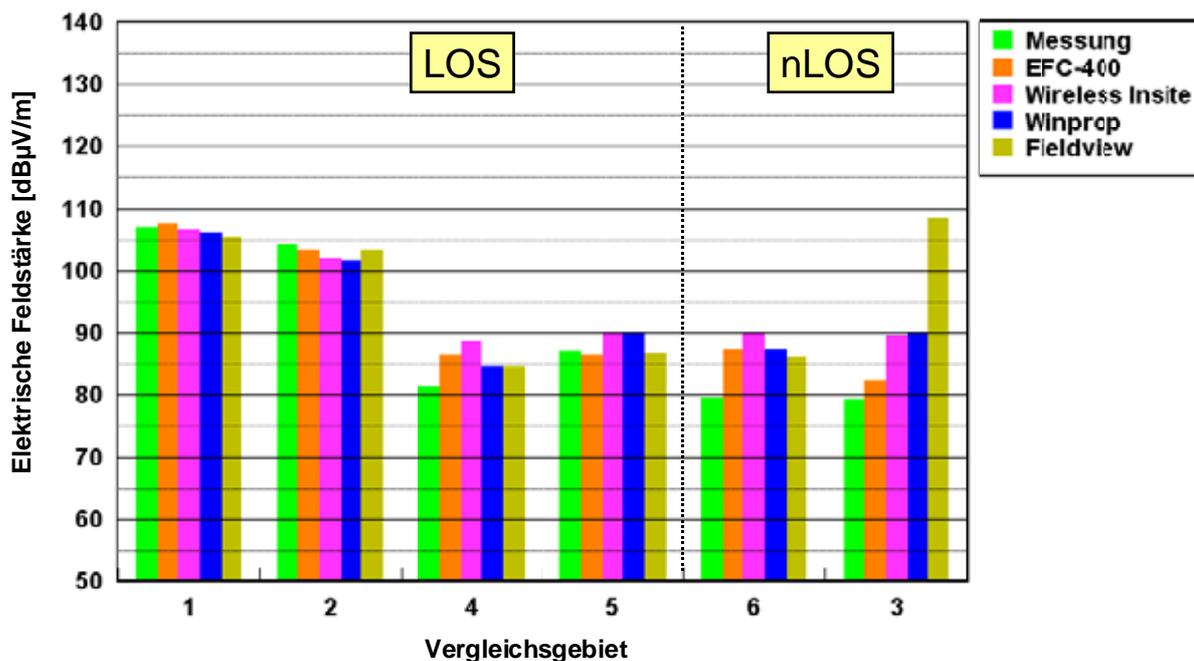


Bild 7.17: Simulationsergebnisse im Vergleich zum Messergebnis für die verschiedenen Vergleichsgebiete für das Szenario 2

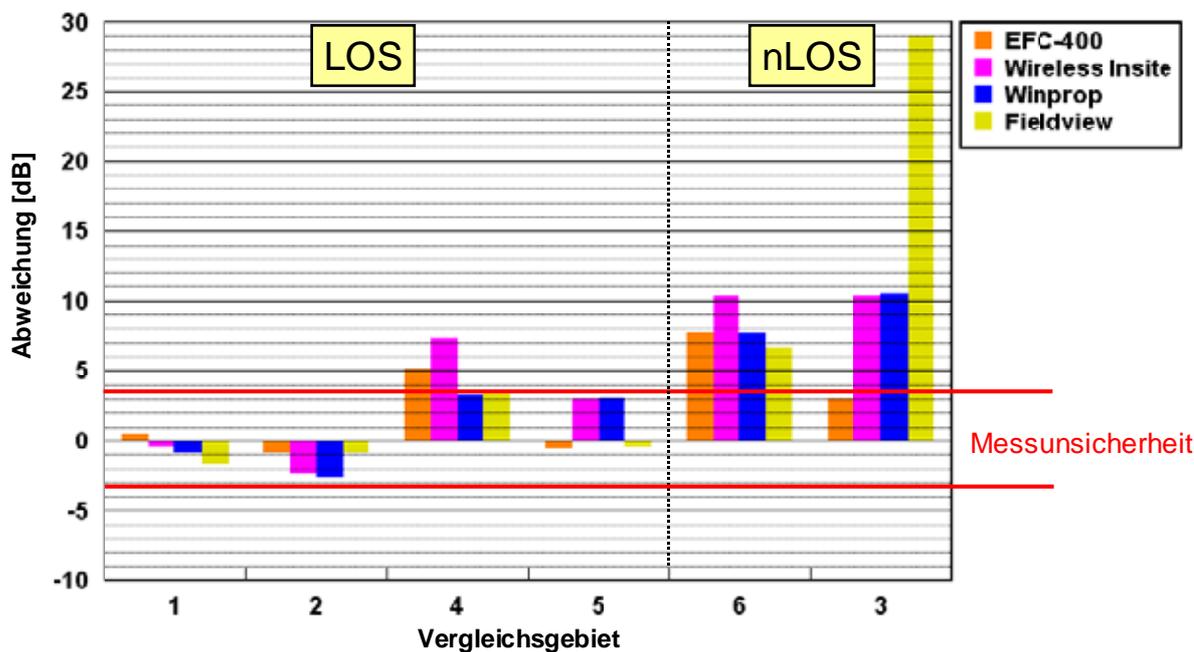


Bild 7.18: Abweichung zwischen Berechnung und Messung für das Szenario 2 (Berechnungswert minus Messwert in [dB])

Die Ergebnisse aus den obigen Bilder müssen differenziert betrachtet werden. Für die Vergleichsgebiete 1, 2 und 5 liefern die Softwarepakete mit Abweichungen zwischen -2,7 und 3,1 dB vor dem Hintergrund der Messunsicherheit eine gute Prognose. Auffällig an Vergleichsgebiet 4 ist die Tendenz zur Überbewertung aller Programme (Abweichungen

zwischen 3,4 und 7,4 dB). Hierzu ist in folgendem Bild die reale Umgebung von Vergleichsgebiet 4 dargestellt.

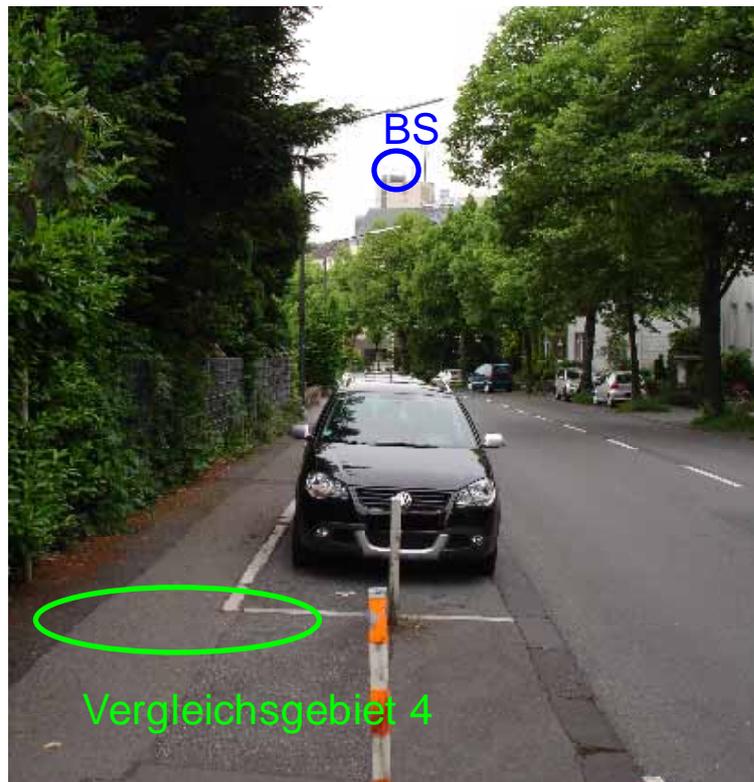


Bild 7.19: Vergleichsgebiet 4 des Szenarios 2, Hainstraße - Wuppertal

Wie aus Bild 7.19 ersichtlich, befinden sich am Rand der Straße zwischen Basisstation (BS) und Messort hohe Bäume. Immissionsanteile aus den Reflexionen an den Gebäuden werden eventuell durch die Vegetation abgedämpft, was in den Simulationen nicht berücksichtigt wird. Nimmt man bei Wireless Insite z.B. nur das Ergebnis aus dem direkten Pfad zum Vergleichsgebiet 4 und vernachlässigt die Anteile aus den Reflexionswegen, reduziert sich die Immissionsprognose um fast 2 dB und liegt damit näher an der real gemessenen Immission, was ein weiterer Hinweis auf den hier vorliegenden Einfluss der Vegetation auf die Immissionsverteilung ist.

Beim Vergleichsgebiet 6 besteht in der *realen Umgebung* keine Sichtverbindung zur Basisstation, da diese durch Baumbewuchs verdeckt ist. Innerhalb der Softwarepakete wurde diese Vegetation aber nicht modelliert. Laut [KLE 06] können Vegetationsdämpfungswerte in der Größenordnung von 10-20 dB liegen, wodurch die Überbewertungen (Abweichungen zwischen 6,6 und 10,3 dB) für Vergleichsgebiet 6 erklärt werden können.

Das Vergleichsgebiet 3 liegt von der Basisstation aus gesehen verdeckt hinter Gebäuden und hat somit keine Sichtverbindung. Die Vernachlässigung der Gebäude führt bei der Methode „Freiraum + 3 dB“ erwartungsgemäß zu einer großen Überbewertung (29 dB), die bei den anderen Softwarepaketen bei Abweichungen zwischen 3 und 10,5 dB schon deutlich kleiner ausfällt.

In der folgenden Tabelle sind die jeweiligen Simulationszeiten für das in diesem Abschnitt betrachtete Szenario dargestellt.

| | EFC-400 | Wireless Insite | Winprop | Fieldview |
|--------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------|
| Zeitdauer in [min] | 120 | 390 | 60 + 30 | 5 |

Tabelle 7.6: Zeitdauer für die Simulationen für das Szenario 2

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt angemerkt, ist bei den Simulationszeiten zu beachten, dass bei Wireless Insite die Immissionsverteilung nicht flächendeckend berechnet wurde, sondern nur an den jeweils etwa 100 Punkten in den Vergleichsgebieten. Die Simulationszeit bei Winprop setzt sich erneut aus der Zeit für die Vorverarbeitung und der Immissionsberechnung zusammen.

Wie beim vorangegangenen Szenario nimmt die Modellierungszeit bei der Berechnung mit reiner Freiraumausbreitung aufgrund der fehlenden Hindernisse auch hier nur wenige Minuten in Anspruch, während die Modellierungszeit bei den anderen Programmen je nach Dateiformat und Geo-Referenzierung der zur Verfügung stehenden Eingabedaten mehrere Stunden in Anspruch nehmen kann.

7.4 Konfiguration 3: Endgerät

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Abschnitten, bei denen die Immission durch eine Basisstation im Fokus stand, wird in diesem Abschnitt eine Konfiguration behandelt, bei der die Immission durch ein Endgerät simuliert und mit Messergebnissen aus der selben typischen Büroumgebung verglichen wird. Als Grundlage für das im folgenden verwendete Gebäude dient ein Trakt der IMST GmbH in Kamp-Lintfort, der in den Softwarepaketen dreidimensional modelliert wurde. Die Simulationsumgebung besteht aus einer komplexen Gebäudestruktur mit zwei Etagen und unterschiedlichen Materialien (siehe Bild 7.20).

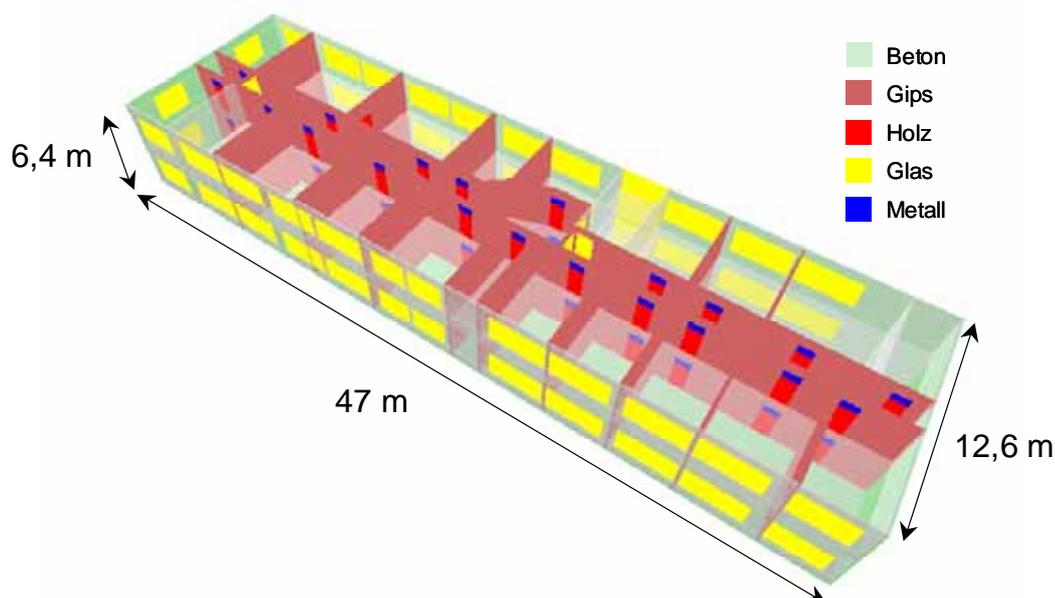


Bild 7.20: Modellierungsumgebung für die Bestimmung der Immission durch ein Endgerät

An dem oben dargestellten Szenario kann die Exposition durch ein Endgerät speziell in Indoor-Umgebungen analysiert werden. So werden folgende Konfigurationen näher betrachtet:

- Exposition durch ein Endgerät in Nachbarbüros
- Sichtverbindung zum Endgerät (LOS)
- Keine Sichtverbindung zum Endgerät (nLOS)
- Exposition durch ein Endgerät in einer anderen Etage

Als Endgerät wurde das „MAX-210HW2“ der Firma ZyXEL (siehe Bild 7.21) verwendet, das mittels des schon in Abschnitt 6.1 beschriebenen Basisstationssimulators „Rohde & Schwarz CMW 270“ angesprochen wurde.

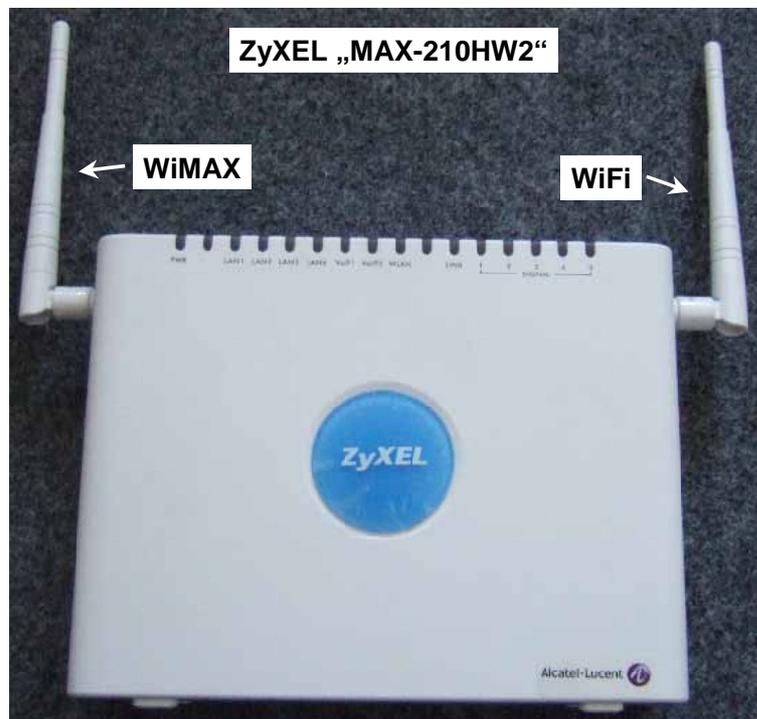


Bild 7.21: WiMAX Endgerät „ZyXel MAX-210HW2“

Die technischen Simulationsparameter wurden zum Teil aus eigenen Messungen ermittelt. So lag die messtechnisch ermittelte maximale Sendeleistung des Endgerätes bei 24,4 dBm. Anschließend wurde diese aus der zeitlichen Struktur eines Frames auf die mittlere Sendeleistung skaliert (siehe folgendes Bild).

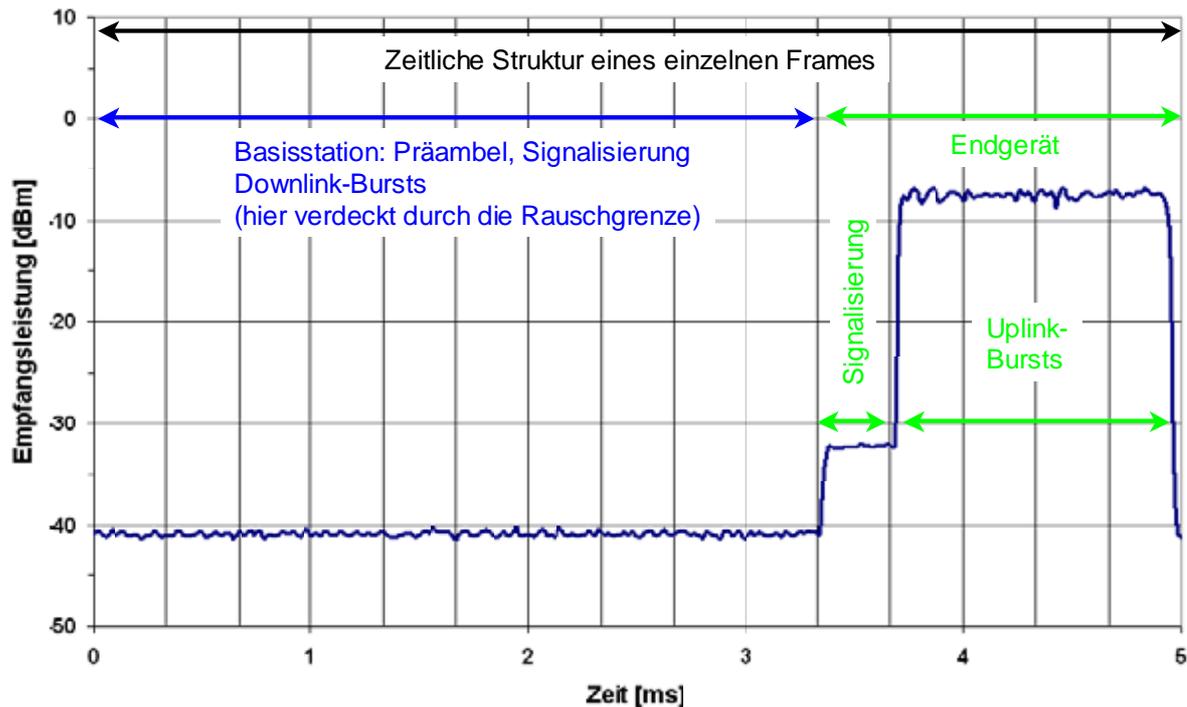
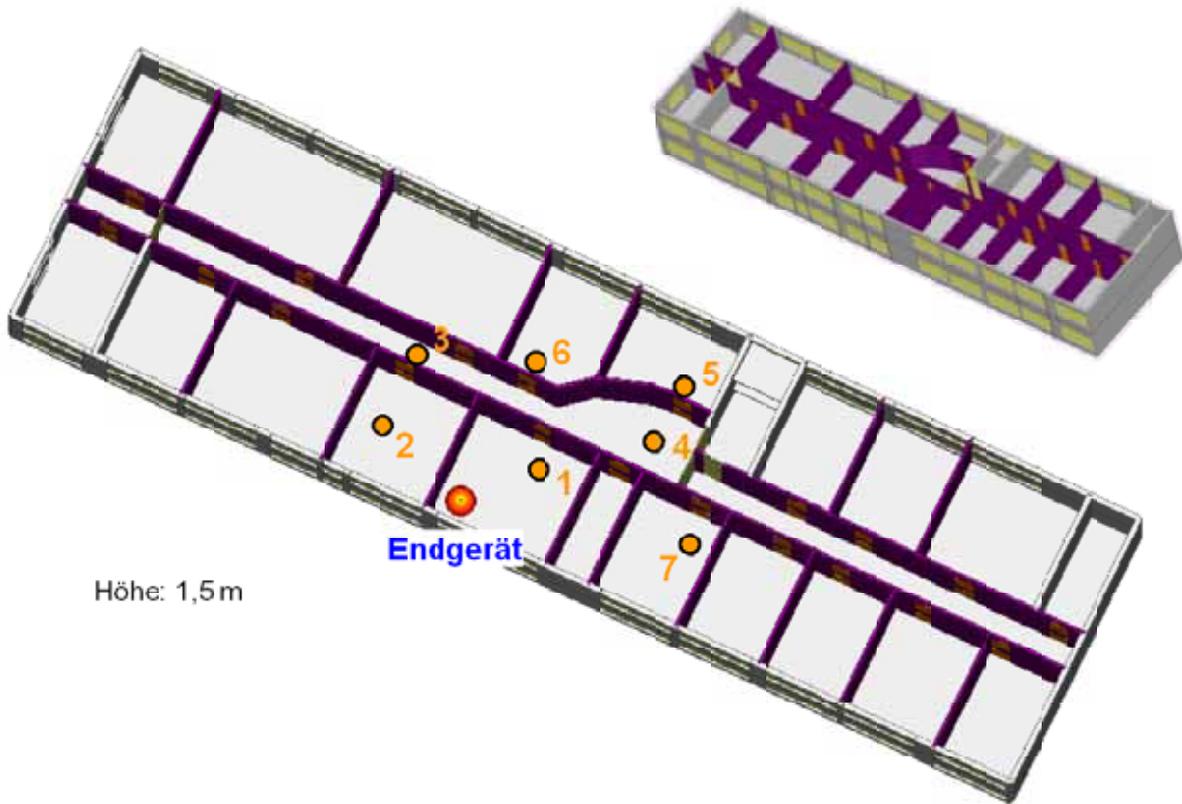


Bild 7.22: Zeitliche Struktur eines Frames (vgl. Teilbericht I, Abschnitt 2.5.3)

Aus obigen Bild ist zu erkennen, dass in der hier verwendeten Konfiguration dem Endgerät von dem insgesamt 5 ms langen Frame 1,6 ms zur Verfügung stehen. Diese teilen sich in 0,3 ms Signalisierung und 1,3 ms Sendezeit für Daten auf. Hieraus kann man den Skalierungsfaktor 3,85 bestimmen, mit dem man aus der maximalen (24,4 dBm) die mittlere Sendeleistung von 18,55 dBm erhält. Darüber hinaus wurde in Anlehnung an [PREI 06] das WiMAX-Endgerät als Dipol modelliert. Resultierend ergeben sich folgende technische Simulationsparameter:

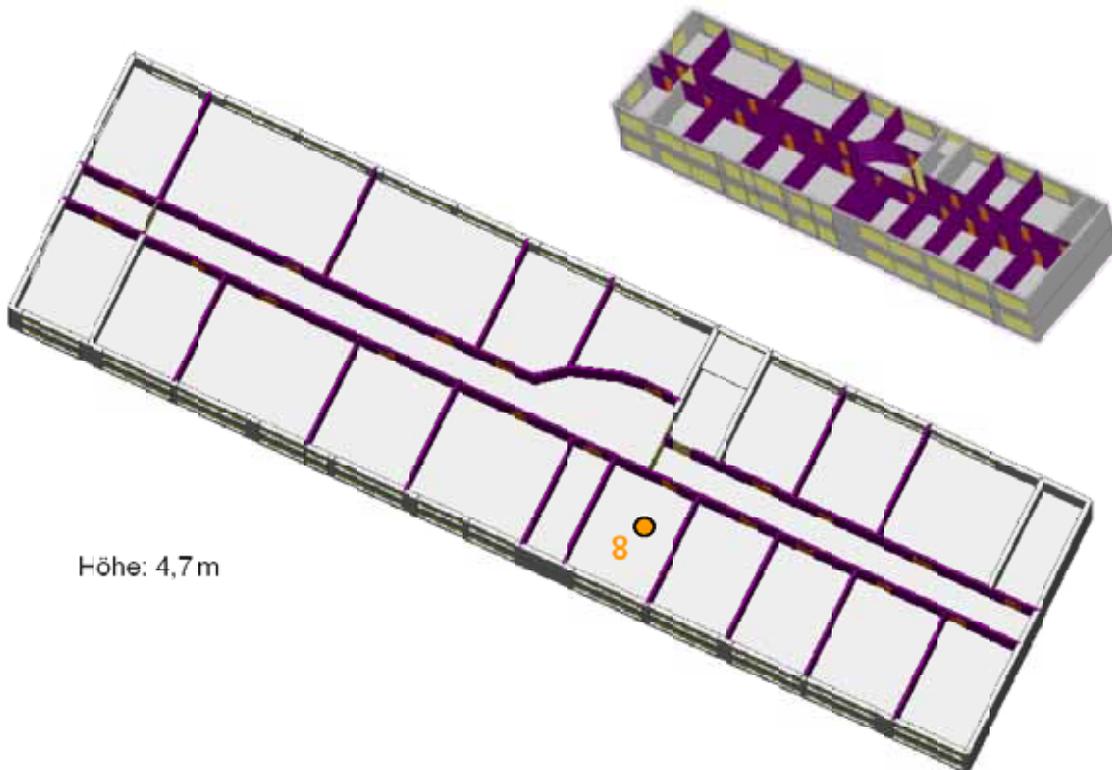
- Sendeantenne: Dipol (Annahme)
- Sendeleistung: 18,55 dBm (Messtechnisch bestimmt)
- Gewinn: 6 dBi (Herstellerangabe)
- Sendefrequenz: 3588,75 MHz (Einstellung: Basisstationssimulator)
- Antennenhöhe: 1 m (über dem Etagenboden)
- Azimut: omnidirektional (Annahme)
- Downtilt: 0° (Annahme)

In den folgenden zwei Bildern ist die Simulationsumgebung mit den dazugehörigen Vergleichsgebieten dargestellt. Während sich die Vergleichsgebiete 1–7 auf der gleichen Etage wie das Endgerät befinden, liegt das Vergleichsgebiet 8 eine Etage darüber.



Höhe: 1,5m

Bild 7.23: Übersicht über die Position des Endgerätes und die Verteilung der Vergleichsgebiete in einer Höhe 1,5 m



Höhe: 4,7m

Bild 7.24: Übersicht über die Position des Endgerätes und die Verteilung der Vergleichsgebiete in einer Höhe 4,7 m

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Lage, die Sichtverhältnisse (LOS: Sicht; nLOS: keine Sicht) in den jeweiligen Vergleichsgebieten zum Endgerät und die zugehörigen lateralen Abstände.

| Szenario: | Endgerät | | |
|--------------------|----------|------------------------------|-----------------------------------------|
| | Höhe [m] | Sichtverhältnis zum Endgerät | Laterale Entfernung zum Endgerät in [m] |
| Vergleichsgebiet 1 | 1,5 | LOS | 2,8 |
| Vergleichsgebiet 2 | 1,5 | nLOS | 5,0 |
| Vergleichsgebiet 3 | 1,5 | nLOS | 6,8 |
| Vergleichsgebiet 4 | 1,5 | nLOS | 8,3 |
| Vergleichsgebiet 5 | 1,5 | nLOS | 10,0 |
| Vergleichsgebiet 6 | 1,5 | nLOS | 6,6 |
| Vergleichsgebiet 7 | 1,5 | nLOS | 9,6 |
| Vergleichsgebiet 8 | 4,7 | nLOS | 9,3 |

Tabelle 7.7: Überblick über die Lage der Vergleichsgebiete, die Sichtverhältnisse und Abstände zum Endgerät für das Szenario 3

Die Simulationen wurden mit allen Softwarepaketen analog zu den Messungen in zwei verschiedenen Ebenen auf einer Höhe von 1,5 m bzw. 4,7 m über Grund durchgeführt.

In den anschließenden Bildern sind die Simulationsergebnisse von EFC-400 für die beiden Ebenen dargestellt. Neben dem Standort des Endgerätes sind die acht unterschiedlichen Vergleichsgebiete markiert. Hierbei liegt bei Vergleichsgebiet 1 Sichtverbindung zur Anlage vor (LOS), wohingegen die verbleibenden Vergleichsgebiete keine Sicht zum Endgerät aufweisen (nLOS).

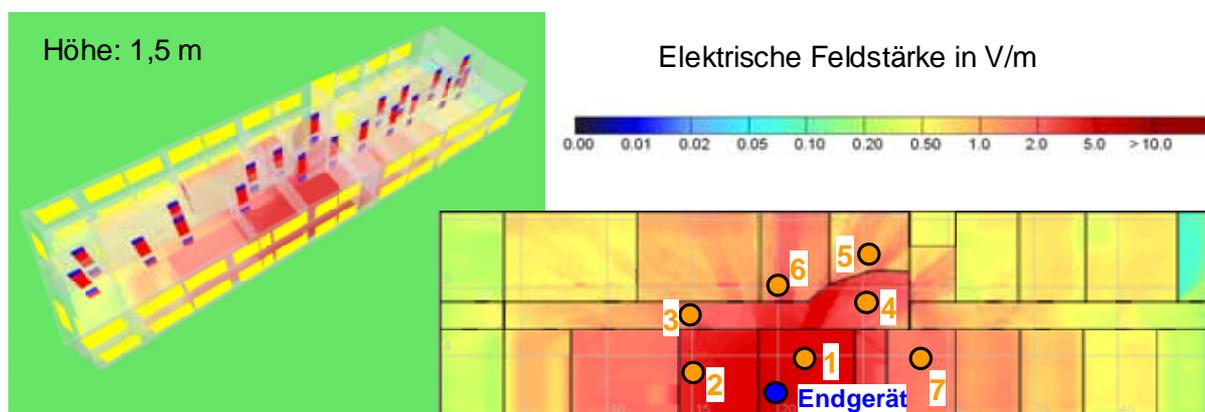


Bild 7.25: Simulationsergebnis von EFC-400 (Ebene 1)

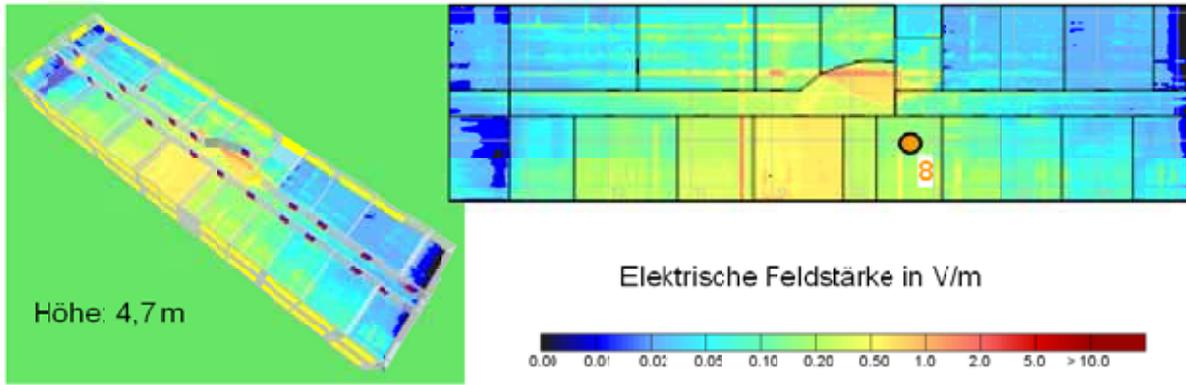


Bild 7.26: Simulationsergebnis von EFC-400 (Ebene 2)

Analog zu der Darstellungsweise des vorangegangenen Berechnungsergebnisses sind in den folgenden Bildern die Ergebnisse der Simulationen von Wireless Insite (Bild 7.27) und Winprop (Bilder 7.28-29) dargestellt.

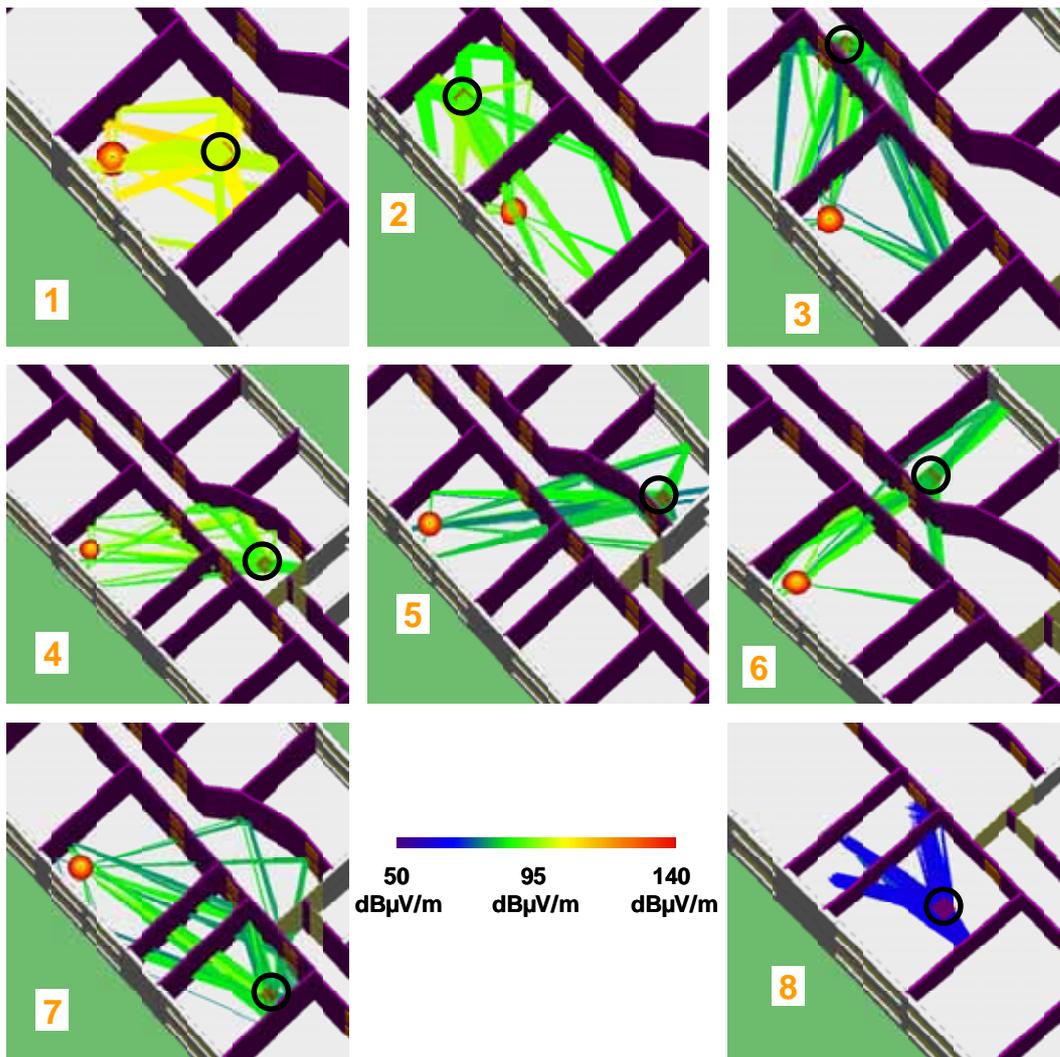


Bild 7.27: Simulationsergebnis von Wireless Insite, Ausbreitungspfade

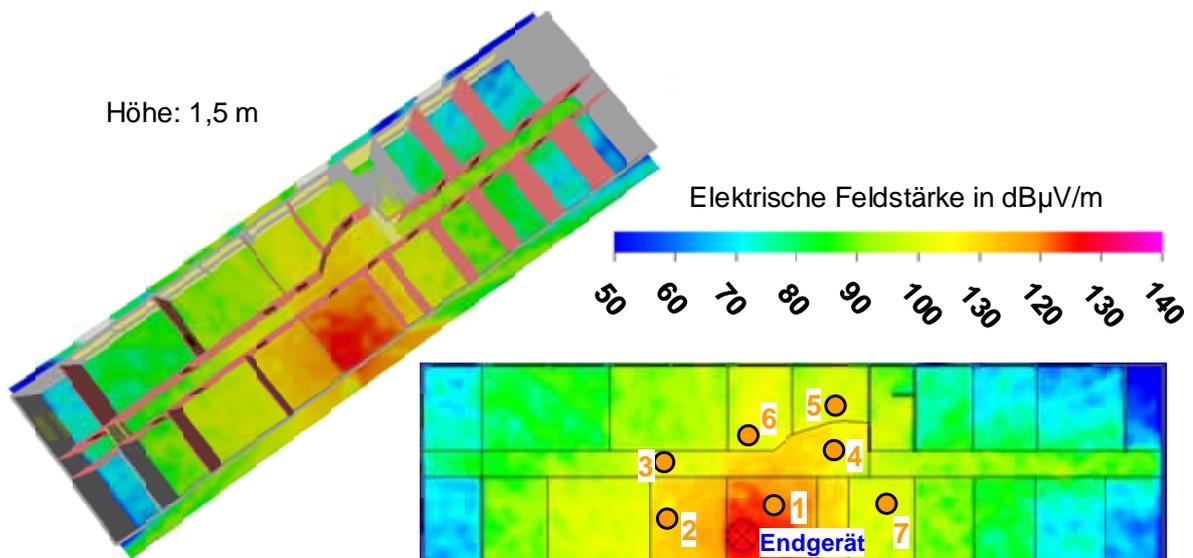


Bild 7.28: Simulationsergebnis von Winprop (Ebene 1)

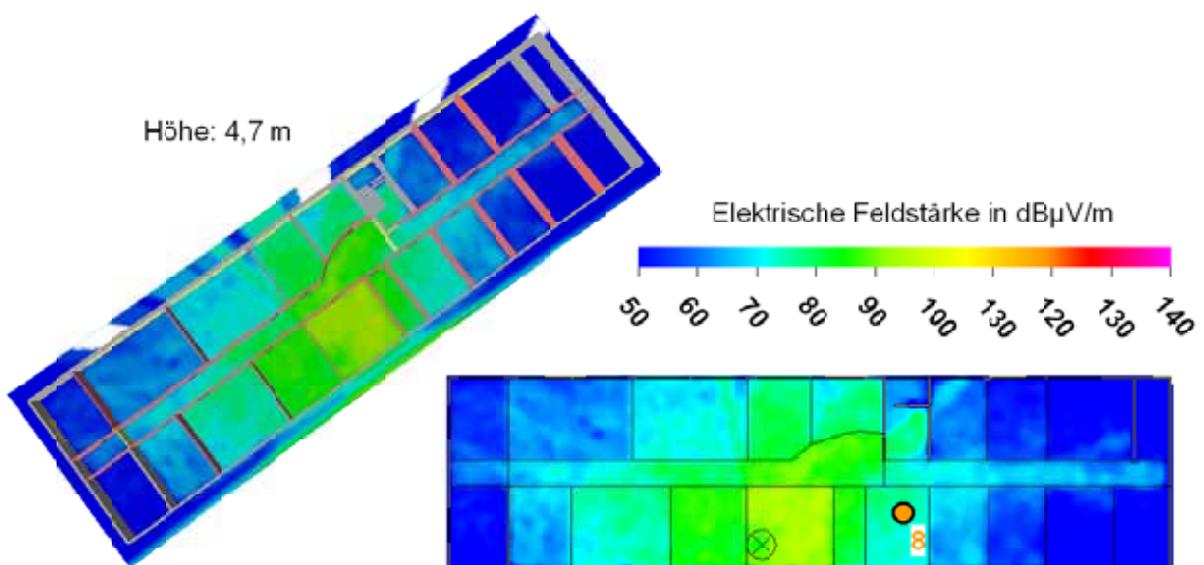


Bild 7.29: Simulationsergebnis von Winprop (Ebene 2)

Bild 7.30 zeigt als Zusammenfassung der Simulationen den Vergleich der berechneten Immissionen in den acht Vergleichsgebieten zu dem messtechnisch ermittelten Wert getrennt nach jeweiligem Softwarepaket und Bild 7.31 die entsprechenden Abweichungen. Die Vergleichsgebiete sind wieder nach dem Kriterium der Sichtverbindung gruppiert. Darüber hinaus wurde auch hier die Immission mit der Methode „Freiraum + 3 dB“ berechnet.

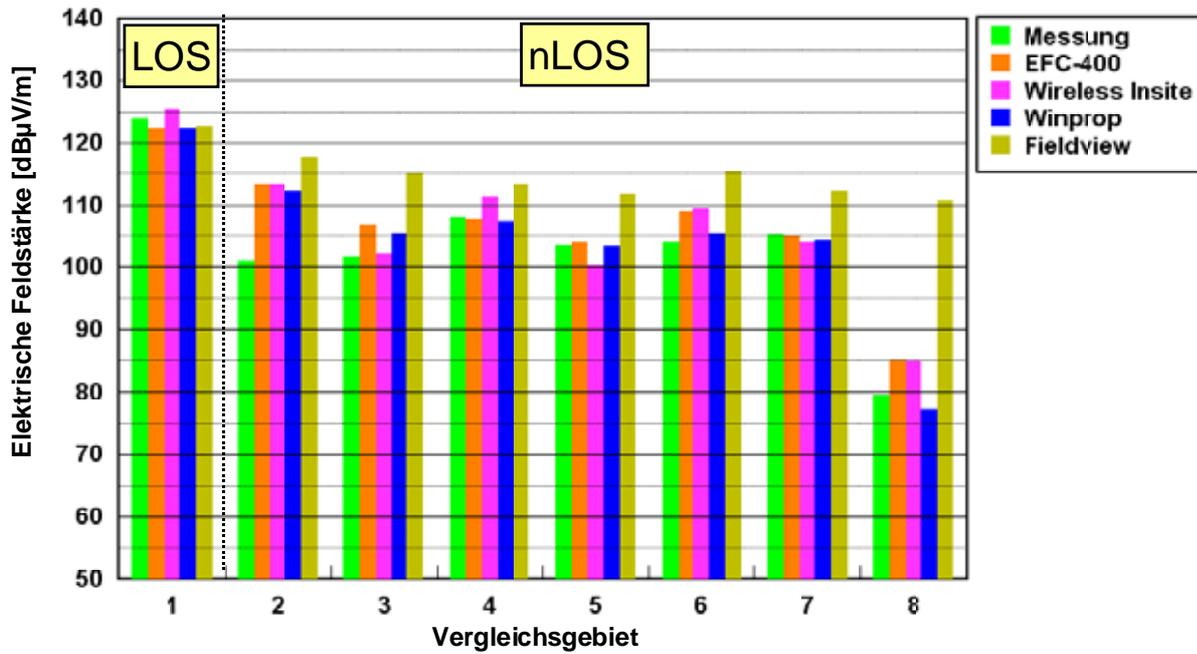


Bild 7.30: Simulationsergebnisse für die Konfiguration „Endgerät in einer Indoor-Umgebung“

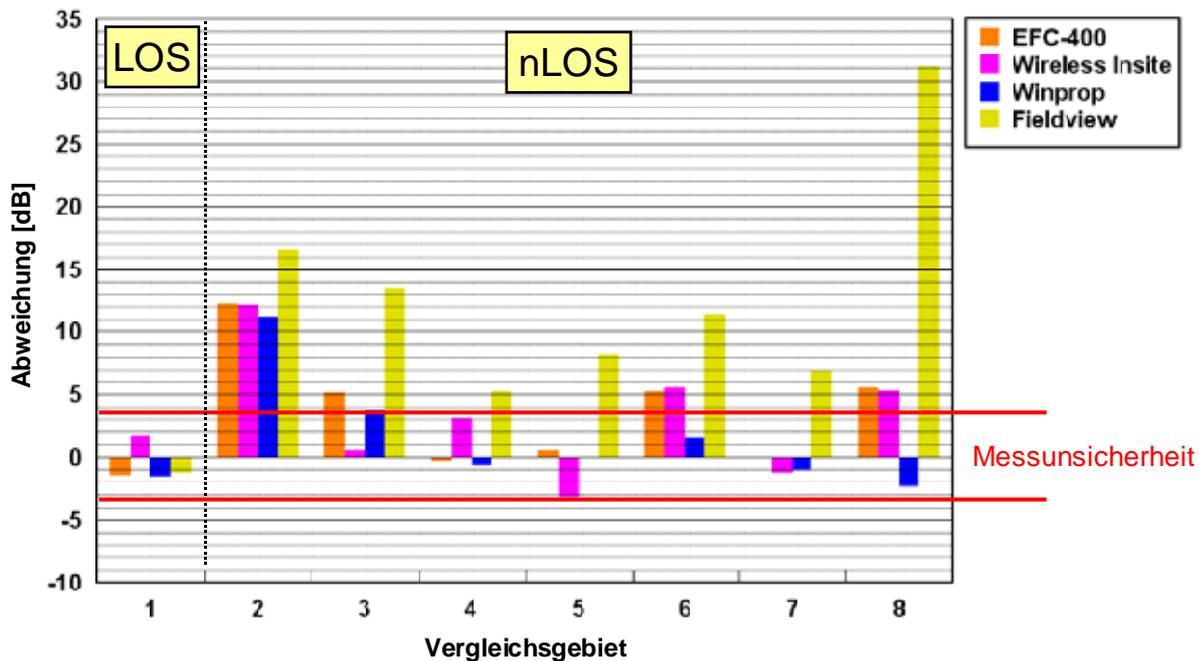


Bild 7.31: Abweichung zwischen Berechnung und Messung (Berechnungswert minus Messwert in [dB])

Als Ergebnis lässt sich aus den obigen Bildern zunächst festhalten, dass die Softwarepakete bei Abweichungen zwischen $-1,6$ und $1,7$ dB vor dem Hintergrund der Messunsicherheit eine gute Prognose der Immission im Fall von einer vorliegenden Sichtverbindung zur Sendeantenne liefern, was sich vor dem Hintergrund der bereits untersuchten Basisstations-

Szenarien gut in das Gesamtbild einfügt. Die absolute Schwankungsbreite für die Berechnungsergebnisse in diesem Gebiet liegt bei 3,3 dB.

Bei den Vergleichsgebieten ohne Sicht zum Endgerät liefert die Methode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ deutliche Überbewertungen (Abweichungen zwischen 5 und 31 dB), während die anderen Softwarepakete zum Teil unter Berücksichtigung der Messunsicherheit die Immissionen gut prognostizieren (maximale Abweichungen zwischen –2,4 und 5,6 dB).

Auffällig ist weiterhin die doch deutliche Überbewertung (Abweichungen von 11 bis 17 dB) der Immission im Vergleichsgebiet 2. Um zu untersuchen, ob dies möglicherweise durch den Umstand bedingt ist, dass an der Wand zwischen Endgerät und Vergleichsgebiet 2 Metallschränke aufgebaut sind, die in der Berechnung vernachlässigt wurden, wurde eine erneute Simulation mit Wireless Insite inklusive der Metallschränke durchgeführt (siehe Bild 7.32).

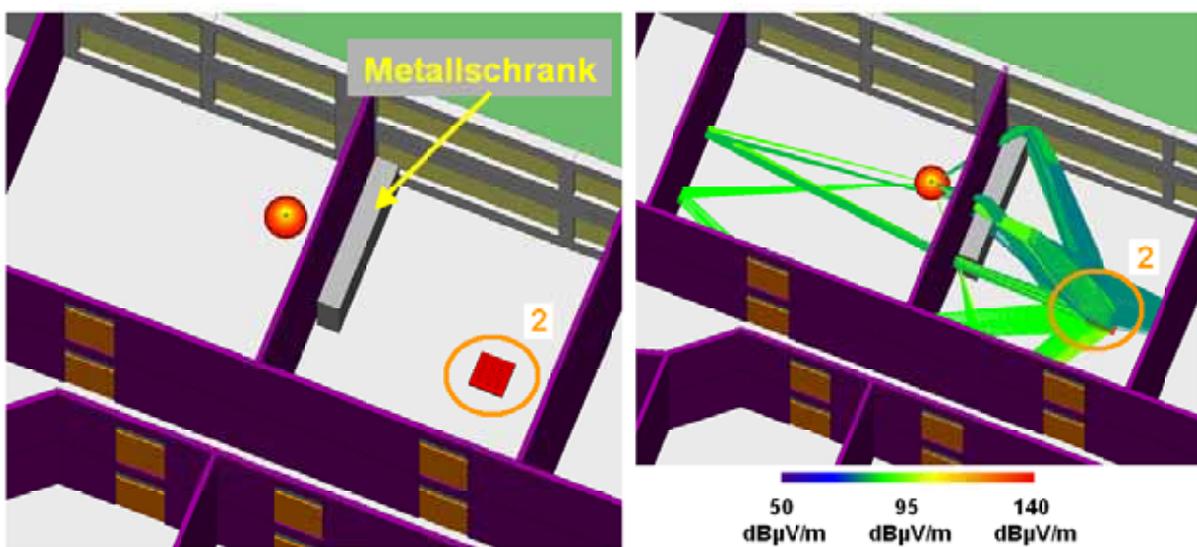


Bild 7.32: Berechnung unter Berücksichtigung eines Metallschranks für das Vergleichsgebiet 2

Die maximale Immission der Berechnung aus obigem Bild beträgt für das Vergleichsgebiet 2 nun 100,58 dBµV/m. Im Gegensatz zu einer Abweichung zwischen Messung und Berechnung von 13,6 dB bei der vorherigen Berechnung ohne Berücksichtigung des Metallschranks, beträgt diese nun nur noch 0,4 dB. Somit liegt die deutliche Überbewertung im Vergleichsgebiet 2 eindeutig an der Vernachlässigung des Metallschranks.

In Tabelle 7.8 sind die einzelnen Simulationszeiten der Softwarepakete für die hier betrachtete Konfiguration zu sehen.

| | EFC-400 | Wireless Insite | Winprop | Fieldview |
|--------------------|---------|-----------------|---------|-----------|
| Zeitdauer in [min] | 70 | 80 | 15 + 60 | 5 |

Tabelle 7.8: Simulationszeit der einzelnen Programme für die hier betrachtete Konfiguration

Bei den Simulationszeiten ist zu beachten, dass bei Wireless Insite nicht die gesamte Etage, sondern lediglich acht kleine (1 m x 1 m) Areale berechnet wurden. Die Simulationszeit für

Winprop setzt sich aus einem Preprocessing der Gebäudeinformationen im Programmmodul „Wallman“ und der Immissionsberechnung im Programmpaket „ProMan“ zusammen. Gerade wenn unterschiedliche Endgerätekonfigurationen oder differierende Positionen berechnet werden sollen, kann durch den nur einmaligen Preprocessing-Schritt insgesamt Simulationszeit eingespart werden.

Während die Modellierungszeit bei Fieldview aufgrund der fehlenden Hindernisse auch nur wenige Minuten in Anspruch nimmt, kann die Modellierung bei den anderen Programmen je nach Datenformat und Geo-Referenzierung der zur Verfügung stehenden Eingabedaten mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

7.5 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde ein Vergleich von berechneten Feldstärkewerten und entsprechend messtechnisch bestimmten Immissionen an WiMAX-Basisstations- und Endgerätekonfigurationen durchgeführt. Hierbei wurden Indoor- und Outdoor-Szenarien, differierende Sichtbedingungen und unterschiedliche Abstände zur Basisstation bzw. zum Endgerät berücksichtigt.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass in Situationen mit Sicht zur Sendeantenne (LOS) alle Programme die Immission an der Mehrzahl der Vergleichsgebiete vor dem Hintergrund der Messunsicherheit gut prognostizieren. Dennoch sollten bei derartigen Konfigurationen aber folgende Aspekte berücksichtigt werden: Befinden sich z.B. Bäume in der Sichtverbindung oder in anderen relevanten Ausbreitungswegen, die in den Simulationen außer Acht gelassen wurden, überschätzen die Programme die gemessene Immission. Insbesondere der Vergleich der Messresultate mit den Ergebnissen der einfachen Berechnungsmethode „Freiraum + 3 dB“ hat gezeigt, dass auch diese für Konfigurationen mit Sicht zur Anlage als geeignet angesehen werden kann.

Im Gegensatz dazu ist diese Methode für Situationen ohne Sicht zur Sendeanlage nicht geeignet, die realen Immissionen exakt zu prognostizieren. In den betrachteten Szenarien traten hierbei zum Teil deutliche Überschätzungen auf. Die Einbeziehung von Gebäuden bzw. Wänden bei Indoor-Szenarien in die Simulation ist dementsprechend zwingend erforderlich.

Die Modellierungszeit der Szenarios in den einzelnen Programmen hängt sehr stark von den verfügbaren Dateiformaten und der Geo-Referenzierung der Eingabedaten ab. Generell ist die Modellierungszeit bei Berechnung mit reiner Freiraumausbreitung in allen Szenarien mit wenigen Minuten anzugeben, da hier ja keine Gebäude oder andere Hindernisse modelliert, sondern lediglich das Antennendiagramm, Sendeleistung und Ausrichtung angegeben werden müssen. Je nach verfügbarem Eingabeformat, kann die Modellierungszeit bei den anderen Programmen mehrere Stunden betragen.

8 Vergleichende Berechnungen unterschiedlicher Funkdienste

In diesem Kapitel werden vergleichende Berechnungen der Immission durch Endgeräte bei verschiedenen Funkdiensten durchgeführt. Konkret werden hier WiMAX, WLAN und UMTS betrachtet.

Vorab sei an dieser Stelle ergänzend erwähnt, dass der Fokus in der folgenden Untersuchung auf einem *qualitativen* Immissionsvergleich der drei Funkdienste beruht. Aufgrund der Vielzahl möglicher Endgeräte und in der Praxis vorstellbaren Szenarien ist eine allumfassende Bewertung im Hinblick auf die individuelle Expositionssituation nicht möglich. Daher wird jeweils nur *ein* Endgerät betrachtet. Zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Funkdienste wird zudem von einer *Vollauslastung* der Endgeräte in Bezug auf den Uplink ausgegangen. Hinzukommend werden alle Endgeräte auch am *selben Ort* platziert, um Immissionsunterschiede durch eine örtliche Variation ausblenden zu können.

In Anlehnung an [PREI 06] werden die Sendeantennen jeweils als Dipol modelliert.

Für WLAN wird der in Europa meist verbreitete Standard IEEE 802.11g (siehe [PREI 06]) in den nachfolgenden Berechnungen verwendet. Der Frequenzbereich liegt im 2,4 GHz ISM-Band und die maximale mittlere abgestrahlte Sendeleistung entspricht nahezu der maximal möglichen abgestrahlten Sendeleistung von 20 dBm (EIRP) (vgl. [PREI 06]). Bei einem angenommenen Antennengewinn von 3 dBi beträgt die Sendeleistung am Antenneneingang demnach 17 dBm. Als theoretisch maximal mögliche Datenrate wird bei dem WLAN-Standard IEEE 802.11g 54 Mbit/s angegeben.

Bei UMTS beträgt die maximale Sendeleistung im FDD-Mode 125 mW (21 dBm). Der Antennengewinn wird als 0 dBi angenommen. Im Jahr 2008 soll die dritte Ausbaustufe von HSUPA in Betrieb genommen werden, bei der das theoretische Maximum der Uplink-Datenrate bei 5,8 Mbit/s liegt (siehe z.B. <http://www.voip-information.de/hsupa/hsupa.php>).

Für die Betrachtung der Immissionsverteilung eines WiMAX-Endgerätes werden folgende Vereinfachungen gemacht: Da das 3,5 GHz-Band global gesehen am weitesten für die drahtlose Breitbandübertragung zur Verfügung steht, wird in den nachfolgenden Simulationen nur dieser Frequenzbereich betrachtet. Vor dem Hintergrund, dass die entsprechenden Standards (802.16-2004 bzw. 802.16e-2005) keine Angaben bezüglich maximaler Sendeleistungen machen (vgl. Teilbericht I) und die mittlere Sendeleistung eines Endgerätes darüber hinaus abhängig ist von den jeweiligen Netzwerkeinstellungen, wird im folgenden auf das Endgerät „Zyxel MAX-210HW2“ aus Abschnitt 6.1 zurückgegriffen. Laut Herstellerangaben beträgt die maximale Sendeleistung für dieses Gerät 27 dBm und die Sendeantenne hat einen Gewinn von 6 dBi (siehe <http://www.zyxel.com>). Unter der weiteren Annahme, dass das Endgerät 1,8 ms des insgesamt 5 ms langen Frames sendet, erhält man eine mittlere Sendeleistung von 22,6 dBm (vgl. Abschnitt 7.4). Bezüglich der Datenrate können beim Standard 802.16e-2005 theoretisch 75 Mbit/s erreicht werden.

In der folgenden Tabelle sind die technischen Simulationsparameter nochmals zusammenfassend gegenüber gestellt.

| System | Sendefrequenz in [MHz] | Mittlere Sendeleistung in [dBm] | Antennengewinn in [dBi] | Max. Datenrate im Uplink in [Mbit/s] |
|--------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| UMTS | 1900 | 21 (FDD) | 0 | 5,8 |
| WLAN | 2400 | 17 | 3 | 54,0 (802.11g) |
| WiMAX | 3500 | 22,6* | 6 | 75,0 (802.16e) |

* Mittlere Sendeleistung bei einem DutyCycle von 36 % und einer maximalen Sendeleistung von 27 dBm

Tabelle 8.1: Simulationsparameter für die Berechnungen

Für die Simulationen wurde das Programmpaket Winprop verwendet.

8.1 Typische Wohnumgebung

Im folgenden Abschnitt wird zunächst eine typische Wohnumgebung betrachtet. Grundlage für diese Konfiguration ist die Souterrain-Etage eines Mehrfamilienhauses. In den folgenden Bildern ist die Simulationsumgebung dargestellt.

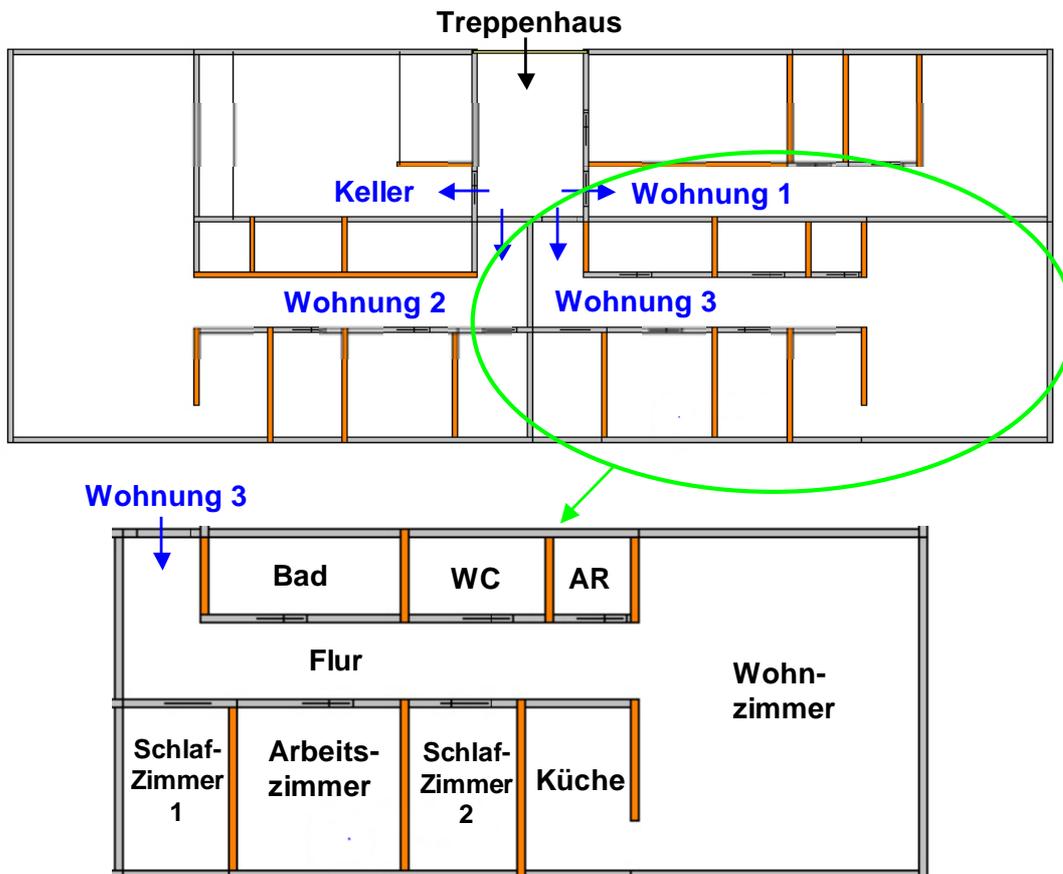


Bild 8.1: Überblick über das Szenario „Typische Wohnumgebung“

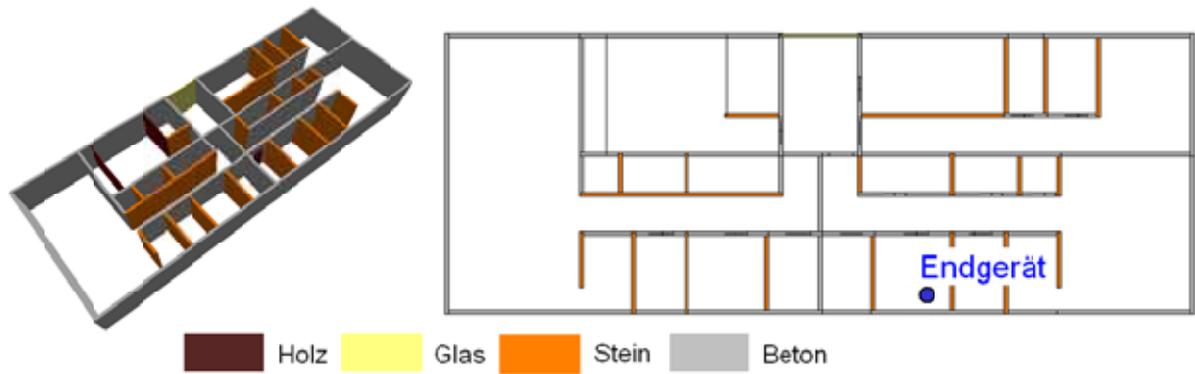


Bild 8.2: Verwendete Materialien und Position des jeweiligen Endgerätes

Es wurde für jedes der drei betrachteten Systeme eine Simulation der Immissionsverteilung mit den in Tabelle 8.1 dargestellten Parametern durchgeführt. Die absoluten Feldstärkewerte sind im folgenden Bild vergleichend für alle drei Systeme dargestellt.

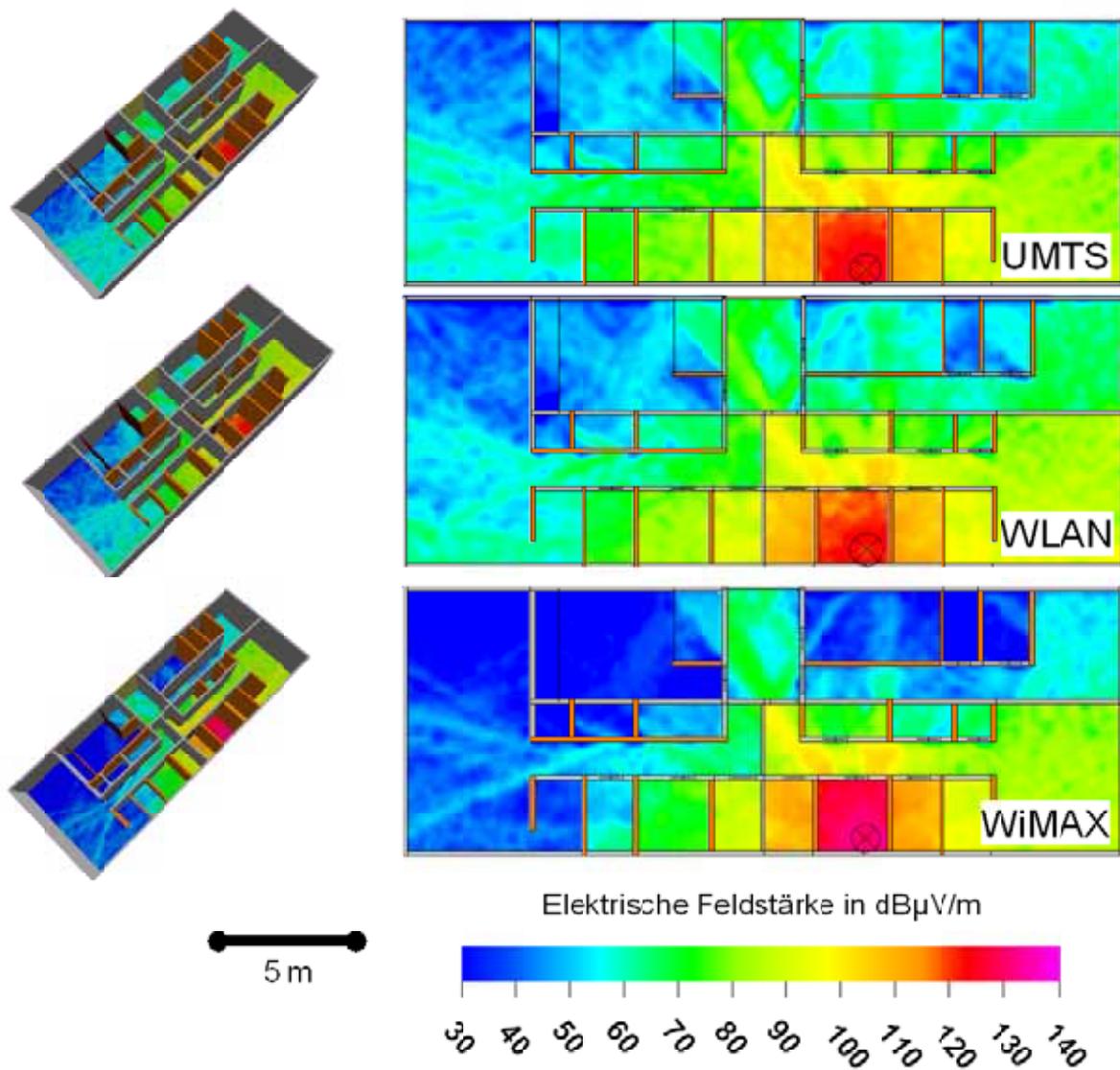


Bild 8.3: Immissionsverteilungen der drei Funkdienste in einer Wohnumgebung

Aus obigem Bild werden folgende Punkte deutlich:

- Die Immissionsverteilung von WLAN und UMTS ist vergleichsweise ähnlich und liegt in der gleichen Größenordnung.
- Die Immission von WiMAX ist in der direkten Umgebung des Endgerätes größer, sie nimmt aber mit zunehmender Anzahl von Hindernissen aufgrund der frequenzbedingten höheren Transmissionsdämpfung schneller ab als die der anderen Systeme. Dies wird bei WiMAX-Betrieb im 5,8 GHz Bereich aufgrund der noch höheren Frequenz vermutlich noch ausgeprägter sein.

Diese beiden Aussagen werden auch durch das folgende Bild unterstützt, in dem die Differenz der logarithmischen Feldstärkewerte der einzelnen Funkdienste dargestellt ist. Die Darstellung ist als „Funkdienst 1 Minus Funkdienst 2“ angegeben; dies entspricht dem Quotienten für die linearen Werte. Liegt eine negative Differenz vor, ist die Immission von Funkdienst 2 größer als diejenige von Funkdienst 1. Bei einer positiven Differenz ist entsprechend die durch Funkdienst 1 generierte Immission höher als die von Funkdienst 2.

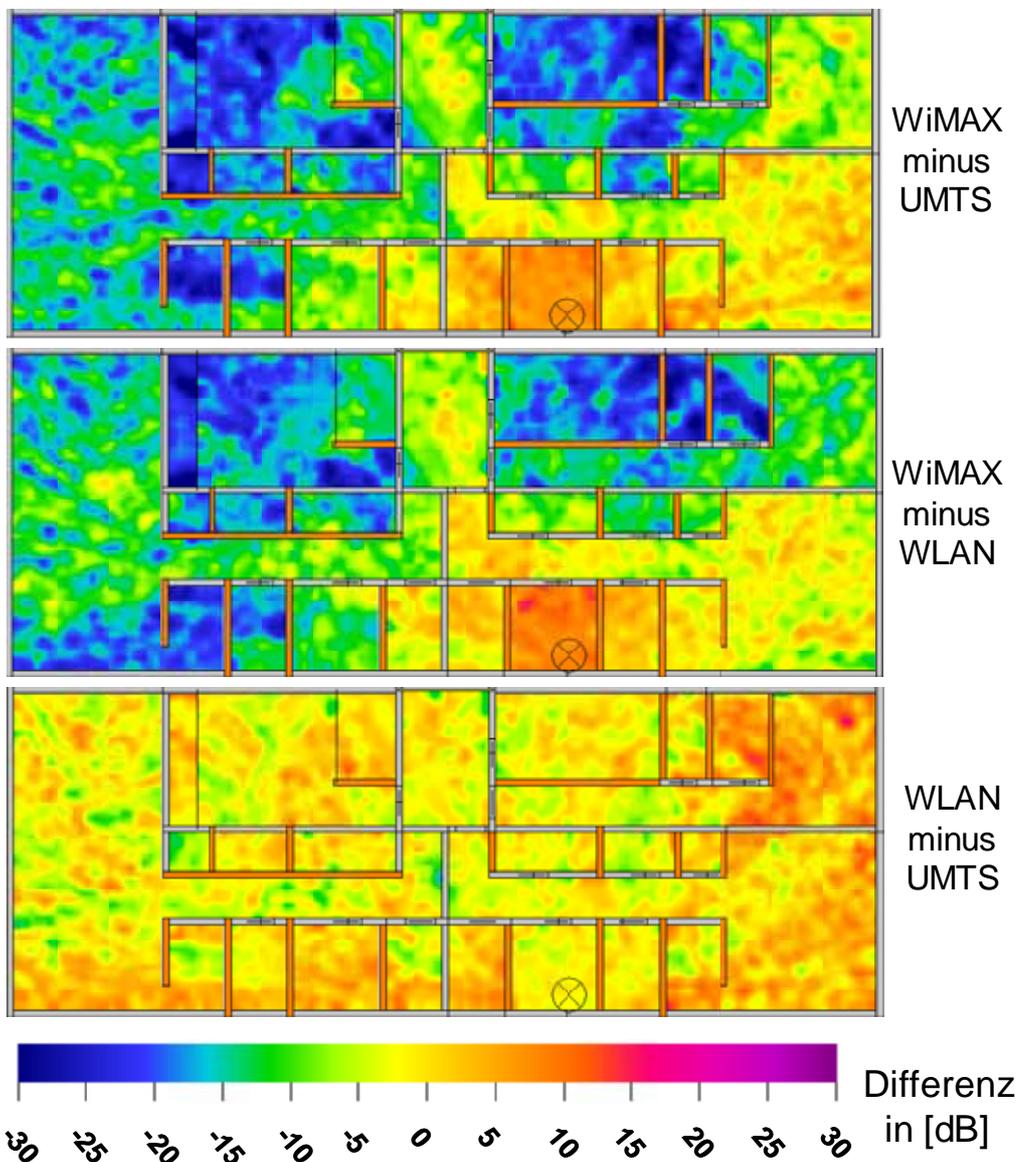


Bild 8.4: Differenz der Feldstärkewerte der einzelnen Funkdienste

Aus den Differenzen zwischen WiMAX mit UMTS bzw. WLAN ist deutlich erkennbar, dass durch Steigerung der Anzahl der zu durchdringenden Hindernisse die Immissionsdifferenz durch die frequenzbedingte höhere Dämpfung negativ wird, wobei die Differenz bei Sicht und auch in den Nachbarräumen doch positiv ist. Die höheren Immissionen in der unmittelbaren Umgebung zum Endgeräte ergeben sich hierbei aufgrund der höheren Sendeleistung und dem höheren Antennengewinn im Vergleich zu den anderen Funkdiensten.

Aus der Differenz zwischen WLAN- und UMTS-Immission wird deutlich, dass es durch die kohärente Überlagerung verschiedener Ausbreitungspfade Bereiche gibt, in denen die UMTS-Immission überwiegt, aber auf der anderen Seite auch Bereiche, in denen die WLAN-Immission dominiert. Hier kann aber festgehalten werden, dass die Immissionen von WLAN und UMTS in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass sich die obigen Betrachtungen nur auf die hier betrachtete Konfiguration beziehen und Schlussfolgerungen auf die individuelle Exposition nicht gezogen werden können.

Nachfolgend wird der obige Immissionsvergleich im Hinblick auf die Fragestellung untersucht, wie sich die Immission für den Endnutzer in Bezug auf die ihm zur Verfügung stehende Datenrate verhält. Hierzu werden die Berechnungsergebnisse aus Bild 8.3 mit der funkdienstabhängigen maximalen theoretischen Datenrate im Uplink (vgl. Tabelle 8.1) auf die resultierende Feldstärke für 1 MBit/s skaliert. Im Vergleich zu Bild 8.3 ist zu beachten, dass sich die Skala sowohl bezüglich der Einheit als auch der Absolutwerte geändert hat.

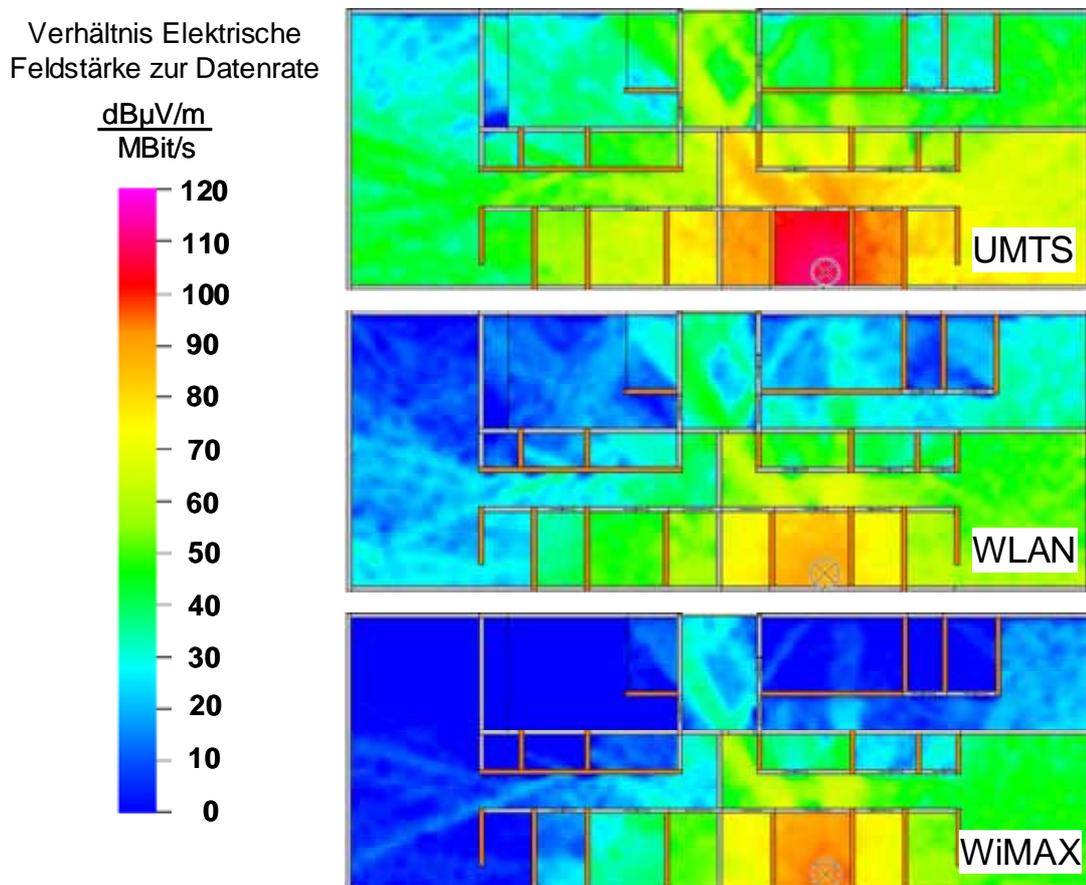


Bild 8.5: Elektrische Feldstärke skaliert auf eine Datenrate von 1 MBit/s im Uplink

Aus Bild 8.5 werden folgende Punkte deutlich

- Die auf die maximal mögliche Datenrate normierte Immission ist bei UMTS deutlich höher als bei den beiden anderen Technologien. Grund hierfür ist die im Vergleich wesentlich kleinere zur Verfügung stehende Datenrate von UMTS.
- Die auf die maximal mögliche Datenrate normierte Immissionsverteilung von WLAN und WiMAX ist vergleichsweise ähnlich und liegt in der gleichen Größenordnung. Während die normierte Immission in der direkten Umgebung des Endgerätes von WiMAX etwas größer ist, kehrt sich dieser Sachverhalt mit zunehmender Anzahl von Wänden um und die normierte Immission von WLAN ist höher.

8.2 Typische Büroumgebung

Analog zum vorangegangenen Abschnitt wird im folgenden eine typische Büroumgebung betrachtet. Als Grundlage dient erneut der Trakt der IMST GmbH in Kamp-Lintfort aus Abschnitt 7.4. Im Gegensatz zum vorangegangenen Beispiel werden hier andere Materialien mit entsprechend anderen Transmissionsdämpfungen verwendet.

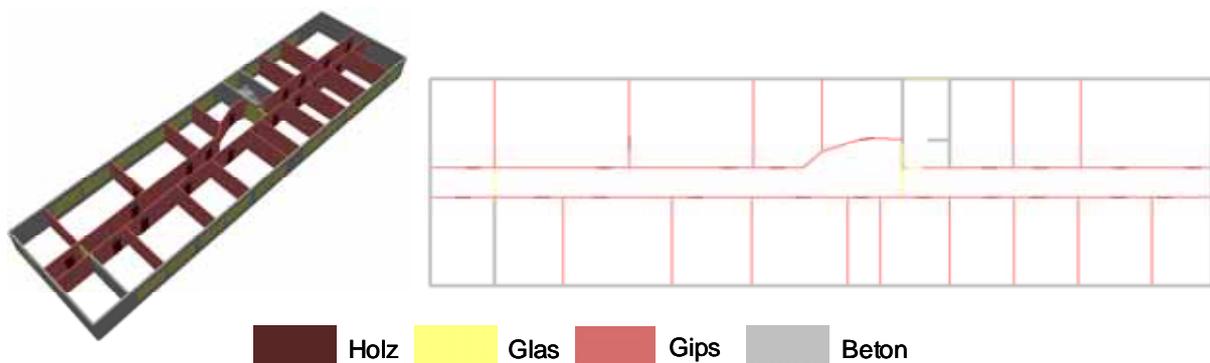


Bild 8.6: Typische Büroumgebung

Es wurde für jedes der drei betrachteten Systeme eine Simulation der Immissionsverteilung mit den in Tabelle 8.1 dargestellten Parametern durchgeführt. Die absoluten Feldstärkewerte sind im folgenden Bild vergleichend für alle drei Systeme dargestellt.

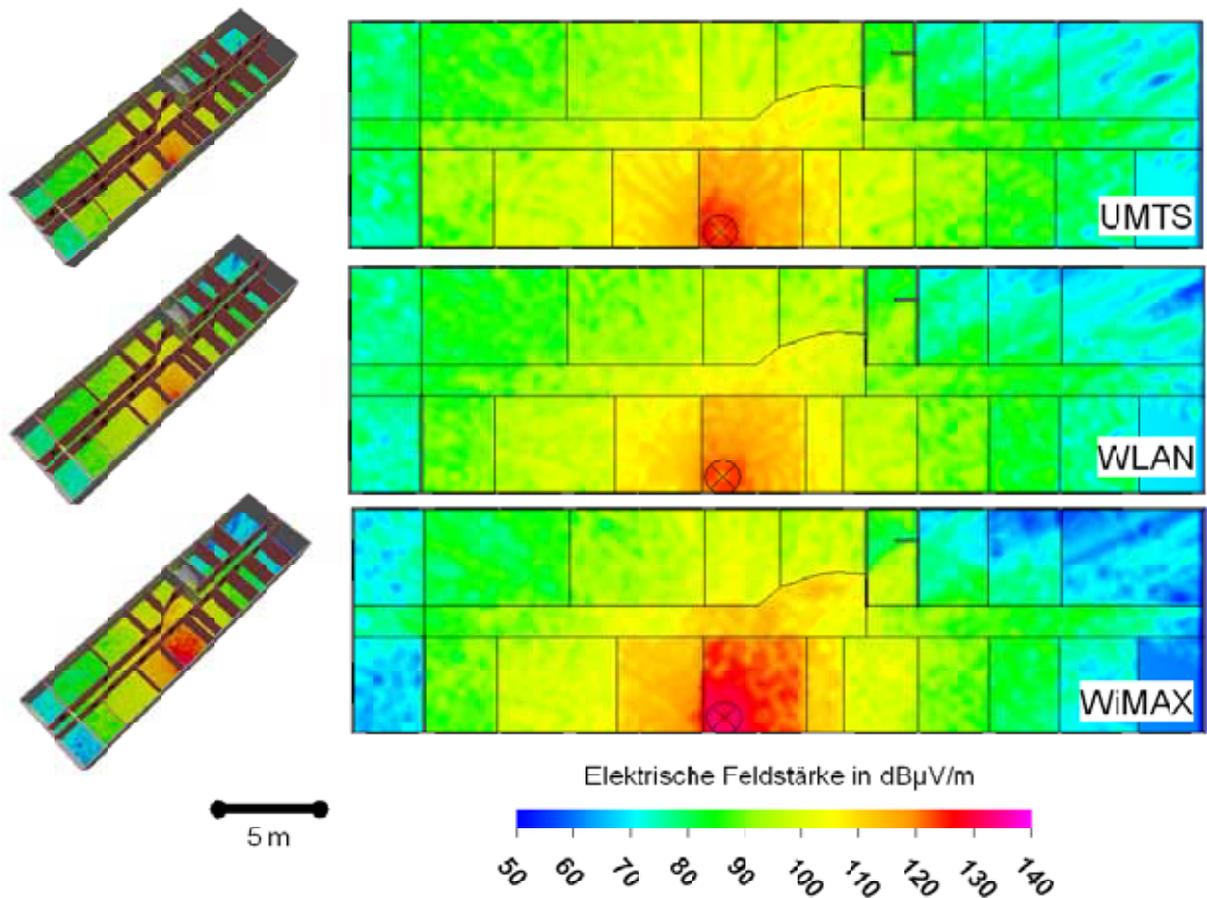


Bild 8.7: Immissionsverteilungen der drei Funkdienste in einer Büroumgebung

Wie schon beim vorangegangenen Szenario werden aus obigem Bild folgende Punkte deutlich:

- Die Immissionsverteilung von WLAN und UMTS ist vergleichsweise ähnlich und in der gleichen Größenordnung.
- Die Immission von WiMAX ist in der direkten Umgebung des Endgerätes größer, wird aber mit zunehmender Anzahl von Hindernissen aufgrund der frequenzbedingten höheren Dämpfung geringer als die der anderen Systeme. Dies wird bei WiMAX-Betrieb im 5,8 GHz Bereich aufgrund der noch höheren Frequenz vermutlich noch ausgeprägter sein.

Im folgenden Bild sind wie schon aus vorangegangenem Beispiel bekannt die Differenzen der Immissionen der unterschiedlichen Funkdienste dargestellt.

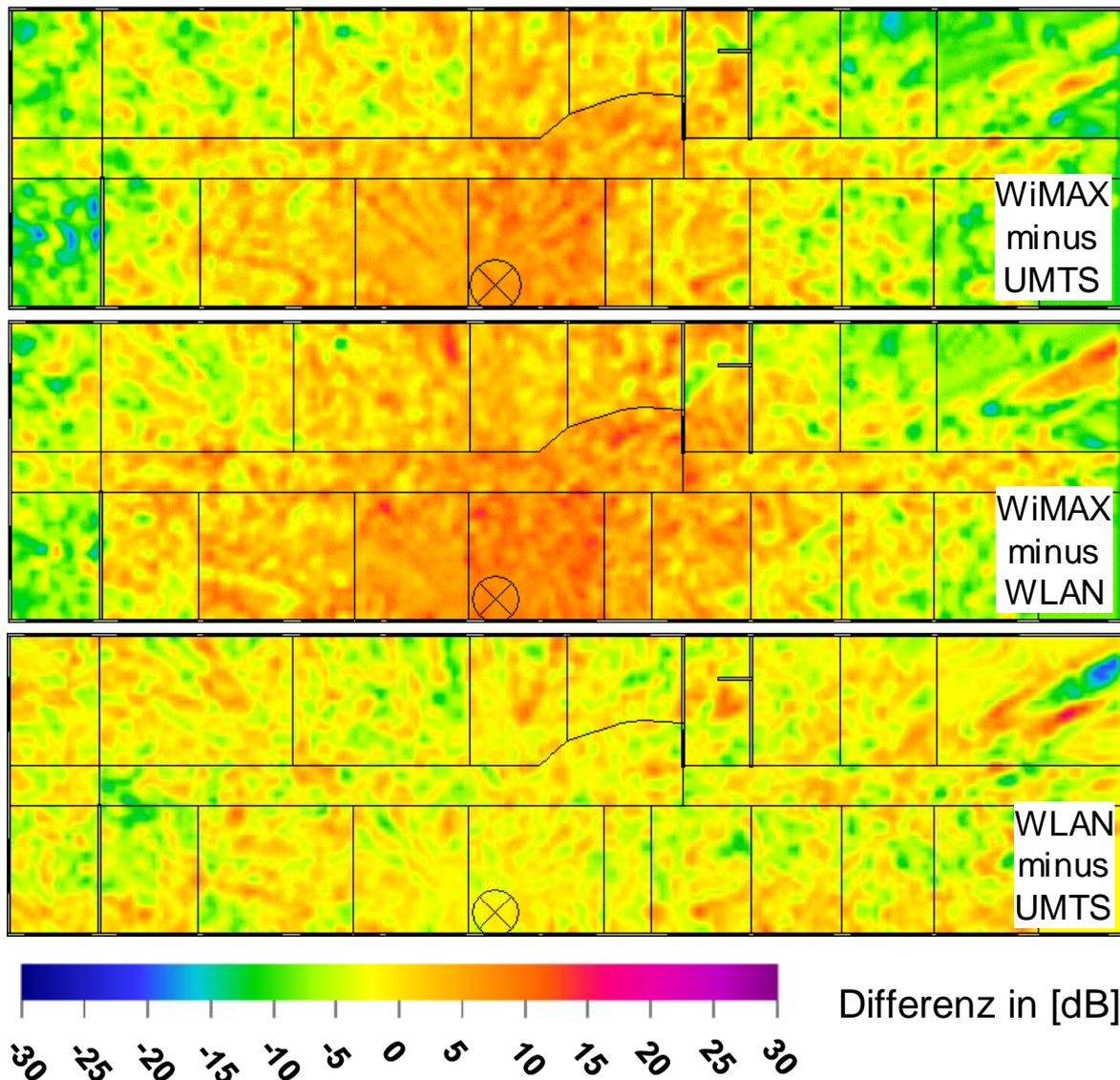


Bild 8.8: Differenz der Feldstärkewerte der einzelnen Funkdienste

Die Differenzen zwischen WiMAX und UMTS bzw. WLAN zeigen wiederum eine positive Differenz der Immissionswerte in der Umgebung des Endgerätes, was an der höheren Sendeleistung und dem höheren Antennengewinn im Vergleich zu den anderen Funkdiensten liegt. Im Gegensatz dazu wird die Differenz mit zunehmender Anzahl von Hindernissen aufgrund der frequenzabhängigen Dämpfung negativ.

Aus der Differenz zwischen WLAN- und UMTS-Immission wird auch wiederum verdeutlicht, dass die Immissionen in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

Nachfolgend wird der obige Immissionsvergleich wie schon im vorangegangenen Beispiel im Hinblick auf die Fragestellung untersucht, wie sich die Immission für den Endnutzer in Bezug auf die ihm zur Verfügung stehende Datenrate verhält. Hierzu werden die Berechnungsergebnisse aus Bild 8.7 mit der funkdienstabhängigen maximalen theoretischen Datenrate im Uplink (vgl. Tabelle 8.1) auf die resultierende Feldstärke für 1 MBit/s skaliert. Im Vergleich zu Bild 8.7 ist zu beachten, dass sich die Skala sowohl bezüglich der Einheit als auch der Absolutwerte geändert hat.

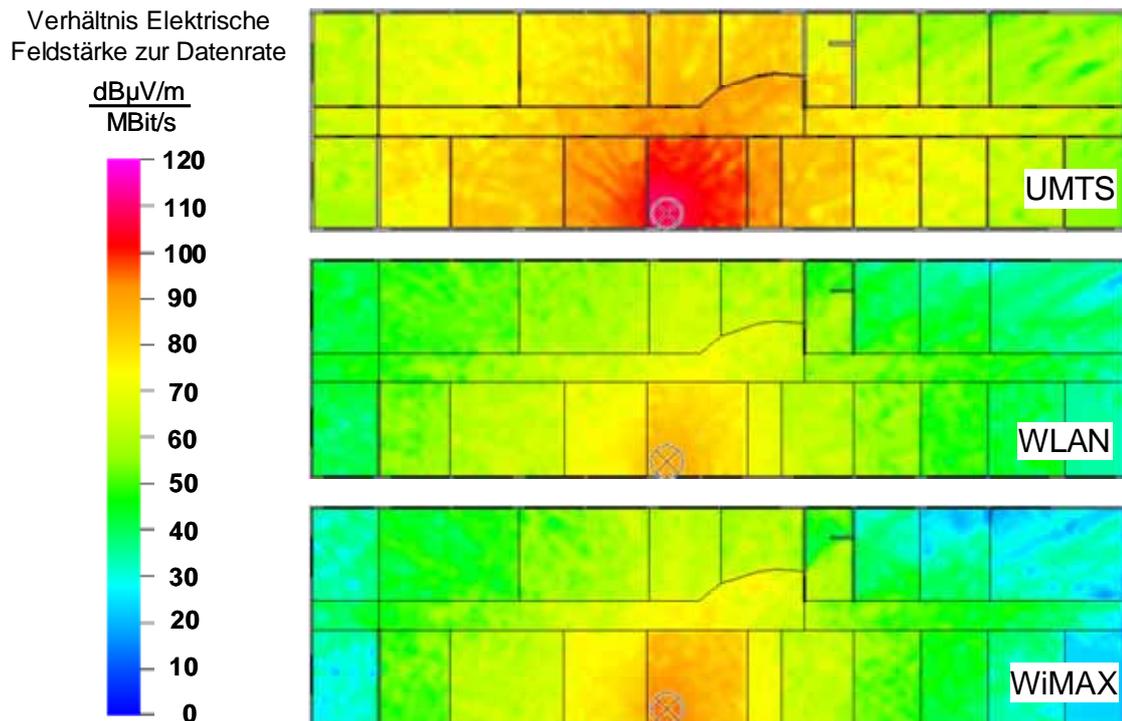


Bild 8.9: Elektrische Feldstärke skaliert auf eine Datenrate von 1 MBit/s im Uplink

Bild 8.9 zeigt ein ähnliches Verhalten wie schon beim vorangegangenen Beispiel:

- Die auf die maximal mögliche Datenrate normierte Immission ist bei UMTS deutlich höher als bei den beiden anderen Technologien. Grund hierfür ist die im Vergleich wesentlich kleinere zur Verfügung stehende Datenrate von UMTS.
- Die auf die maximal mögliche Datenrate normierte Immissionsverteilung von WLAN und WiMAX ist vergleichsweise ähnlich und liegt in der gleichen Größenordnung. Während die normierte Immission in der direkten Umgebung des Endgerätes von WiMAX etwas größer ist, kehrt sich dieser Sachverhalt mit zunehmender Anzahl von Wänden um und die normierte Immission von WLAN ist höher.

8.3 Fazit

Die vorangegangene qualitative Betrachtung der Immissionsverteilung von WLAN-, UMTS- und WiMAX-Endgeräten unter der theoretischen Annahme einer Vollauslastung hat gezeigt, dass die Immissionsverteilung von WLAN und UMTS vergleichbar ist und in der selben Größenordnung liegt. Demgegenüber ist die Immission durch das hier betrachtete WiMAX-Endgerät in dessen unmittelbarer Umgebung aufgrund der höheren Sendeleistung und höheren Antennengewinns größer, sie nimmt aber mit zunehmender Anzahl von Hindernis-

sen aufgrund der frequenzbedingten höheren Transmissionsdämpfung schneller ab als die der anderen Systeme.

Ein Vergleich der auf 1 MBit/s normierten Immission unter der Annahme der theoretisch maximal zur Verfügung stehenden Datenrate hat gezeigt, dass die Feldstärke in Bezug auf 1 MBit/s bei UMTS aufgrund der kleineren Maximaldatenrate deutlich größer ist als bei den beiden anderen Technologien. Die normierte Immissionsverteilung von WLAN und WiMAX ist dagegen vergleichsweise ähnlich und liegt in der gleichen Größenordnung. Während die normierte Immission in der direkten Umgebung des Endgerätes von WiMAX etwas größer ist, kehrt sich dieser Sachverhalt mit zunehmender Anzahl von Wänden um und die normierte Immission von WLAN ist höher.

Diese Ergebnisse sind jedoch im Hinblick auf die *individuelle Expositionssituation* nicht verallgemeinerbar, da aufgrund der Vielzahl von Endgerätetypen und in der Praxis vorstellbaren Szenarien folgende Vereinfachungen angenommen wurden.

- In die Betrachtungen in diesem Kapitel wurde der Mechanismus der Leistungsregelung nicht berücksichtigt. Dieser wird bei den oben betrachteten Standards nur bei UMTS und WiMAX verwendet und hat natürlich einen erheblichen Einfluss auf die individuelle Expositionssituation.
- Als vergleichbare Basis für den Immissionsvergleich in Bezug zur Verfügung stehender Datenrate wurden jeweils die *maximal möglichen* Datenraten im Uplink angenommen, die sich gerade bei WLAN und WiMAX von den *realen* Datenraten deutlich unterscheiden können. So werden diese z.B. durch Ausbreitungseigenschaften im Funkkanal oder durch die eingestellte Modulationsart stark beeinflusst.
- Wie schon die Immissionsmessungen aus Abschnitt 6.1 gezeigt haben, gibt es bei WiMAX große Immissionsvariationen durch die Vielzahl von Endgerätetypen. So wurde gezeigt, dass die Immissionen einer WiMAX Außeneinheit deutlich unterhalb derer von Indoor-Geräten liegen. Zudem führen auch unterschiedliche Gebrauchsabstände von Endgeräten (z.B. Tischgerät zu PCMCIA-Karte im Notebook) zu differierende individuellen Expositionen.

Insofern können sich in der Realität je nach Situation auch andere, von den oben gezeigten Beispielen abweichende Immissionsverhältnisse einstellen.

Danksagung

An dieser Stelle sei all jenen Personen und Organisationen gedankt, die einen Anteil am Gelingen des vorliegenden Projektes hatten.

Dank gilt vor allem

- dem Bundesamt für Strahlenschutz für die Finanzierung vorliegenden Vorhabens,
- Herrn Geschwentner vom Bundesamt für Strahlenschutz für die kompetente und konstruktiv kritische Betreuung des Projektes,
- der Firma Rohde & Schwarz für die freundliche leihweise Bereitstellung des WiMAX Communication Testers CMW270,
- den Firmen VSE NET (vor allem den Herren Schütz und Schönbeck) und IKS (Herrn Backes) für die Unterstützung von Messungen in ihrem Mobile WiMAX Netz sowie für die Bereitstellung der Zyxel-Endgeräte für Messungen,
- den Firmen DBD Deutsche Breitband Dienste, MVOX AG, Neckarcom und Alcatel-Lucent für die Beistellung von technischen Daten der Basisstationen zur Auswertung der Messungen und Durchführung der Berechnungen,
- der Firma FGEU GmbH für die kostenneutrale Bereitstellung der Software EFC-400,
- der Firma AWE-Communications für die kostengünstige Bereitstellung der Software Winprop und Wallman und den schnellen Software Support.

Literaturverzeichnis zu Teil III

- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.
- [99/519/EG] **1999/519/EG**, *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [BOCH 03] **U. Bochtler, R. Eidher, M. Wuschek**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg*, Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe, Abschlussbericht, Aschaffenburg/Stuttgart/Regensburg, (2003).
- [BOR 05] **Chr. Bornkessel und M. Schubert**, *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht *Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren*, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BOR 05-2] **Chr. Bornkessel, M. Wuschek**, *Immissionsmessungen an WLAN-Szenarien*, Studie im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V., Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BOR 06-2] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek, P. Schmidt**, *Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2006).
- [DMF 08] **Deutsches Mobilfunk-Forschungsprogramm;**
<http://www.emf-forschungsprogramm.de>
- [ICNIRP 98] **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).
- [KLE 06] **M. Klenk, R. Heidemann**, *Reichweiten- und Bandbreitentests mit WiMAX*, 20. DNF Jahrestagung (DNF2006), Kommunikations- und Informationszentrum, Universität Ulm, 2006
- [PREI 06] **P. Preiner, G. Schmid, D. Lager, R. Georg**, *Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von Wireless LAN-Einrichtungen (WLAN) in innerstädtischen Gebieten*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht ARC-IT-0179, ARC Seibersdorf research GmbH, Seibersdorf (2006).

- [SCH 06] **M. Schubert, Chr. Bornkessel, M. Wuschek und P. Schmidt**, *Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2006).
- [SCHM 05] **G. Schmid, D. Lager, P. Preiner, R. Überbacher, G. Neubauer, S. Cecil**, *Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht BMU-2005-669, ARC Seibersdorf research GmbH, Seibersdorf (2005).
- [SRTM] „<http://www.dlr.de/srtm>“ oder „<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm>“
- [WUS 04] **M. Wuschek, C. Bornkessel, D. Manteuffel, M. Schubert und P. Schmidt**, *Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen: Auf Messdaten und Simulationen basierende Optionen und Beispiele*, Abschlussbericht für das Bayerische Landesamt für Umweltschutz, Regensburg, (2004).
- [WUS 07] **M. Wuschek und C. Bornkessel**, *Hochfrequenz-Immissionen durch funkbasierte Breitbanddienste*, Studie erstellt im Rahmen der Breitbandinitiative Bayern im Auftrag des Bayerischen Industrie- und Handelskammertages und des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Regensburg, (2007).

Abkürzungsverzeichnis zu Teil III

| | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BS | Basisstation |
| DEM | Digital Elevation Model |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers (engl.) → weltweiter Berufsverband von Ingenieuren aus den Bereichen Elektrotechnik und Informatik |
| EIRP | Equivalent Isotropically Radiated Power (engl.) → Äquivalente isotrope Strahlungsleistung |
| FDD | Frequency Division Duplex (engl.) → Frequenzduplex |
| GSM | Global System for Mobile Communication (engl.) |
| LOS | Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung |
| NLOS | Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| TDD | Time Division Duplex (engl.) → Zeitduplex |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem |
| USGS | U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA |
| WLAN | Wireless Local Area Network (engl.) |

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole zu Teil III

| | |
|---|----------------------------------|
| f | Frequenz |
| E | Elektrische Feldstärke |
| S | elektrische Leistungsflussdichte |

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz