

Teilbericht II

Entwicklung geeigneter Verfahren

Kurzfassung

Im zweiten Teilbericht werden Mess- und Berechnungsverfahren zur Erhebung der real vorhandenen Immissionen elektromagnetischer Felder im Umfeld von WiMAX-Anlagen entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert.

Bezüglich *Expositionsmessungen an Basisstationen* können zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte die Methoden spektrale Messung, Erfassung im Zeitbereich und Kanalleistungsmessung eingesetzt werden, wenn die wesentlichen Einstellparameter am Spektrumanalysator geeignet gewählt sind. Der Hauptvorteil der spektralen Messung liegt in der Möglichkeit der gleichzeitigen Erfassung von mehr als einem Signal, während die Messung im Zeitbereich die genaueste Analyse des relativ komplizierten zeitlichen Signalverlaufs eines WiMAX-Signals ermöglicht, so dass die bestmögliche Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung erreichbar ist. Die Kanalleistungsmessung ist insbesondere dann von Vorteil, wenn das WiMAX-Signal eine Bandbreite besitzt, die deutlich größer ist, als die maximal einstellbare RBW des Analysators. Werden Punktrastermessungen durchgeführt, ergeben sich bei den drei Verfahren keine zusätzlichen Einschränkungen. Wird hingegen der räumliche Maximalwert der Felder mittels der Schwenkmethode gesucht, verliert die Zeitbereichsmessung einen Teil ihrer Vorteile, da sich durch die Anwendung der „Max-Hold“-Funktion im Analysator die einzelnen Frames beliebig überlagern, so dass der Zeitverlauf des Signals nicht mehr sauber aufgelöst werden kann und daher die Bestimmung der Leistung des Downlink-Subframe erschwert wird. Empfehlenswert ist es daher, immer vor der eigentlichen Expositionsmessung, im Rahmen einer Vorhermessung im Zeitbereich, die genaue Signalstruktur des WiMAX-Signals zu bestimmen.

Örtliche und zeitliche Durchschnittswerte können durch diskrete Messung an einzelnen Punkten oder permanente Messungen bei langsamer Bewegung der Messantenne mit anschließender Mittelwertbildung gewonnen werden. Hierfür ist aber im Gegensatz zur Grenzwertüberprüfung die Messung aller drei Raumkomponenten der Feldstärke (isotrope Messung) Voraussetzung. Messungen zeigen, dass verfügbare, aber nur bis 3 GHz spezifizierte Isotropantennen unter gewissen Einschränkungen auch noch für 3,5 GHz WiMAX, aber nicht mehr für 5 GHz WiMAX eingesetzt werden können.

Für Langzeitmessungen wurde ein neues Verfahren entwickelt, das auf der Verwendung einer extrem langen Sweepzeit basiert. Dieses Verfahren kann in Verbindung mit einer räumlichen Bewegung der Messantenne auch für die Erfassung von räumlichen und zeitlichen Durchschnittswerten eingesetzt werden.

Bei *Immissionsmessungen an Endgeräten* ist zwischen Feldmessungen und SAR-Messungen zu unterscheiden. Bei Feldmessungen (Abstände zum Endgerät größer als die Wellenlänge) sind prinzipiell alle Messverfahren für Basisstationen - d.h. spektrale Messung, Kanalleistungsmessung und Zeitbereichsmessung -, sowie breitbandige Verfahren einsetzbar. Ihre Anwendbarkeit unterscheidet sich jedoch bezüglich des verwendeten Duplex-Modus und ist darüber hinaus gerade bei TDD auch von der Frage abhängig, ob die Immission vom Endgerät oder von der Basisstation dominiert. SAR-Messungen werden bei körpernahen bzw. Körperkontakt-Anwendungen durchgeführt. Geeignete Phantome und gewebesimulierende Flüssigkeiten sind in Normen definiert. Sonden mit ausreichender Empfind-

lichkeit sowie Basisstationssimulatoren zur definierten Ansteuerung der Endgeräte sind herstellerseitig verfügbar.

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-Funksendeanlagen untersucht. Der Begriff „Umgebung“ umfasst hierbei den Bereich außerhalb des Sicherheitsabstandes der Basisstation bis zum Rand des Versorgungsgebietes der entsprechenden Anlage. Anhand eines Kataloges von praxisrelevanten Konfigurationen wurde die Eignung der jeweiligen Software untersucht.

Für die Eingabeparameter kann zusammenfassend festgehalten werden, dass für konventionelle Sendeantennen von Basisstationen eine Synthese der Abstrahlcharakteristik zur Kompensation der Abhängigkeit von Frequenz, Downtilt und Montageumgebung direkt aus [BOR 05] und [BOR 06] übernommen werden kann. Durch den Einsatz von adaptiven Antennen zum Beamforming können schmale (bezüglich Azimut und Elevation) Abstrahlbereiche erzeugt werden, mit denen die jeweilige Abstrahlung in zeitlicher Abfolge gezielt auf den jeweils aktiven Benutzer gerichtet werden kann. Für eine Expositionsberechnung, die nicht nur eine kurzfristige, momentane, sondern eine längerfristige Prognose liefern soll, scheint es sinnvoll, eine synthetisierte Antennencharakteristik als Umhüllende aller möglichen Zustände der adaptiven Antenne zu generieren. Darüber hinaus müssen die Gebäude und Geländedaten geeignet in einer Berechnung berücksichtigt werden.

Insgesamt zeigen die Vergleiche der Simulationsergebnisse (Maximalwerte in einer bestimmten Fläche) von den hier betrachteten Softwarepaketen keine gravierenden Unterschiede. Die Methode „Reine Freirauausbreitung + 3 dB“ liefert gerade in Situationen mit direkter Sicht zur Sendeantenne annähernd die gleichen Ergebnisse wie die anderen hier betrachteten Programme. Es hat sich aber auch gezeigt, dass in Situationen, in denen keine direkte Sicht zur Sendeantenne herrscht, die Berechnungsergebnisse der anderen Programme wesentlich kleiner sind als die mit Freiraumausbreitung berechneten und diese Methode für derartige Szenarien eher als weniger geeignet erscheint.

Bei der Immissionsberechnung von Engeräten in Indoor-Umgebungen hat sich gezeigt, dass Differenzen in den Simulationsergebnissen in Unterschieden der Materialbehandlung in den einzelnen Programmen begründet sein können, da zum Teil die Abhängigkeit der Dämpfung von der Einfallrichtung nicht berücksichtigt wird.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
1 Einleitung	6
2 Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei WiMAX-Sendeanlagen	7
2.1 Grundsätzliche Aspekte	7
2.1.1 Messverfahren	7
2.1.1.1 Breitbandige Messungen.....	7
2.1.1.2 Spektrale Messungen.....	7
2.1.1.3 Codeselektive Messungen	12
2.1.2 Charakterisierung der Immissionsverteilung	12
2.2 Messungen an Basisstationen.....	14
2.2.1 Messungen zur Überprüfung der Grenzwerte	14
2.2.1.1 Korrekte Einstellparameter am Spektrumanalysator	15
2.2.1.2 Messunsicherheit	30
2.2.1.3 Empfindlichkeit und Nachweisgrenzen.....	34
2.2.1.4 Reproduzierbarkeit	36
2.2.2 Örtlich und zeitlich gemittelte Durchschnittswerte.....	37
2.2.2.1 Beschreibung des Messverfahrens	37
2.2.2.2 Untersuchungen zur Isotropie	39
2.2.3 Langzeitmessungen	46
2.3 Messungen an Endgeräten	48
2.3.1 Feldmessungen	48
2.3.2 SAR-Messungen	52
2.3.2.1 Prinzipielles Messverfahren	52
2.3.2.2 Anwendung der SAR-Messungen auf WiMAX-Endgeräte	54
2.4 Mehrantennentechniken.....	55
2.4.1 Space Time Coding (STC).....	55
2.4.2 Spatial Multiplexing.....	56
2.4.3 Adaptive Antennensysteme	56
3 Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei WiMAX	59
3.1 Grundsätzliche Aspekte	59
3.2 Eingabeparameter.....	61

3.2.1	<i>Abstrahlcharakteristik der „konventionellen“ Sendeantenne</i>	62
3.2.2	<i>Geländedaten</i>	64
3.2.3	<i>Gebäudedaten</i>	65
3.2.4	<i>Materialdaten</i>	65
3.3	<i>Adaptive Antennen zum Beamforming.....</i>	67
3.4	<i>Simulationen</i>	71
3.4.1	<i>Konfiguration 1: Stadtgebiet</i>	73
3.4.2	<i>Konfiguration 2: Ländliches Gebiet</i>	77
3.4.3	<i>Konfiguration 3: Indoor-Berechnung</i>	81
3.4.4	<i>Konfiguration 4: Endgerät</i>	85
3.5	<i>Fazit</i>	92
	Literaturverzeichnis zu Teil II	93
	Abkürzungsverzeichnis zu Teil II	95
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole zu Teil II.....	96

1 Einleitung

Im zweiten Berichtsteil vorliegenden Untersuchungsvorhabens werden Mess- und Berechnungsverfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert, die im dritten Teil zur Erhebung der real vorhandenen Immissionen elektromagnetischer Felder im Umfeld von WiMAX-Anlagen eingesetzt werden.

Bezüglich *Messverfahren* konzentrieren sich die Arbeiten auf die Anpassung bestehender Messverfahren auf die Besonderheiten von WiMAX-Anwendungen. Dabei werden in einem ersten Schritt frequenzselektive Messverfahren bezüglich der korrekten Geräteeinstellungen (insbesondere Auflösebandbreite, Videobandbreite, Detektor, Sweeptime usw.) auf die spezifische Signalstruktur von WiMAX adaptiert. Darüber hinaus wird untersucht, ob eventuell die Analyse der Signale im Zeitbereich (Zero-Span) ähnlich wie bei WLAN-Immissionsmessungen Vorteile bei der hochfrequenztechnisch korrekten Erfassung von WiMAX-Immissionen erbringt. Von besonderem Interesse ist dabei die laut 26. BImSchV geforderte Erfassung der Exposition bei maximaler Anlagenauslastung, da bei WiMAX sowohl basisstationsseitig, als auch endgeräteseitig Leistungsregelmechanismen vorgesehen sind. Die Entwicklung eines geeigneten Verfahren für eine exakte Extrapolation der Ergebnisse von Momentanmessungen auf den Zustand bei maximaler Anlagenauslastung ist von zentraler Bedeutung für vorliegenden Bericht, da unserer Kenntnis nach in diesem Bereich noch keine anderen Untersuchungen existieren. Weitere Fragestellungen betreffen die Isotropie von Sonden oberhalb von 3 GHz, den Einsatz basisstationsseitiger Multi-Antennen-Techniken sowie die Ausdehnung der Immissionserfassung auf den Bereich der Endgeräte.

Bezüglich *Berechnungsverfahren* werden die Untersuchungen auf kommerziell verfügbare Softwarepakete, die mit strahlenoptischen Verfahren ggf. unter Hinzuziehung von empirischen Näherungen arbeiten, konzentriert. Anhand von praxisrelevanten Konfigurationen werden die einzelnen Softwarepakete auf ihre Eignung hin untersucht. Das Einsatzgebiet soll nicht nur das direkte Umfeld einer WiMAX-Station, sondern deren gesamtes Versorgungsgebiet abdecken. Hierfür bereits in Vorläuferaktivitäten erarbeitete Möglichkeiten zur Einbeziehung von Gelände- und Gebäudedaten werden auf den speziellen Fall von WiMAX geprüft und ggf. angepasst. Zusätzlich zur Betrachtung der Basisstation wird die Anwendbarkeit der Programme auch für Konfigurationen untersucht, bei denen die Exposition durch das Endgerät im Vordergrund steht. Mittels dieser Simulationen wird die Exposition speziell in Indoor-Umgebungen analysiert. Als generische Szenarien werden hier typische Haushalts- und Büroumgebungen betrachtet. Die Betrachtung erstreckt sich auch auf Nachbarwohnungen im selben Gebäude (über bzw. unter sowie neben der Wohnung mit Endgerät).

2 Messverfahren zur Expositionsbestimmung bei WiMAX-Sendeanlagen

2.1 Grundsätzliche Aspekte

2.1.1 Messverfahren

Zur Bestimmung der Exposition durch hochfrequente Felder von Funk-Sendeanlagen existieren mehrere Verfahren, die völlig unterschiedliche Messprinzipien verwenden, was dazu führt, dass die dafür geeigneten Messgeräte sich bezüglich Funktionsweise, Leistungsfähigkeit und Preis sehr stark unterscheiden. Die Verfahren lassen sich wie folgt untergliedern:

- Breitbandige Messverfahren,
- frequenzselektive (spektrale) Messverfahren und
- codeselektive Messverfahren

2.1.1.1 Breitbandige Messungen

Breitbandige Verfahren ermitteln einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches, wobei nicht zugeordnet werden kann, wie sich die Immissionsanteile frequenzmäßig und damit auch emittentenbezogen aufteilen. Dadurch wird bei Vorhandensein mehrerer Signale in verschiedenen Frequenzbereichen die Bewertung mit den zugehörigen (teilweise frequenzabhängigen) Grenzwerten erschwert oder sogar unmöglich. Beispielsweise ist es in der Umgebung eines Standortes, an dem neben WiMAX-Signalen auch GSM- und UMTS-Funkdienste abgestrahlt werden, mittels einer Breitbandmessung nicht möglich zu unterscheiden, welchen prozentualen Anteil an der Gesamtexposition durch die WiMAX-Signale generiert werden. Außerdem ist die Empfindlichkeit breitbandiger Messgeräte üblicherweise auf etwa 0,2 bis 0,6 V/m begrenzt, so dass sie im Regelfall nur in unmittelbarer Antennennähe vernünftig verwendet werden können. Damit beschränkt sich das Haupteinsatzgebiet von breitbandigen Messungen an Basisstationen auf den Bereich Arbeitsschutz sowie für Übersichtsmessungen zur Vorselektion von Raumbereichen, an denen eine Detailmessung mit einem anderen Verfahren durchgeführt wird.

Breitband-Messgeräte bestehen in der Regel aus einer Anzeigeeinheit mit interner oder externer Feldsonde (Bild 2.1 links, NBM 550 der Firma Narda Safety Test Solutions).

2.1.1.2 Spektrale Messungen

Spektrale bzw. frequenzselektive Verfahren weisen gegenüber breitbandigen Verfahren eine wesentlich größere Empfindlichkeit auf. So ist beispielsweise in [BOR 06-2] für die Expositionsmessung im Umfeld von UMTS-Sendeanlagen bei Verwendung eines modernen Spektrumanalysators in Verbindung mit einer logarithmisch-periodischen Antenne eine maximal erzielbare Empfindlichkeit von etwa 0,0005 V/m ermittelt worden. Die Empfindlichkeit bei WiMAX-Messungen wird in Abschnitt 2.2.1.3 untersucht. Außerdem wird bei frequenzselekti-

ven Messungen die Frequenzinformation der Immission zur Verfügung gestellt, so dass in vielen Fällen eine Zuordnung zur Quelle der Immission möglich ist.

Frequenzselektive Messungen erfolgen mit Spektrumanalysatoren bzw. Messempfängern in Verbindung mit geeigneten Antennen. Als Beispiel ist in Bild 2.1 rechts der Messempfänger ESPI-3 der Firma Rohde & Schwarz dargestellt.

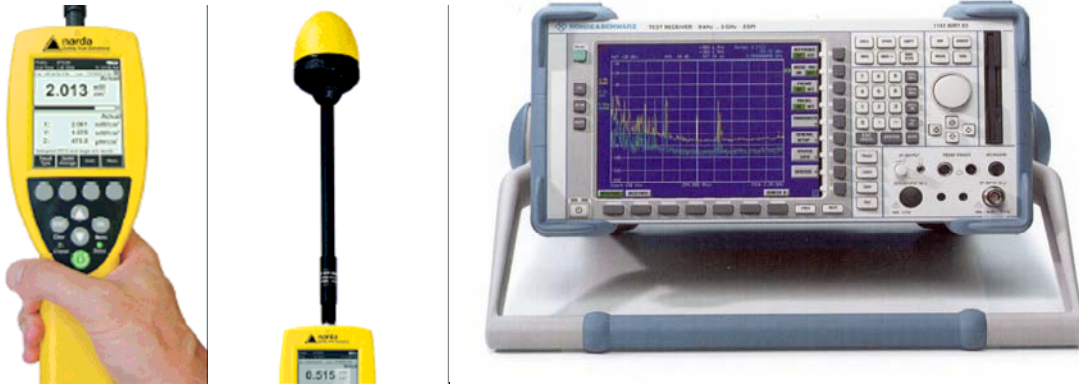


Bild 2.1: Beispiele für breitbandige (links) bzw. frequenzselektive (rechts) Messgeräte.
Quelle: www.narda-sts.de (links), www.rohde-schwarz.de (rechts)

Frequenzselektive Messungen sind aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile das prioritär verwendete Messverfahren in der elektromagnetischen Immissionsmesstechnik. Innerhalb zahlreicher Projekte des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms wurde ihre Eignung zur Messung der Exposition von z.B. GSM und UMTS [BOR 06-2], analogem und digitalem Hör- und Fernsehgrundfunk [BOR 06], sowie WLAN [SCHM 05] untersucht und nachgewiesen. Dabei hat sich unter anderem herausgestellt, dass die gewählten Einstellparameter am Messempfänger bzw. Spektrumanalysator einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis ausüben. Da zur Informationsübertragung moderner Funkanwendungen immer modulierte Signale verwendet werden müssen, die je nach gewähltem Verfahren sehr unterschiedliche Eigenschaften (z.B. Bandbreite, Crestfaktor) besitzen, ist es notwendig, die Einstellparameter am Spektrumanalysator passend zu wählen, um auch wirklich als Ergebnis den Effektivwert der Feldstärke zu erhalten. Dies gilt insbesondere bei modernen digitalen Übertragungsverfahren. Bezüglich der korrekten Geräteeinstellung für die Messung von WiMAX-Signalen sind also eingehende Untersuchungen notwendig, die im Abschnitt 2.2 erfolgen.

Im folgenden werden zunächst die wichtigsten Einstellparameter am Spektrumanalysator vorgestellt, die einen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Betrachtet werden dabei ausschließlich moderne Analysatortypen mit digitaler Signalverarbeitung ab der Videoebene. Ältere, rein analoge Spektrumanalysatoren sind für die Erfassung digital modulierter, breitbandiger Signale in der Regel nur eingeschränkt brauchbar. Für ein tiefer gehendes Studium des Aufbaus und der Eigenschaften moderner Spektrumanalysatoren sei an dieser Stelle auf [RAU 00] verwiesen.

Auflösebandbreite („Resolution Bandwidth“ RBW)

Dieser Parameter legt die 3-dB-Bandbreite des Zwischenfrequenzfilters fest, mit der die Signale im Analysator gemessen werden. Die RBW muss immer mindestens so groß sein wie die Bandbreite des zu messenden Signals (typische Bandbreiten bei WiMAX zwischen 1,5 und 20 MHz). Ansonsten kommt es zu einem Pegelverlust in der Anzeige, also zu einer Unterbewertung der Immission, da nicht die gesamte Signalenergie das Filter passiert. Wird mit einer zu großen RBW gemessen, kann es vorkommen, dass eventuell vorhandene Nachbarkanäle mit in das Messergebnis einbezogen werden, so dass ein zu großer Wert angezeigt wird. Grundsätzlich sollte also die RBW mindestens so groß wie die Signalbandbreite, aber auch nicht wesentlich größer gewählt werden. Bei einigen Spektrumanalysatoren steht kein ausreichend breites ZF-Filter zur Verfügung, um breitbandige Signale wie UMTS, DVB oder WiMAX korrekt zu erfassen. Hier besteht gegebenenfalls die Möglichkeit, einen geeigneten Korrekturfaktor zu definieren, der den Pegelverlust aufgrund der zu geringen Bandbreite kompensiert.

Videobandbreite („Video Bandwidth“ VBW)

Das Videofilter befindet sich hinter dem Gleichrichter und hat den Zweck, aus dem gleichgerichteten Zwischenfrequenzsignal des Analysators die „Signaleinhüllende“ zu extrahieren. Auch die Bandbreite des Videofilters (VBW) sollte nicht kleiner als die RBW gewählt werden, da es sonst ebenfalls zu einem Pegelverlust in der Anzeige kommt. Bei Verwendung des RMS-Detektors muss die VBW sogar deutlich größer als die RBW gewählt werden, damit keine zusätzliche Mittelwertbildung durch das Videofilter entsteht, was die Bestimmung des RMS-Wertes verfälschen würde. Bei vielen modernen Analysatoren kann die VBW an die gewählte RBW bzw. den gewählten Detektor gekoppelt werden, so dass eine diesbezügliche Fehlbedienung von vornherein vermieden wird.

Sweeptime (SWT) und dargestellter Frequenzbereich (Span)

Im Regelfall wird man bei Expositionsmessungen bestrebt sein, einen möglichst großen Frequenzbereich darzustellen, um beispielsweise gleich alle vorhandenen WiMAX-Signale zu erfassen und die vorhandenen Feldstärkewerte am Analysator ablesen zu können. Aufgrund der begrenzten Auflösung des Analysators sind diesem Wunsch jedoch Grenzen gesetzt. Abhängig von der Zahl der vorhandenen Pixel auf der Frequenzachse (typischer Wert: zwischen 300 und 500 je nach Modell), ergibt sich ein maximal sinnvoll darstellbarer Frequenzbereich, bei dem die einzelnen Funksignale noch vernünftig aufgelöst werden können. Als Faustregel sollte der Quotient aus Span und eingestellter RBW kleiner als die horizontale Pixelanzahl des Analysators sein [RAU 00]. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei einem Spektrumanalysator mit 500 Pixel bei einer RBW von 1 MHz ein Frequenzbereich von maximal 500 MHz sinnvoll dargestellt werden kann.

Gleichzeitig wird meist eine kleine Sweeptime gewünscht, um eine möglichst große Messrate zu erzielen (damit beispielsweise bei Anwendung der „Schwenkmethode“ und „normaler“ Geschwindigkeit des Abtastvorgangs mit der handgeführten Antenne ausreichend viele Messungen im untersuchten Volumen durchgeführt werden). Allerdings besteht ein Zusam-

menhang zwischen Sweeptime, RBW und Span: Wird bei kleiner RBW und/oder großem Span eine zu kleine Sweeptime gewählt, wird der eingestellte Frequenzbereich mit so hoher Geschwindigkeit durchfahren, dass das ZF-Filter nicht mehr ausreichend Zeit hat, vollständig einzuschwingen (die Einschwingzeit eines Filters ist umgekehrt proportional zu seiner Bandbreite), wodurch sich ein Amplitudenverlust in der Anzeige, sowie meist auch noch ein Fehler bei der Frequenzmessung einstellt. Ungeeignete Kombinationen zwischen RBW, Sweeptime und Span werden von modernen Analysatoren in der Regel automatisch erkannt und durch einen Warnhinweis (z.B. die Meldung „uncal“ auf dem Bildschirm) angezeigt.

Eine zu kleine Sweeptime hat zusätzlich noch einen negativen Einfluss auf den RMS-Detektor. Dieser Einfluss wird bei den derzeit am Markt befindlichen Geräten nach unserer Erfahrung jedoch nicht automatisch vom Gerät signalisiert. Näheres dazu ist im Abschnitt „Detektortyp“ beschrieben.

Eingangsdämpfung (Input Attenuation), Referenzpegel (Ref Lvl)

Grundsätzlich sollte der Referenzpegel so gewählt werden, dass das zu messende Signal den vertikalen Darstellungsbereich des Analysators gut ausnützt, um eine möglichst optimale Ablesbarkeit und Messdynamik sicherzustellen. Mittels der Eingangsdämpfung ist es möglich, starke Signale so weit abzuschwächen, dass es nicht zu Übersteuerungen des Eingangsmischers kommt. Zur Messung besonders schwacher Signale ist es prinzipiell möglich, eine Eingangsdämpfung von 0 dB einzustellen. Hierbei sei allerdings angemerkt, dass es in diesem Fall, insbesondere bei der Verwendung kleiner bikonischer Antennen, durch Fehlanpassungen zu einer Zunahme der Messunsicherheit kommen kann [BOR 06-2].

Detektortyp

Moderne Spektrumanalysatoren stellen dem Nutzer eine Vielzahl verschiedener Detektortypen zur Verfügung. Für die Messung der Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder sind insbesondere die folgenden beiden von Bedeutung:

- Der „Peak-Detektor“ (Spitzenwertdetektor, „Max-Peak-Detektor“) und
- der „RMS-Detektor“ (Effektivwertdetektor; RMS = Root Mean Square)

Mit dem Peak-Detektor, der in allen gängigen Analysatormodellen realisiert ist, ist es möglich bei Signalen mit zeitlich schwankender Hüllkurve den größten Wert der Momentanleistung eines Signals festzustellen. Der RMS-Detektor hingegen ist in der Lage, bei einem zeitlich schwankenden Signal die mittlere Leistung (bzw. den Effektivwert) zu ermitteln. Immer mehr moderne Analysatoren bieten inzwischen auch diesen RMS-Detektor an. Ist die Zuverlässigkeit des Peak-Detektors im Regelfall kein Problem, so sind bei einer Aktivierung des RMS-Detektors einige Randbedingungen zu beachten, um wirklich den Effektivwert eines Signals zu ermitteln. Dazu muss man zunächst verstehen, wie ein RMS-Detektor arbeitet. Im folgenden ist nur eine relativ kurze Funktionsbeschreibung wiedergegeben, erschöpfende Detailinformationen finden sich in [RAU 00]:

Aus der im Display vorhandenen horizontalen Pixelanzahl und der aktuell eingestellten Sweepzeit ergibt sich während des Sweeps eine bestimmte Verweilzeit pro Pixel. Während dieser Verweilzeit nimmt der A/D-Wandler im Spektrumanalysator eine Anzahl an Abtastwerten („Samples“), die um so größer ist, je höher die Abtastfrequenz des Wandlers bzw. die Verweilzeit pro Pixel ist. Bei einem Analysator mit beispielsweise 500 Pixeln auf der horizontalen Achse, einer Abtastfrequenz von 32 MHz (typischer Wert für aktuelle Geräte) und einer Sweepzeit von 100 ms ergeben sich 6.400 Samples pro Pixel.

Ist der Peak-Detektor eingestellt, wird aus diesen 6.400 Abtastwerten der größte ausgewählt und für die Vertikaldarstellung am Bildschirm herangezogen. Ist jedoch der RMS-Detektor aktiviert, so wird in einem schnellen Signalprozessor der quadratische Mittelwert aus allen 6.400 Samples gebildet und dieses Resultat zur Anzeige gebracht.

Die RMS-Bestimmung wird also nicht in einer analogen Schaltung durchgeführt, sondern sie ist das Ergebnis eines Rechenprozesses. Um verlässliche RMS-Werte zu erhalten, muss die Zahl der Samples, aus denen der RMS-Wert berechnet wird, ausreichend groß sein. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine zu kleine Sweepzeit eine zu kurze Signalverweilzeit pro Pixel und damit eine zu geringe Anzahl an Abtastwerten verursachen kann, so dass sich gegebenenfalls ein ungenauer RMS-Wert einstellt. Das gleiche kann auftreten, wenn die Abtastfrequenz des Analysators zu niedrig ist.

Es muss daher bei Verwendung eines RMS-Detektors auf jeden Fall immer geprüft werden, ob die gewählten Einstellparameter (insbesondere die Sweepzeit) zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

Betriebsart „Kanalleistungsmessung“

Moderne Spektrumanalysatoren bieten neben der üblichen frequenzselektiven Messung von Signalleistungen auch die Möglichkeit an, die gesamte in einem definierten Frequenzbereich vorhandene Leistung durch Integration der Messergebnisse eines durchlaufenden schmalbandigen ZF-Filters zu ermitteln. Dieses Verfahren wird „Kanalleistungsmessung“ (engl. „Channel Power Measurement“) genannt und ermöglicht beispielsweise die Bestimmung der Leistung breitbandiger Signale (wie beispielsweise DVB, UMTS oder WiMAX) auch mit Analysatoren, die kein ausreichend breites ZF-Filter besitzen. Dadurch wird im spektralen Mode eine Leistungsmessung ohne Verwendung von Bandbreiten-Korrekturfaktoren ermöglicht. Es ist zu prüfen, ob dieses Verfahren ebenso wie die spektrale Messung eingesetzt werden kann.

Seit einigen Jahren sind z.B. von den Firmen Narda Safety Test Solutions oder Rohde & Schwarz frequenzselektive Messgeräte in Verbindung mit isotropen Messantennen verfügbar. Die Frequenzbereiche der Sonden erstrecken sich allerdings derzeit nur bis zu 3 GHz und sind deswegen für WiMAX-Immissionsmessungen nicht ohne weiteres einsetzbar. Innerhalb vorliegenden Projektes wird geprüft, mit welchen Einbußen an der Isotropie zu rechnen ist, wenn die Sonden auch für Messungen oberhalb von 3 GHz verwendet werden.

2.1.1.3 Codeselektive Messungen

Die *codeselektive* Messtechnik ist in der Expositionsmesstechnik vergleichsweise neu. Sie ist bislang nur für Messungen an UMTS-Basisstationen eingesetzt worden [BOR 06-2] und ermöglichte dabei als einziges Verfahren eine zuverlässigen Bestimmung der Exposition bei maximaler Anlagenauslastung unabhängig von der jeweiligen Verkehrsauslastung. Durch die Tatsache, dass bei UMTS alle Basisstationen eines Betreibers auf derselben Frequenz senden und darüber hinaus aufgrund des Code-Multiplexverfahrens die Immission des mit konstanter Leistung gesendeten Pilotkanals nicht im Frequenzbereich extrahierbar ist, war eine Verlagerung der Immissionsmessung aus dem Frequenzbereich in den Codebereich notwendig.

Aufgrund der bei WiMAX verwendeten Zugriffstechniken TDMA bzw. OFDMA spielen code-selektive Verfahren bei WiMAX keine Rolle.

2.1.2 Charakterisierung der Immissionsverteilung

Aus der Erfahrung diverser Vorgängerprojekte z.B. zu GSM, UMTS, WLAN oder Rundfunk ([BOR 06, BOR 06-2, SCHM 05]) ist bekannt, dass die Immissionsverteilung im Hochfrequenzbereich am Immissionsort

- zeitlichen Schwankungen und
- örtlichen Schwankungen unterworfen ist.

Die zeitlichen Schwankungen resultieren dabei aus einer zeitlichen Änderung des Ausbreitungskanals vom Sender zum Immissionsort (z.B. durch fahrende Autos o.ä.) sowie, wie z.B. im Falle von GSM- und UMTS-Basisstationen, aus einer zeitlichen Änderung der Sendeleistung durch die aktive Sendeleistungsregelung. Dies führt dazu, dass das Ausgangssignal an einer Messantenne als Maß für die Immission zeitlich nicht konstant ist. Auch bei WiMAX-Basisstationen ist eine aktive Leistungsregelung integriert.

Zu diesen zeitlichen Schwankungen kommen örtliche kleinskalige Schwankungen durch Mehrwegeausbreitungseffekte („fast fading“) hinzu. Es kann also bei Verschiebung der Messantenne um einige Zentimeter ein gänzlich anderer Messwert resultieren (bei GSM und UMTS wurden kleinskalige Änderungen bis zu 20 dB nachgewiesen).

Die zeitlichen und örtlichen Schwankungen haben Konsequenzen auf das einzusetzende Messverfahren. Das bedeutet, dass je nach Aufgabenstellung (z.B. maximale Exposition oder durchschnittliche Exposition) unterschiedliche Erfassungsmethoden eingesetzt werden müssen. Oder anders ausgedrückt werden unterschiedliche Erfassungsmethoden in ein und derselben Feldumgebung in der Regel auch zu unterschiedlichen Messergebnissen führen.

Messverfahren zur Überprüfung der Grenzwerte

Bei diesem Messverfahren ist das örtliche und zeitliche Maximum der Immission zu ermitteln. Das bedeutet, dass Techniken einzusetzen sind, welche die gemessene Immission zeitlich und örtlich maximieren.

Für die zeitliche Maximierung bedeutet dies, das z.B. durch Messung von zeitlich konstanten Signalisierungskanälen unter Ausnutzung eines Zusammenhanges zwischen der Sendeleistung der Signalisierungskanäle und der maximal möglichen Anlagensendeleistung auf die Immission bei maximalem Betriebszustand der Sendeanlage extrapoliert werden kann. Bei GSM- und UMTS-Mobilfunk-Basisstationen hat sich hierbei die Messung des BCCH- bzw. PCPICH Kanals als geeignete Methode erwiesen. Für WiMAX-Basisstationen werden in vorliegendem Bericht geeignete Methodiken entwickelt.

Bezüglich der örtlichen Maximierung wird ein spezielles Verfahren der Bewegung der Messantenne durch das zu untersuchende Messvolumen bei aktivierter „Max-Hold“ Funktion des Messgerätes eingesetzt. Hierfür existieren mit der Schwenkmethode, der Drehmethode und der Punktrastermethode drei mögliche Ansätze, von denen die Schwenkmethode bei gleicher Genauigkeit am effektivsten arbeitet und aus diesem Grund beispielsweise in den Schweizer Messempfehlungen für die Immissionsmessung an GSM- und UMTS-Basisstationen als Referenzmethode festgeschrieben ist. Bei der Schwenkmethode sollten vorrangig Richtantennen eingesetzt werden, da diese sich durch eine sehr geringe Rückwirkung der Messperson auf das Messergebnis auszeichnen. Die Schwenkmethode zur örtlichen Maximierung kann zur Messung bei WiMAX-Basisstationen direkt übernommen werden.

Örtlich und zeitlich gemittelte Durchschnittswerte

Beispielsweise im Rahmen von epidemiologischen Untersuchungen kann es sinnvoll sein, nicht die „theoretisch mögliche maximale Immission“, sondern eine real vorhandene „durchschnittliche Immission“ anzugeben, die z.B. im Schlafzimmer oder auf dem Bett-/ Kopfkissenbereich (für epidemiologische Schlafstudien) vorliegt. Da, wie oben beschrieben, die Immission örtlich und zeitlich variiert, ist hier die Messung der Felder an einem fixen Ort zu einem festen Zeitpunkt nicht hinreichend, sondern es müssen geeignete örtliche und zeitliche Mittelungstechniken eingesetzt werden. Hierfür können z.B. Punktrastermethoden oder ein z.B. in [BOR 06-2] verwendetes langsames, gleichmäßiges Abscannen des Messvolumens mit einer Antenne bei gleichzeitiger *kontinuierlicher* Messwertabspeicherung eingesetzt werden. Die an den Rasterpunkten diskret bzw. beim Abscannen kontinuierlich aufgenommenen Messwerte sind nachher leistungsmäßig zu mitteln. Die Mittelung ist selbstverständlich direkt auf Basis der abgespeicherten Istwerte, und nicht etwa mit den auf maximale Auslastung extrapolierten Werten durchzuführen. Außerdem ist die Mittelung leistungsbezogen durchzuführen, d.h. Leistungsflussdichtewerte sind linear, Feldstärkewerte hingegen quadratisch zu mitteln. Vor der Mittelung sind die von einem Spektrumanalysator in der Regel logarithmisch angezeigten Pegelwerte in lineare Größen umzurechnen (Entlogarithmierung).

Bei dieser Art der Messungen müssen isotrope Antennen eingesetzt werden. Lediglich bei der Punktrastermethode kann die Messung auch durch manuelle Positionierung einer dipolartigen Antenne am Messpunkt in drei orthogonalen Raumrichtungen erfolgen. Diese Methode ist aber extrem aufwändig, zeitintensiv und fehlerträchtig und somit für Vorortmessungen nicht praktikabel. In Abschnitt 2.2.2.2 wird untersucht, wie sich die Isotropie derzeit verfügbarer Isotropsonden in den WiMAX-Frequenzbereichen verhält.

Langzeitmessungen

Langzeitmessungen werden üblicherweise bei feststehender Messantenne, d.h. an einem fixen Ort, durchgeführt. Durch kontinuierliche Messwertaufnahme wird der zeitliche Verlauf der Immission aufgezeichnet. Obwohl diese Art der Messung aufgrund der örtlichen Immissionsvariation nur für den konkreten Messpunkt, aber nicht für das umgebende Messvolumen repräsentativ ist, können solche Langzeitmessungen jedoch interessant sein, um Erkenntnisse über das generelle zeitliche Verhalten der Immission zu gewinnen. Hierdurch können beispielsweise zeitliche Charakteristika detailliert untersucht werden, die aus der sendeseitigen Leistungsregelung resultieren.

Im Idealfall sind für Langzeitmessungen isotrope Antennen zu verwenden. Sofern jedoch lediglich die sendeseitige Leistungsregelung untersucht werden soll und zeitliche Änderungen des Ausbreitungspfades keine Rolle spielen, können auch Einschränkungen in der Isotropie hingenommen werden. Die Verwendung von stärker richtenden Antennen ist in dem Maße möglich, je weniger sich das Einfallswinkelspektrum der Signale vom Sender zeitlich ändert.

2.2 Messungen an Basisstationen

2.2.1 Messungen zur Überprüfung der Grenzwerte

In diesem Kapitel sollen Messverfahren zur Bestimmung der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch WiMAX-Signale von Basisstationen entwickelt und beschrieben werden, d.h. es geht hierbei im wesentlichen um Messungen an Orten in der Umgebung von WiMAX-Basisstationen, an denen sich Menschen im täglichen Leben aufhalten. Die Bestimmung beruflicher Expositionen ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Im Aufenthaltsbereich der Allgemeinbevölkerung treten in den meisten Fällen Immissionswerte in der Nähe oder unterhalb der Nachweisgrenze von Breitbandsonden auf, zusätzlich herrscht oft ein Multifrequenzszenario (d.h. neben den WiMAX-Feldern existieren auch Immissionen, verursacht z.B. durch Rundfunk- und Mobilfunksender). Aus diesen Gründen liefert meist nur die frequenzselektive Messung verwertbare Ergebnisse. Daher wird im folgenden ausschließlich auf die korrekten Einstellparameter von Spektrumanalysatoren bei der spektralen Messung von WiMAX-Signalen eingegangen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei Messungen zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten neben der örtlichen auch die zeitliche Maximalexposition von Personen zu bestimmen ist. WiMAX-Systeme erzeugen ein in seiner Leistung auslastungsabhängig schwankendes Signal, so dass die Messungen entweder bei Maximalauslastung der Anlage durchzuführen sind (was in den meisten Fällen nicht erzwungen werden kann) oder der aktuelle Messwert geeignet auf maximale Anlagenauslastung hochzurechnen ist.

Die einschlägigen Empfehlungen zum Personenschutz (z.B. [ICNIRP 98]) fordern bei Vorhandensein mehrerer Einzelsignale mit Frequenzen über 100 kHz eine leistungsbezogene Summation der einzelnen Grenzwertausschöpfungen. Dies bedeutet, dass die hier behandelten WiMAX-Signale nie für sich allein betrachtet werden dürfen, sondern immer eine normgerechte Summation aller am Messort vorhandenen Funksignale durchgeführt werden

muss. Dies beinhaltet sowohl die Summation von gegebenenfalls gleichzeitig vorhandenen WiMAX-Immissionen, als auch die Berücksichtigung anderer Funksignale z.B. von Mobilfunkbasisstationen oder Rundfunksendern.

In den folgenden Kapiteln wird allerdings nur die korrekte Messtechnik von WiMAX-Immissionen näher behandelt. Informationen über die korrekte messtechnische Erfassung und Bewertung von Immissionen anderer Funkdienste finden sich in aktuellen Fachveröffentlichungen und Messvorschriften, beispielsweise in [BOR 05], [BOR 06], [BOR 06-2], [BUWAL 03], [BUWAL 05] und [SCHM 05].

2.2.1.1 Korrekte Einstellparameter am Spektrumanalysator

In Abschnitt 2.1.1.2 wurden die für eine korrekte Expositionsbestimmung besonders wichtigen Einstellparameter am Analysator bereits kurz vorgestellt. Entscheidend sind insbesondere die Auflösebandbreite (RBW) und der Detektortyp. Spektrumanalysatoren bieten im Regelfall drei Methoden zur Messung der Signalstärke: die Messung im Frequenzbereich, die Erfassung im Zeitbereich („Zero Span“) und die Kanalleistungsmessung („Channel Power“). Im folgenden werden alle drei Verfahren bezüglich ihrer Eignung für die Messung von WiMAX-Signalen bewertet und korrekte Einstellparameter angegeben. Ebenfalls behandelt werden in diesem Abschnitt Methoden zur Berücksichtigung der auslastungsabhängigen Leistungsabgabe in Hinblick auf die Bestimmung der Exposition bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung.

Spektrale Messung:

Bei ausreichend feinem Auflösungsvermögen des Analysators wird hierbei am Schirm der komplette vergebene Frequenzbereich des WiMAX-Bandes (z.B. 3,4 - 3,6 GHz oder 5,5 - 5,9 GHz) dargestellt, so dass die einzelnen vorhandenen Signale gemessen werden können. Gegebenenfalls wird auch nur ein Ausschnitt aus dem gesamten WiMAX-Spektrum dargestellt, um insbesondere bei Analysatoren mit geringerer Horizontalauflösung eine brauchbare Signaldarstellung zu erhalten. Falls zum Zeitpunkt der Messung von der Basisstation in jedem Rahmen nur das kurze Beaconsignal abgestrahlt wird (d.h. geringe Auslastung der Station), kann es einige Zeit dauern, bis am Schirm ein komplettes Spektrum entstanden ist, da der Analysator das Spektrum (aufgrund der gepulsten Signalstruktur) nur ausschnittsweise messen kann (siehe Bild 2.2).

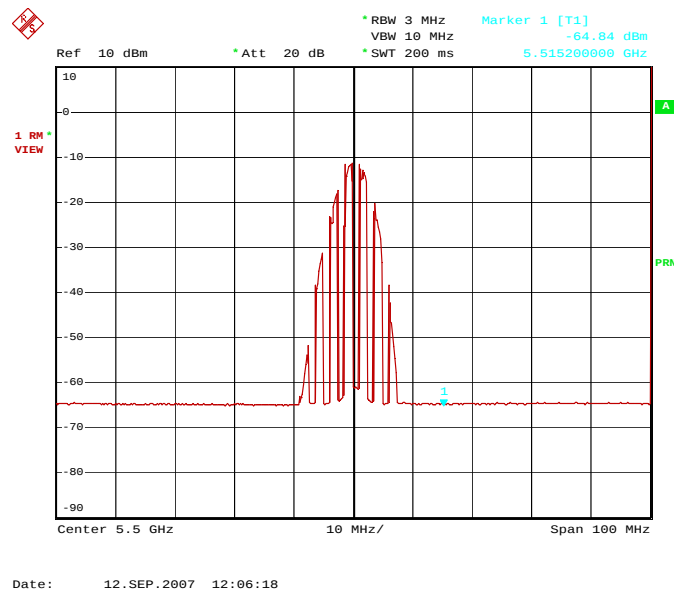


Bild 2.2: Unvollständiges WiMAX-Signalspektrum aufgrund der gepulsten Leistungsabgabe der Basisstation. Messgerät: FSP-30 von Rohde & Schwarz.

Ein einzelner Sweep des Analysators liefert hier meist noch nicht das komplette Spektrum; insbesondere zur zuverlässigen Bestimmung des Maximalwertes müssen eine ausreichende Anzahl an Sweeps mit Hilfe der „Max-Hold“-Funktion des Analysators überlagert werden.

Das thermische Wirkungsmodell, das den Grenzwertempfehlungen der ICNIRP [ICNIRP 98] zu Grunde liegt, fordert bei zeitlich schwankender Exposition eine zeitliche Mittelung, angepasst an die thermische Zeitkonstante des menschlichen Körpers. Es wird meist eine Mittelungszeit von sechs Minuten angegeben. Hierbei ist jedoch zwischen einer schnellen zeitlichen Schwankung der Signalleistung aufgrund der durch das Modulationsverfahren generierten Zeitstruktur des Signals und eventuell vorhandenen langsameren Leistungsschwankungen, verursacht z.B. durch unterschiedliche Auslastungen der Sendeanlagen (bei WiMAX: z.B. schwankendes Tastverhältnis), implementierten Leistungsregelungsmechanismen oder ausbreitungsbedingten Pegelschwankungen zu unterscheiden.

Zeitliche Schwankungen, verursacht durch das Modulationsverfahren, werden häufig durch den Crestfaktor C beschrieben, der meist in dB angegeben wird und sich nach folgender Formel errechnet:

$$C = 20 \cdot \log (U_{\text{Peak}}/U_{\text{RMS}}) \quad (2.1)$$

U_{Peak} : Maximal auftretende Signalamplitude

U_{RMS} : Effektivwert des Signals

Signale von WiMAX-Basisstationen besitzen einen Crestfaktor von etwa 10 dB. Der typische Zeitverlauf der Hüllkurve eines OFDM-modulierten WiMAX-Signals (erzeugt mit einem Signalgenerator SMU von Rohde & Schwarz) ist in folgendem Bild dargestellt:

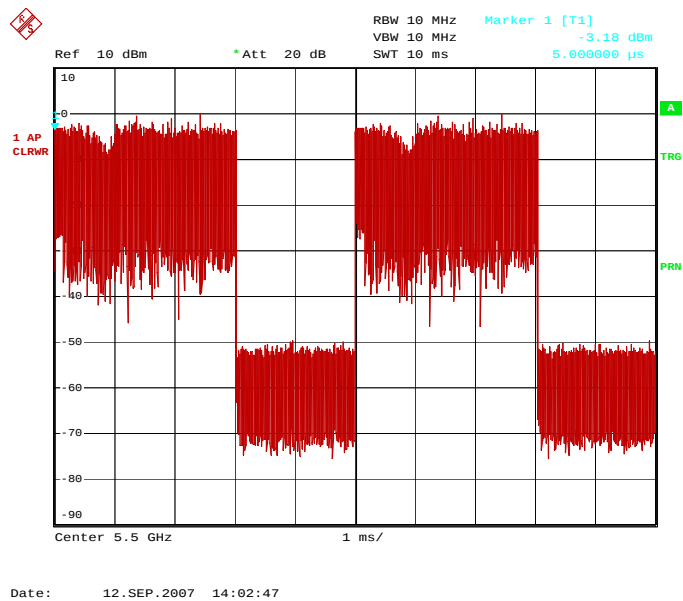


Bild 2.3: WiMAX-Signal (TDD-Mode; Modulation der Einzelträger: 64-QAM), aufgenommen im Zeitbereich mit dem Sample-Detektor. Messgerät: FSP-30 von Rohde & Schwarz.

In den ersten drei Millisekunden jedes Rahmens sendet die hier voll ausgelastete Basisstation Signale mit stark schwankender, rauschähnlicher Hüllkurve (der Momentanwert der Hüllkurvenleistung schwankt offensichtlich um bis zu 40 dB). Danach folgen zwei Millisekunden, in denen die Station nicht sendet (zu sehen ist nur das ebenfalls zeitlich sehr stark schwankende Grundrauschen des Analysators) und auf Antwortsignale von Endgeräten wartet.

Aufgabe der Messtechnik ist es, bei derartigen Signalen den RMS-Wert zu liefern, also eine Größe, die einen Bezug zur mittleren thermischen Absorption herstellt. Erreicht werden kann dies durch Verwendung des RMS-Detektors im Spektrumanalysator sowie durch die Betrachtung des Zeitverlaufes innerhalb eines Rahmens: Mit Hilfe des Tastverhältnisses (Puls-Pausenverhältnis des Basisstationssignals) kann aus der gemessenen Pulsleistung auf die mittlere Leistung geschlossen werden.

Allerdings ist es hierbei nicht notwendig, eine Mittelungszeit von sechs Minuten einzuhalten, da der RMS-Wert bereits nach wesentlich kürzeren Messzeiten vom Analysator geliefert wird. Folgendes Bild zeigt das Ergebnis einer spektralen Messung des WiMAX-Signals aus Bild 2.3, wobei sowohl mit einem Peak- als auch mit einem RMS-Detektor bewertet wurde:

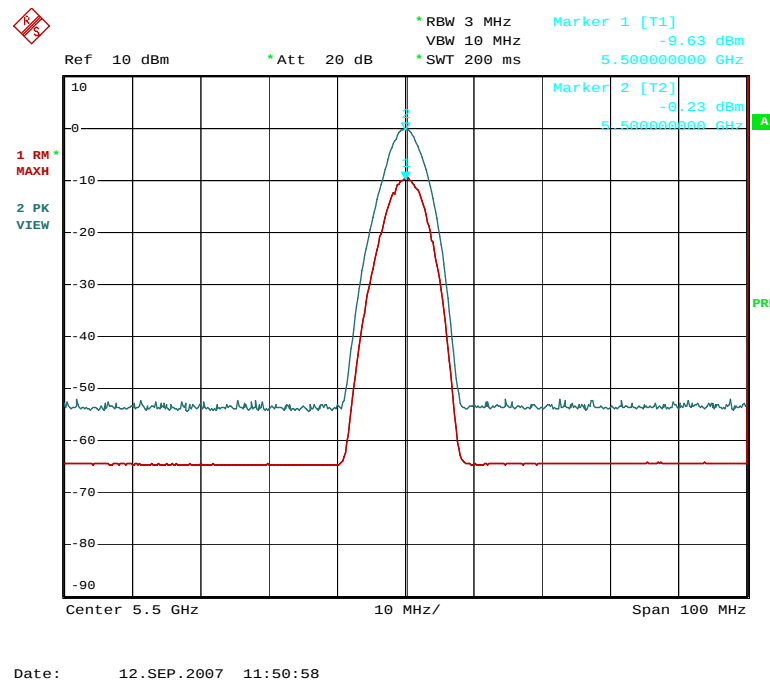


Bild 2.4: Spektren des WiMAX-Signals aus Bild 2.3, gemessen mit RMS-Detektor (rot) und Peak-Detektor (blau). Messgerät: FSP-30 von Rohde & Schwarz.

In diesem Beispiel liefert der Peak-Detektor einen um 9,4 dB höheren Messwert als der RMS-Detektor. Der Unterschied zwischen beiden Messungen entspricht also in etwa dem Crestfaktor des Signals.

Die spektrale Messung liefert somit bei Verwendung des RMS-Detektors einen Messwert P_S , der dem RMS-Wert während des Zeitraumes, in dem die Basisstation sendet, entspricht. Aus diesem Wert lässt sich in einem zweiten Schritt die mittlere (thermische) Leistung des WiMAX-Signals bestimmen. Dabei ist allerdings zu unterscheiden, ob die Station im TDD- oder im FDD-Mode betrieben wird.

Im FDD-Mode kann im Extremfall die Basisstation permanent ein Signal abstrahlen. Die Empfangszeit entfällt, da der Uplink auf einer anderen Sendefrequenz durchgeführt wird. Kurze Austastzeiten am Ende jedes Frame können hierbei vernachlässigt werden. Somit entspricht die gemessene Leistung P_S auch der maximalen Exposition $P_{\max}$, verursacht durch das WiMAX-Signal. Zusätzlich lässt sich auch die minimal mögliche Exposition angeben: Sie tritt in den Zeiträumen auf, in denen überhaupt kein Teilnehmer mit Daten versorgt wird, sondern in jedem Frame nur das kurze Beaconsignal abgegeben wird. Die minimale Exposition $P_{\min}$ lässt sich somit aus dem Messwert P_S mittels der Dauer des Beaconsignals t_{Beacon} und der Rahmendauer T_{Frame} mit folgender Formel berechnen:

$$P_{\min} = P_S (t_{\text{Beacon}}/T_{\text{Frame}}) \quad (2.2)$$

Die Dauer des Beaconsignals ist je nach Parametrisierung des WiMAX-Signals unterschiedlich. Typisch ist ein Wert von weniger als 10 Prozent eines Frames.

Arbeitet die Basisstation im TDD-Mode, kann die minimale Exposition ebenfalls mittels Formel 2.2 aus dem Messwert P_S bestimmt werden. Die maximal mögliche Exposition hingegen unterscheidet sich: Hier ist zu beachten, dass eine TDD-Basisstation niemals permanent sendet, sondern ein Teil des Frames für den Empfang von Uplink-Signalen reserviert. Folglich kann die maximale Exposition $P_{\max}$ aus dem Messwert P_S mittels der maximalen Dauer des Downlinksubframes t_{Downlink} (inklusive der Zeit für das Beaconsignal) und der Rahmendauer T_{Frame} mit folgender Formel berechnen:

$$P_{\max} = P_S (t_{\text{Downlink}}/T_{\text{Frame}}) \quad (2.3)$$

Betrachtet man beispielsweise das TDD-WiMAX-Signal aus Bild 2.3, so ergibt sich ein Verhältnis $t_{\text{Downlink}} / T_{\text{Frame}}$ von 3 ms / 5 ms. Die maximal mögliche Exposition $P_{\max}$ beträgt also nur 60 % von P_S .

Wie in Abschnitt 2.1.1.2 bereits erwähnt, zeigt der RMS-Detektor nur dann die mittlere Leistung an, wenn er den RMS-Wert aus einer genügend großen Anzahl an Abtastwerten errechnen kann. Dies bedeutet, dass es bei sehr kurzen Sweepzeiten des Analysators zu Messfehlern kommen kann. Die Ursache dafür liegt in der nicht ausreichend guten Mittelung aufgrund einer zu geringen Verweilzeit pro Pixel, so dass sich eine Anzeige ergibt, die noch nicht ausreichend geglättet ist.

Am hier verwendeten Analysator sollten keine Sweepzeiten kleiner 100 ms bei der Messung mit dem RMS-Detektor gewählt werden. Bei anderen Modellen können sich auch andere Mindestsweepzeiten ergeben, da diese stark von den Geräteparametern (insbesondere Pixelanzahl und Abtastrate) abhängen.

Auf der anderen Seite darf aber auch keine zu große Sweepzeit eingestellt werden, da dann eventuell eine zu große Verweilzeit pro Pixel entsteht. Zu groß ist die Verweilzeit dann, wenn sie länger ist als die Dauer des Beaconsignals. In diesem Fall würden immer dann, wenn von der Basisstation während der Messung nur das Beaconsignal gesendet wird, für die rechnerische Bestimmung des RMS-Werts pro Pixel auch Abtastwerte aus Zeiten, in denen kein Signal vorhanden ist, herangezogen, so dass sich eine Verringerung des RMS-Wertes ergibt. Wird hingegen die Messzeit kleiner als die Beacondauer gewählt, ergeben sich auf jeden Fall auch RMS-Werte, die ausschließlich aus Abtastwerten zum Zeitpunkt des Vorhandenseins des Beaconsignals errechnet wurden, so dass bei Nutzung von „Max-Hold“ wirklich der RMS-Wert des Signalpulses bestimmt wird. Folgendes Bild zeigt den Einfluss einer zu großen Messzeit. Hierbei wurde ein gepulstes Hochfrequenzsignal (Trägerfrequenz: 2,5 GHz, Pulsdauer: 0,25 ms, Periodendauer: 5 ms) mit zwei unterschiedlichen Sweepzeiten spektral gemessen.

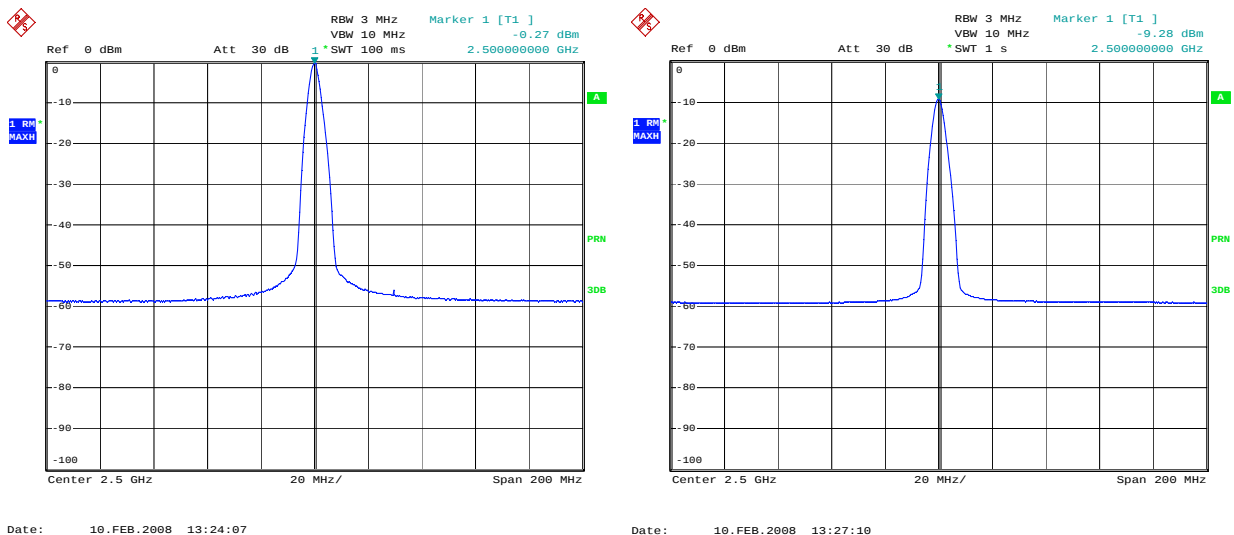


Bild 2.5: Spektren eines gepulsten Hochfrequenzsignals (Pulsleistung: -0,3 dBm, Trägerfrequenz: 2,5 GHz, Pulsdauer: 0,25 ms, Periodendauer: 5 ms). Messung mit RMS-Detektor und Sweepzeiten von 100 ms (links) bzw. 1 s (rechts) Messgerät: ESPI-3 von Rohde & Schwarz.

Die Messung mit einer Sweepzeit von 100 ms führt bei diesem Analysator (Horizontalauf-
 lösung: 500 Pixel) zu einer Verweilzeit pro Pixel von 0,2 ms, was kürzer ist als die Dauer des
 Pulses. Somit ergibt sich nach einigen Sweeps (Speicherung mit Max-Hold-Funktion) am
 Analysator) auch der richtige Leistungswert. Bei einer um den Faktor 10 größeren Sweepzeit
 beträgt die Verweilzeit pro Pixel 2 ms, was dazu führt, dass mindestens 7/8 der Samples für
 ein Pixel zu Zeiten genommen werden, an denen gar keine Signalleistung am Analysator
 ansteht. Die mittlere Leistung wird also um den Faktor $2 \text{ ms} / 0,25 \text{ ms} = 8$ (d.h. 9 dB) verrin-
 gert, was im rechten Spektrum auch deutlich zu erkennen ist.

Spektrumanalysatoren, die zur korrekten Berechnung des RMS-Wertes z.B. aufgrund
 geringer Abtastrate relativ lange Zeiten benötigen, so dass die Verweilzeit pro Pixel länger
 als die Beacondauer wird, sind also zur korrekten Messung von WiMAX-Signalen nicht zu
 empfehlen. Mit diesen Geräten würde man bei Messungen zu Zeiten ohne Datentransfer
 durch die Basisstation (d.h. nur das Beaconsignal wird durch die Basisstation abgestrahlt)
 einen zu geringen Immissionswert bestimmen. Allerdings kann diese Methodik, wie später
 noch gezeigt wird, zielgerichtet zur zeitlichen Mittelung eingesetzt werden.

Ebenfalls bereits angesprochen wurde die Tatsache, dass bei der spektralen Messung die
 RBW nicht kleiner sein darf als die Signalbandbreite, will man eine Unterbewertung der
 Immission vermeiden. WiMAX-Signale besitzen typisch Signalbandbreiten von deutlich über
 1 MHz (Typische Bandbreiten liegen zwischen 3,5 und 20 MHz). Folgendes Bild zeigt das
 Spektrum des bereits vorher verwendeten WiMAX-Signals ($B = 3,5 \text{ MHz}$), gemessen mit drei
 verschiedenen großen Auflösebandbreiten (RBW):

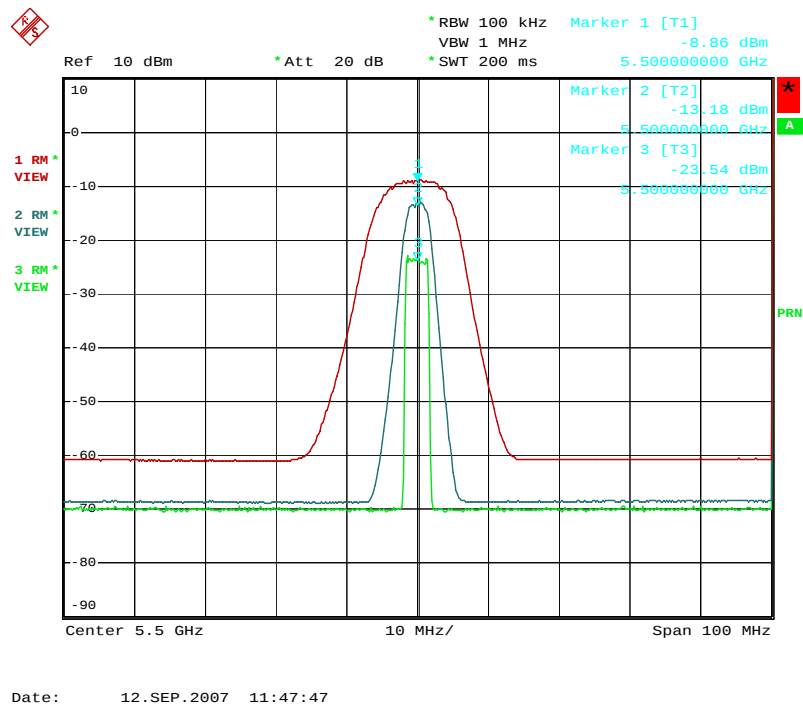


Bild 2.6: Spektren eines WiMAX-OFDM-Signals ($B = 3,5$ MHz), gemessen mit $RBW = 0,1$ MHz (grün), 1 MHz (blau) und 10 MHz (rot); RMS-Detektor, Sweeptime: 200 ms; Referenzwert: -10 dBm

Bei der Messung breitbandiger Signale ist also eine ausreichend große RBW sicherzustellen. Allerdings sind bei vielen preisgünstigen Analysatoren (insbesondere kleine, tragbare Modelle, die ansonsten sehr gut für Feldstärkemessungen im Freien geeignet sind) häufig keine Auflösungsbreiten größer 1 MHz im Gerät realisiert. In diesem Fall kann der Amplitudenverlust aufgrund der zu geringen RBW durch einen geeigneten Korrekturfaktor K kompensiert werden. Der Korrekturfaktor K errechnet sich für den hier interessierenden Fall ($B_{\text{Signal}} \gg B_N$) mittels folgender Formel [RAU 00]:

$$K = 10 \cdot \log (B_{\text{Signal}} / B_N). \quad (2.4)$$

B_{Signal} ist dabei die Bandbreite des zu messenden Signals, während B_N die Rauschbandbreite des Zwischenfrequenzfilters darstellt. In den meisten Spektrumanalysatoren werden Gaussfilter verwendet, bei denen die Rauschbandbreite in erster Näherung der 3-dB-Bandbreite (RBW) des Filters entspricht. Es sollte allerdings immer die größte im Gerät vorhandene RBW gewählt werden, so dass sich ein möglichst kleiner Korrekturwert ergibt. Welche Bandbreite das WiMAX-Signal besitzt, ist wiederum abhängig von den gewählten Systemparametern. Hier ist entweder der Betreiber zu befragen, oder im Rahmen einer Vormessung mit bewusst niedrig gewählter RBW (z.B. 100 kHz) die Signalbandbreite B_{Signal} zu bestimmen.

Zusammenfassend betrachtet, liefert die spektrale Messung von WiMAX-Signalen korrekte Ergebnisse, wenn folgende Punkte bei der Durchführung beachtet werden:

- Ausreichende Zahl an Sweeps überlagern („Max-Hold“), damit am Bildschirm das Signalspektrum und insbesondere dessen Spitze vollständig dargestellt ist.
- $RBW \geq$ Signalbandbreite wählen. Die Signalbandbreite kann beim Betreiber erfragt oder im Rahmen einer Vormessung (mit kleiner RBW) ermittelt werden.
- RMS-Detektor verwenden.
- Sweepzeit möglichst groß wählen, damit möglichst viele Samples pro Pixel in die RMS-Berechnung einfließen.
- Allerdings ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Verweilzeit pro Pixel (= Sweeptime / horizontale Pixelzahl) kleiner als die Dauer des permanent abgestrahlten Beaconsignals (Betreiberauskunft oder Vormessung im Zeitbereich; siehe weiter unten) bleibt, damit keine zusätzliche Verringerung des Messwertes durch die gepulste Abstrahlung der Basisstation entstehen kann.
- Im FDD-Mode entspricht der gemessene Maximalwert des Spektrums P_S dann der maximal möglichen Exposition P_{max} .
- Im TDD Mode ist die maximal mögliche Exposition aus dem Maximalwert des Spektrums P_S mit Hilfe von Formel 2.3 zu bestimmen.
- Die minimal mögliche Exposition P_{min} (verursacht ausschließlich durch die Beaconsignale) ergibt sich sowohl für FDD als auch für TDD aus dem Maximalwert des Spektrums P_S mittels Formel 2.2.

Prinzipiell kann die spektrale Messung sowohl bei der Schwenkmethode als auch bei Punktrastermessungen eingesetzt werden. Im Unterschied zu den im folgenden noch näher beschriebenen Messungen im Zeitbereich bzw. der Kanalleistungsmessung ist es bei der spektralen Messung auch möglich, mehrere WiMAX-Signale gleichzeitig zu erfassen und auszuwerten.

Außerdem muss angemerkt werden, dass die Messung im Spektralbereich unter Umständen zu einer gewissen Überbewertung der Exposition führen kann. Der Grund dafür wird im nächsten Absatz im Rahmen der Beschreibung der Zeitbereichsmessung noch näher erläutert.

Messung im Zeitbereich („Zero Span“):

Anstatt der spektralen Messung ist es mit handelsüblichen Spektrumanalysatoren meist auch möglich, ein WiMAX-Signal im Zeitbereich zu erfassen (Betriebsart „Zero Span“). Dies hat zwar den Nachteil, dass immer nur ein Kanal gemessen werden kann, und nicht, wie bei der spektralen Erfassung, gleich mehrere WiMAX-Signale auf einmal messbar sind. Dafür eröffnet die Messung im Zeitbereich die Möglichkeit, die Zeitstruktur von WiMAX-Signalen genauer zu analysieren. In Bild 2.7 ist der gemessene Zeitverlauf der Sendeleistungsabgabe für einen Frame eines TDD-WiMAX-Signals im Zeitbereich dargestellt, die dazugehörige logische Aufteilung ist in Bild 2.8 zu sehen.

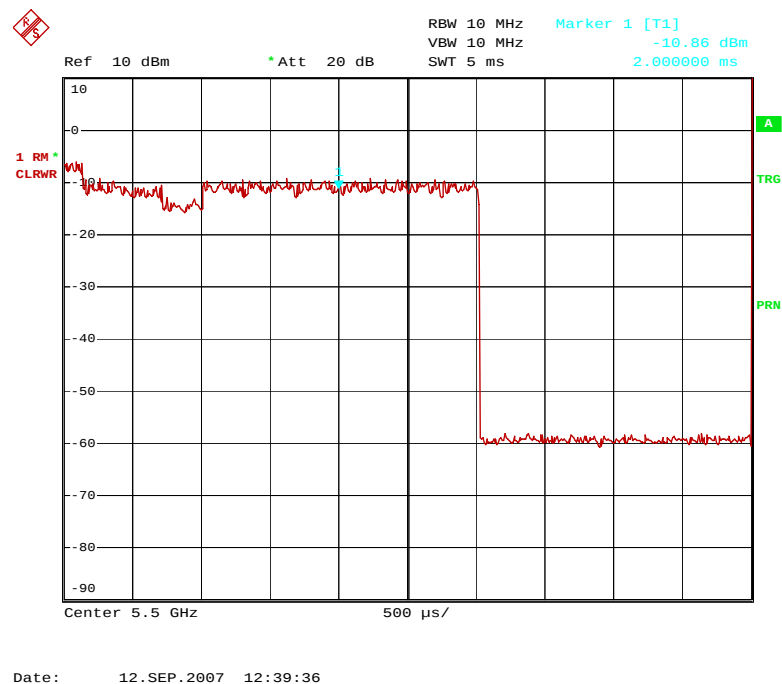


Bild 2.7: Ein Frame eines WiMAX-OFDM-Signals ($B = 3,5$ MHz) im Zeitbereich, gemessen mit $RBW = 10$ MHz und RMS-Detektor.

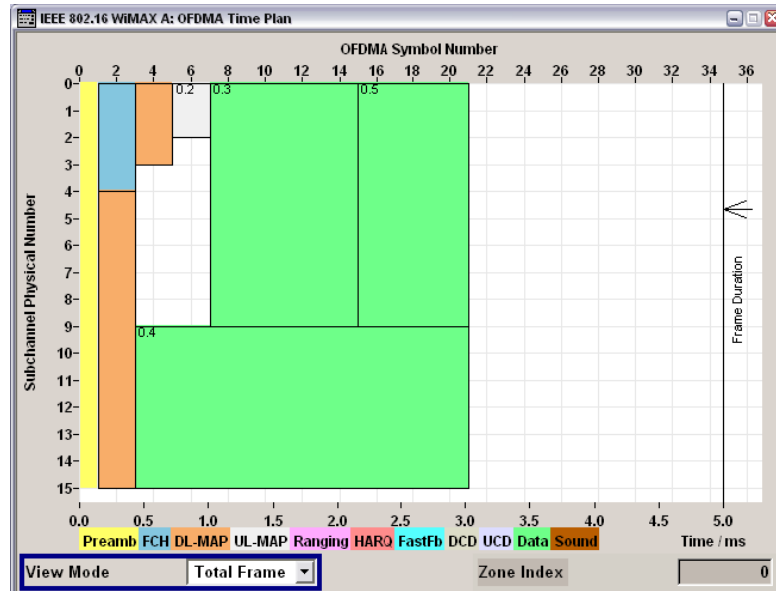


Bild 2.8: Logische Struktur des in Bild 2.6 gemessenen Signals.

Man erkennt sehr deutlich die Rahmendauer von 5 ms, sowie die Aufteilung in den Downlink-Subframe (Dauer: 3 ms) und den Uplink-Subframe (Dauer: 2 ms). In dem hier gemessenen Signal wird während des gesamten Downlink-Subframes ein Signal abgegeben.

Auffällig ist dabei, dass offensichtlich die Präambel mit etwas höherer mittlerer Leistung abgestrahlt wird, als die übrigen Signalanteile. Grund dafür ist die Tatsache, dass unter-

schiedliche Modulationsverfahren für die Modulation der Einzelträger verwendet werden können (z.B. QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Grundsätzlich erlaubt der WiMAX-Standard zwei Möglichkeiten, die einzelnen Konstellationsdiagramme an einander anzugleichen [IEEE 04]):

- Anpassung derart, dass der Downlink-Subframe eine konstante mittlere Leistung erhält („constant mean power scheme“).
- Anpassung derart, dass die maximale Leistung während des Downlink-Subframe konstant ist („constant peak power scheme“).

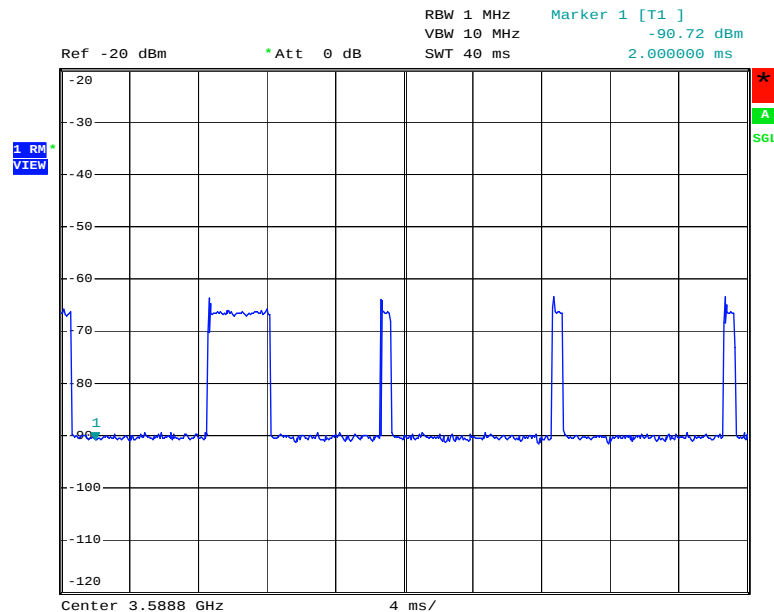
Im ersten Fall würde sich in Bild 2.7 ein „glatter Verlauf“ des Signals während eines Downlink-Subframes ergeben, die Endstufe des Senders wäre auch mit konstanter mittlerer Leistung belastet. Der Nachteil dieses Mode liegt jedoch in der Tatsache begründet, dass die verschiedenen Modulationsarten unterschiedliche Crestfaktoren besitzen, wodurch die kurzzeitigen Maximalwerte in der Hüllkurve je nach Modulationsart unterschiedlich hoch ausfallen, so dass während des Downlink-Subframes die Endstufe zeitweise mehr und dann wieder weniger in der Nähe der Übersteuerungsgrenze betrieben wird.

Daher kann es günstiger sein, die zweite Betriebsart zu wählen, bei der zu den Zeiten, in denen niederwertige Modulationsverfahren mit kleinem Crestfaktor verwendet werden (z.B. QPSK während der Präambel), es möglich wird, die mittlere Sendeleistung etwas zu erhöhen, da die kurzzeitigen Signalpeaks hier nicht so weit über die mittlere Leistung hinausgehen als in den Zeiten, in denen höherwertigere Modulationsverfahren eingestellt sind (z.B. während des langen Blocks, in dem die Daten übertragen werden). Die Endstufe generiert hierdurch ein Signal mit nahezu konstanter Größe der Signalpeaks (siehe z.B. Bild 2.3), jedoch schwankender mittlerer Leistung.

Der Amplitudeneinbruch im Zeitraum von 0,5 bis 1 ms in Bild 2.7 hat mit diesen zwei Modi nichts zu tun, sondern beruht darauf, dass im gemessenen Signal die Träger, die zur Übertragung der Burstprofilparameter für den Uplink (UL-MAP) verwendet werden, abgeschaltet sind, da offensichtlich derzeit keine UL-Bursts von der Basisstation definiert werden (siehe Bild 2.8), was dort zu einem gewissen Amplitudenverlust im Signal führt.

Bezüglich der korrekten RMS-Bestimmung im Rahmen einer Expositionsmessung wäre das „constant mean power scheme“ die weniger problematische Variante, allerdings zeigen die bisher an in Betrieb befindlichen WiMAX-Stationen durchgeführten Erprobungsmessungen, dass offensichtlich das „constant peak power scheme“ derzeit üblich ist.

Somit ergibt sich in der Praxis eine Unsicherheit bezüglich der Frage, welcher Wert als RMS-Wert des Sendepulses (P_S) für die Berechnung der wirksamen Exposition $P_{\max}$ (z.B. für Formel 2.3) herangezogen werden soll. Nimmt man den Wert, der zum Zeitpunkt der Präambel angezeigt wird, so führt dies zu einer gewissen Überbewertung der Exposition. Realistischer erscheint bei Betrachtung von Bild 2.7 der Wert, der während des Zeitraums der Datenübertragung (Zeitraum 1 bis 3 ms) generiert wird. Dieser kann jedoch nur abgelesen werden, wenn während der Messung von der Basisstation auch Daten an ein Endgerät übertragen werden. Ein praktisches Beispiel zeigt folgendes Bild:



Date: 29.NOV.2007 09:32:54

Bild 2.9: Livemessung eines WiMAX-Signals (Darstellung im Zeitbereich)

Die im Bild zu sehenden vier Frames haben sehr unterschiedliches Aussehen. In einem der dargestellten Rahmen wird zusätzlich zum Beaconsignal (Präambel + FCH + Burstprofilbroadcast) auch noch eine Nutzdatenübertragung zu einem Endgerät durchgeführt. In diesem Burst lässt sich die mittlere Leistung P_S gut bestimmen, während dies in den anderen Frames aufgrund der kurzen Plateaubreite nach der Präambel deutlich schwieriger ist (d.h. die Messwertbestimmung mit einer größeren Unsicherheit beaufschlagt ist).

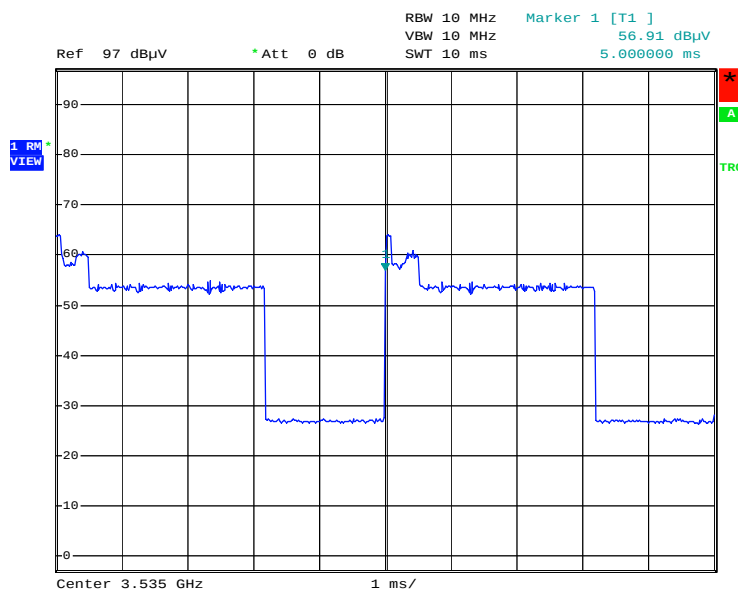
An dieser Stelle muss nochmals auf die spektrale Messung zurückgesprungen werden: Prinzipiell wird das Ergebnis einer spektralen Messung, die ja zwangsweise im „Max-Hold“-Mode durchgeführt werden muss (damit sich ein komplettes Spektrum auf dem Bildschirm ergibt), immer den größten Wert der Signalhüllkurve eines Frames abbilden. Dies ist üblicherweise der Amplitudenwert, der durch die Präambel erzeugt wird (siehe Bild 2.7 und 2.9). Somit ergibt sich bei einer spektralen Messung immer eine Überbewertung der Exposition um den Faktor, um den die Präambel höher liegt, als der Rest des Downlink-Subframes.

Zusammenfassend betrachtet, liefert die Zeitbereichsmessung von WiMAX-Signalen korrekte Ergebnisse, wenn folgende Punkte bei der Durchführung beachtet werden:

- Spektrumanalysator auf die Mittenfrequenz des zu messenden Signals einstellen.
- $RBW \geq$ Signalbandbreite wählen.
- RMS-Detektor verwenden.
- Geeignete Ablenkzeit wählen, so dass der Zeitverlauf eines oder einiger Frames am Schirm gut erkennbar ist. Gegebenenfalls die Dauer eines Rahmens T_{Frame} , des Downlink-Subframes $t_{Downlink}$ und des Beaconsignals t_{Beacon} bestimmen.

- Als Messwert P_S nicht den Leistungswert der Präambel ablesen, sondern den Pegel des flachen Teils des „Plateaus“ (am besten aus dem Zeitraum, der für die Datenübertragung zu Endgeräten reserviert ist).
- Im FDD-Mode entspricht dieser Wert P_S dann in guter Näherung der maximal möglichen Exposition $P_{\max}$.
- Im TDD Mode ist die maximal mögliche Exposition $P_{\max}$ aus P_S mit Hilfe von Formel 2.3 zu bestimmen.
- Die minimal mögliche Exposition $P_{\min}$ (verursacht ausschließlich durch die Beaconsignale) ergibt sich sowohl für FDD als auch für TDD aus dem Pegelwert, verursacht durch das Beaconsignal, mittels Formel 2.2.

Prinzipiell kann die Zeitbereichsmessung sowohl bei der Schwenkmethode als auch bei Punktrastermessungen eingesetzt werden. Im Unterschied zur spektralen Messung ist es allerdings bei der Zeitbereichsmessung nicht möglich, mehrere WiMAX-Signale gleichzeitig zu erfassen und auszuwerten. Dafür eröffnet die genaue Analyse des Signals im Zeitbereich eine exaktere Bestimmung der Exposition sowie eine Beobachtung der auslastungsabhängigen Veränderung der Signalstruktur. In folgendem Bild (wiederum das Ergebnis einer Feldstärkemessung in der Nähe einer aktuell betriebenen WiMAX-Station) wird deutlich, dass die Betrachtung des Signals im Zeitbereich eine genauere Bestimmung der Exposition ermöglicht, als die spektrale Messung, bei der immer nur der Signalabschnitt mit der größten Amplitude als Basiswert für die Errechnung der Exposition herangezogen werden kann.



Date: 1.FEB.2008 08:44:39

Bild 2.10: Livemessung eines WiMAX-Signals (Darstellung im Zeitbereich)

Würde man hier die Leistung der Preamble als Messwert P_S heranziehen (so wie es bei der spektralen Messung ja der Fall ist), ergäbe sich eine Überbewertung der Exposition von etwa 10 dB. Bei diesem Signal wäre es daher angebracht, die mittlere Immission aus drei Zeitbereichen des Sendesignals zu ermitteln: Leistungswert der Preamble, Leistungswert des restlichen Beaconsignals, Leistungswert des Datenübertragungszeitraums (zusätzlich natürlich unter Berücksichtigung der Empfangszeit, in der die Basisstation nicht sendet).

Ein weiteres Beispiel dafür, dass die verlässliche Bestimmung der Exposition nur durch eine Beobachtung des Signals im Zeitbereich sichergestellt werden kann, ist die Tatsache, dass bei einigen WiMAX-Systemen Auslastungsschwankungen nicht durch unterschiedlich lange Downlinksignale (wie in Bild 2.9 zu sehen) zu erkennen sind. Stattdessen wird der Downlinksubframe immer komplett mit Signal gefüllt, dessen Stärke jedoch (durch Zu- und Abschalten von Trägern) je nach aktueller Auslastung variiert. Ein Beispiel für ein derartiges Signal liefert Bild 2.11:

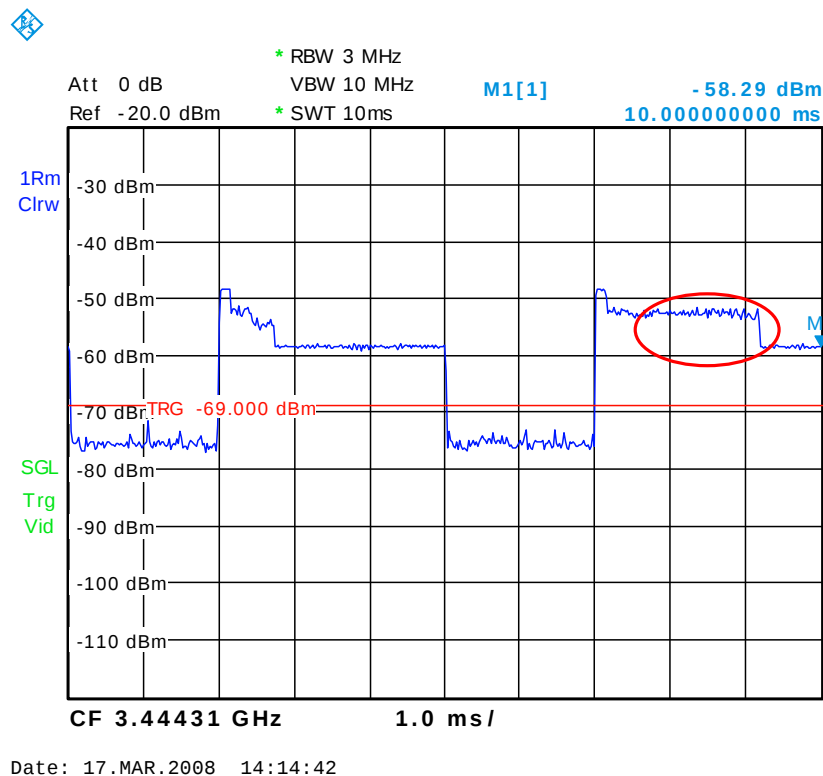


Bild 2.11: Livemessung eines WiMAX-Signals mit variabler Signalamplitude im Bereich des Downlinksubframe (Darstellung im Zeitbereich)

Kanalleistungsmessung („Channel Power“):

Mit den meisten derzeit handelsüblichen Spektrumanalysatoren ist es auch möglich, die Gesamtleistung eines WiMAX-Signals durch Integration über die gesamte Kanalbandbreite zu messen (Betriebsart „Channel Power“). Dieses Messverfahren hat zwar den Nachteil, dass immer nur ein Kanal gemessen werden kann, und nicht, wie bei der spektralen Erfassung, gleich mehrere WiMAX-Signale auf einmal messbar sind. Dafür stellt die große Signalbandbreite kein Problem mehr dar.

Kanalleistungsmessungen sind in vielen modernen Geräten als spezielle Messverfahren vordefiniert. Die Anzeige des Analysators bei einer derartigen Messung hat etwa das folgende Aussehen:

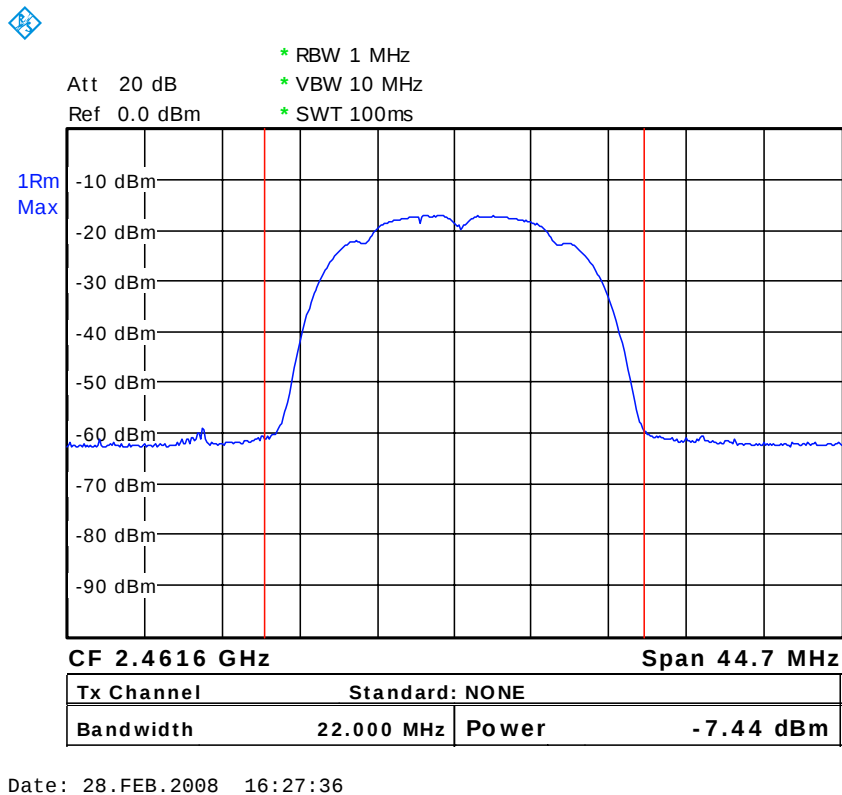


Bild 2.12: Kanalleistungsmessung mit einem Spektrumanalysator

Für korrekte Messergebnisse ist auch hier der RMS-Detektor notwendig. Die Bandbreite, über welche die Kanalleistungsmessung (Integration) durchgeführt wird, kann mit Markern am Gerät eingestellt werden (siehe senkrechte rote Linien in Bild 2.12). Für eine korrekte Kanalleistungsmessung ist eine Integrationsbandbreite notwendig, die der Bandbreite des Signals entspricht (Hier eingestellt: Integrationsbandbreite = 22 MHz).

Für die Messung ist eine RBW von etwa zehn Prozent der Signalbandbreite einzustellen, damit die Integration ausreichend fein durchgeführt wird, ohne dass die Messzeit zu groß wird.

Ähnlich wie bei der spektralen Messung ist allerdings darauf zu achten, dass aufgrund der gepulsten Signalabgabe nicht ein nur unvollständiges Signalspektrum aufgenommen und integriert wird. Dies führt zu einer Unterbewertung der Immission, wie Bild 2.13 beispielhaft zeigt.

In diesem Beispiel wurde nicht gewartet, bis sich durch die „Max-Hold“-Funktion des Analysators ein vollständiges Spektrum aufgebaut hat, so dass der Channel-Power-Messwert um etwa 3 dB geringer ausfällt, als der korrekte Wert aus Bild 2.12. Je nach momentaner Auslastung der WiMAX-Basisstation kann es durchaus einige Sekunden dauern, bis das Spektrum vollständig aufgebaut ist.

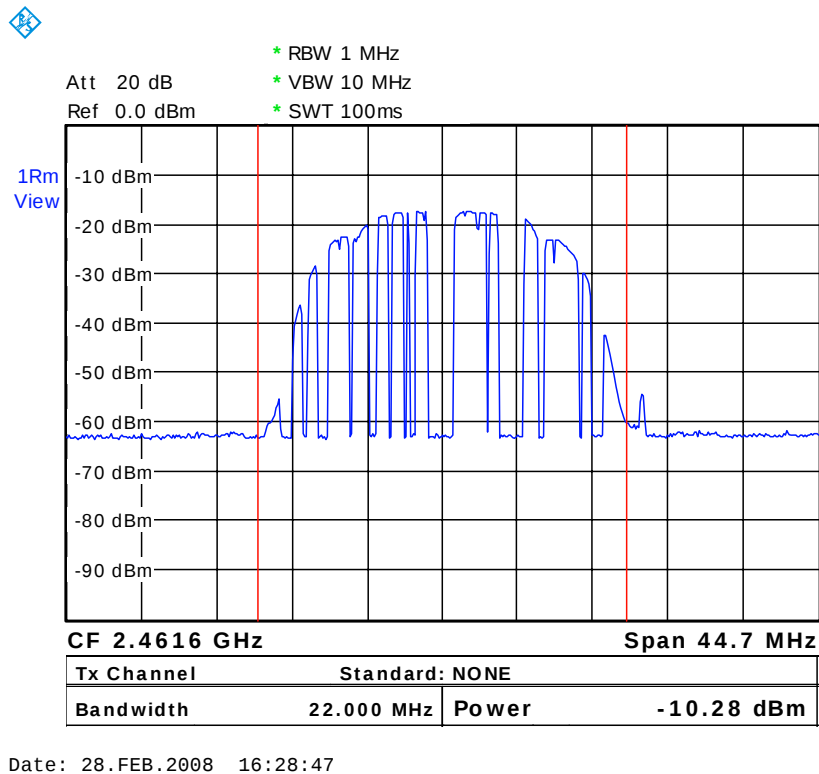


Bild 2.13: Kanalleistungsmessung eines gepulsten Signals mit zu kurzer Beobachtungsdauer

Zusammenfassend betrachtet, liefert die Channel-Power-Messung von WiMAX-Signalen korrekte Ergebnisse, wenn folgende Punkte bei der Durchführung beachtet werden:

- Spektrumanalysator auf die Mittenfrequenz des zu messenden Signals einstellen.
- $RBW \approx 10\%$ der Signalbandbreite wählen.
- RMS-Detektor verwenden.
- Sweepzeit möglichst groß wählen, damit möglichst viele Samples pro Pixel in die RMS-Berechnung einfließen.
- Allerdings ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Verweilzeit pro Pixel (= Sweeptime / horizontale Pixelzahl) kleiner als die Dauer des permanent abgestrahlten Beaconsignals bleibt, damit keine zusätzliche Verringerung des Messwertes durch die gepulste Abstrahlung der Basisstation entstehen kann.
- Im FDD-Mode entspricht der vom Analysator zahlenmäßig ausgegebene Channel-Power-Messwert P_S dann der maximal möglichen Exposition P_{max} .
- Im TDD Mode ist die maximal mögliche Exposition aus dem Channel-Power-Messwert P_S mit Hilfe von Formel 2.3 zu bestimmen.
- Die minimal mögliche Exposition P_{min} (verursacht ausschließlich durch die Beaconsignale) ergibt sich sowohl für FDD als auch für TDD aus dem Channel-Power-Messwert P_S mittels Formel 2.2.

Prinzipiell kann die Kanalleistungsmessung sowohl bei der Schwenkmethode als auch bei Punktrastermessungen eingesetzt werden. Im Unterschied zur spektralen Messung ist es bei

der Kanalleistungsmessung nicht möglich, mehrere WiMAX-Signale gleichzeitig zu erfassen und auszuwerten. Dafür stellt das Fehlen von ZF-Filterbandbreiten über 1 MHz (wie bei preisgünstigen Analysatoren häufig der Fall) kein Problem mehr dar, da die Gesamtleistung integral ermittelt wird.

Fazit:

Alle drei möglichen Erfassungsmethoden (spektrale Messung, Erfassung im Zeitbereich und Kanalleistungsmessung) sind zur Bestimmung der Exposition von WiMAX-Basisstationen (Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte) geeignet, wenn die wesentlichen Einstellparameter am Spektrumanalysator geeignet gewählt sind. Der Hauptvorteil der spektralen Messung liegt in der Möglichkeit der gleichzeitigen Erfassung von mehr als einem Signal, während die Messung im Zeitbereich die genaueste Analyse des relativ komplizierten zeitlichen Signalverlaufs eines WiMAX-Signals ermöglicht, so dass die bestmögliche Extrapolation auf höchste betriebliche Anlagenauslastung erreichbar ist. Die Kanalleistungsmessung ist insbesondere dann von Vorteil, wenn das WiMAX-Signal eine Bandbreite besitzt, die deutlich größer ist, als die maximal einstellbare RBW des Analysators.

Werden Punktrastmessungen durchgeführt, ergeben sich bei den drei Verfahren keine zusätzlichen Einschränkungen. Wird hingegen der räumliche Maximalwert der Felder mittels der Schwenkmethode gesucht, verliert die Zeitbereichsmessung einen Teil ihrer Vorteile, da sich durch die Anwendung der „Max-Hold“-Funktion im Analysator die einzelnen Frames beliebig überlagern, so dass der Zeitverlauf des Signals nicht mehr sauber aufgelöst werden kann und daher die Bestimmung der Leistung des Downlink-Subframe erschwert wird.

Empfehlenswert ist es daher, immer vor der eigentlichen Expositionsmessung, im Rahmen einer Vorhermessung im Zeitbereich, die genaue Signalstruktur des WiMAX-Signals zu bestimmen.

2.2.1.2 Messunsicherheit

Jedes Messergebnis ist mit einer Messunsicherheit behaftet. Diese Messunsicherheit muss durch das Messlabor bestimmt werden und ist im Prüfbericht anzugeben.

Die gesamte Messunsicherheit setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen:

- Messunsicherheit der Messeinrichtung: Hier werden alle instrumentbedingten Unsicherheiten zusammengefasst, also z.B. Messunsicherheiten des Messgerätes und von Zuleitungskabeln bzw. Antennen.
- Methodenbedingte Unsicherheit: Diese umfasst die Unsicherheit der Probennahme, die sich z.B. aus individuell unterschiedlichen Vorgehensweisen verschiedener Messpersonen bei der Abtastung des Messvolumens ergeben. Auch werden Unsicherheiten, die sich durch Verwendung der Messgeräte (insbesondere Antennen) nicht unter Laborbedingungen, sondern in realen Umgebungen ergeben, berücksichtigt. Ebenfalls zu den methodenbedingten Unsicherheiten zählt die Unsicherheit bei der Hochrechnung auf die maximale Exposition durch den zeitlich nicht hundertprozentig konstanten Signalverlauf während des Downlinkburst.

Im folgenden werden für den Fall einer Expositionsmessung mittels Spektrumanalysator diejenigen Teilbeträge aufgelistet, die in die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit eingehen. Eine detaillierte Betrachtung der Messunsicherheiten der breitbandigen Messung ist hier entbehrlich, da diese in den vorangegangenen Abschnitten als lediglich für Überblickszwecke tauglich eingestuft wurde.

Die Messunsicherheiten bei der frequenzselektiven Messung setzt sich aus folgenden Einzelkomponenten zusammen:

Messgerät:

Hier werden diejenigen Unsicherheitsbeiträge primär bezüglich der Amplitudengenauigkeit übernommen, die der Hersteller in der Produktdokumentation spezifiziert hat.

Antenne

Ausschlaggebend ist hier die Kalibrierengenauigkeit der Antenne, die dem jeweiligen Kalibrierbericht zu entnehmen ist. Antennen werden aber in der Regel nur bei einigen ausgewählten Frequenzpunkten kalibriert, weswegen sich bei der Interpolation für dazwischen liegende Werte auch eine Unsicherheit ergibt.

Kabel

Hier gilt das für die Antennen Gesagte.

Zusätzlich ergeben sich durch Anschluss des Kabels an Antenne und Spektrumanalysator Fehlanpassungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Eine Beschreibung zum speziellen Vorgehen ist z.B. in [BUWAL 03] enthalten.

Für ein typisches frequenzselektives WiMAX-Messsystem (hier: Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7, logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142) kann beispielsweise folgendes Messunsicherheitsbudget für Messungen im 3,5-GHz-Band nach Tabelle 2.1 aufgestellt werden.

Die erweiterte Messunsicherheit für ein Vertrauensintervall von 95 % beträgt für dieses Beispiel etwa 3,2 dB. Diese Unsicherheit bewegt sich damit im für Hochfrequenz-Immissionsmessungen üblichen Bereich.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
FSP-7	Absolutpegel	0,2	Normal	2	0,10
FSP-7	Frequenzgang	0,5	Normal	2	0,25
FSP-7	Linearitätsabweichung	0,2	Rechteck	1,73	0,12
Kabel	Absolutkalibrierung	0,2	Normal	2	0,10
Kabel	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
USLP-9142	Absolutkalibrierung	1,5	Normal	2	0,75
USLP-9142	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Kabel/FSP-7	0,16	U-förmig	1,41	0,11
Fehlanpassung	USLP-9142/Kabel	0,13	U-förmig	1,41	0,09
Fehlanpassung	USLP-9142/FSP-7	0,18	U-förmig	1,41	0,13
USLP-9142	Umgebung	2,0	Normal	2	1,0
Probennahme	Reproduzierbarkeit	1,8	Normal	2	0,9
Kombinierte Standardunsicherheit					1,59
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					3,17

Tabelle 2.1: Beispiel für Messunsicherheitsbudget Messungen mit FSP-7 und USLP-9142 (3,5-GHz-Band)

Allerdings fehlt in Tabelle 2.1 ein Beitrag, der die Unsicherheit bei der Hochrechnung auf die maximale Exposition durch den zeitlich nicht hundertprozentig konstanten Signalverlauf während des Downlinkburst repräsentiert. Wie bereits erwähnt, ergeben sich hier Unterschiede je nach verwendeter Messmethode (spektrale Messung, Kanalleistungsmessung, Messung im Zeitbereich). Um einen Eindruck über den Einfluss des schwankenden Signalverlaufs auf die Expositionsbestimmung anzugeben, wurden die Signale von vier WiMAX-Anlagen mittels Zeitbereichsmessung exakt dokumentiert (vgl. Bild 2.10). Die mittlere Leistung dieser Signale wurde anschließend auf drei verschiedene Arten ermittelt:

- Möglichst genau durch exaktes Auswerten der zeitlichen Signalabgabe (dies ist sehr aufwändig und nur mittels der Zeitbereichsmessung möglich).
- Worst-Case Ansatz durch Heranziehen des Beaconsignals als Referenzwert und Multiplikation mit dem Tastverhältnis für maximale Auslastung (wie es bei der spektralen bzw. der Kanalleistungsmessung der Fall ist).

- Vereinfachte Auswertung des Zeitsignals: Als Referenzwert für die Multiplikation mit dem Tastverhältnis wird nicht das Beaconsignal, sondern der über vergleichsweise lange Zeit konstante Downlinksubframe herangezogen.

Folgende Tabelle gibt die bei Anwendung dieser drei Verfahren ermittelten mittleren Leistungen für die vier Signale an:

Messung Nr.	Station	Mittlere Leistung (exakt aus Zeitverlauf)	Mittlere Leistung aus Beacon	Mittlere Leistung aus Downlinksubframe
1	Elchingen Ost	-41,1 dBm	-33,0 dBm	-41,3 dBm
2	Elchingen West	-46,2 dBm	-38,1 dBm	-46,5 dBm
3	Rißtissen	-60,7 dBm	-53,6 dBm	-60,5 dBm
4	Schnürpflingen	-45,3 dBm	-39,4 dBm	-47,3 dBm

Tabelle 2.2: Mittlere Signalleistungen verschiedener WiMAX Stationen, ermittelt mittels unterschiedlicher Verfahren.

Die Auswertung zeigt deutlich, dass in den obigen Beispielen die (aktuelle) Exposition signifikant überbewertet wird, wenn man das Beaconsignal als Referenzwert für die Mittelwertbildung heranzieht. Im Mittel wurde bei diesen vier Messungen eine Überbewertung von 7,4 dB festgestellt. Mittels spektraler bzw. Kanalleistungsmessungen kann also die Einhaltung von Grenzwerten sicher nachgewiesen werden. Ergeben sich bei derartigen Messungen allerdings Überschreitungen der Grenzwerte von einigen dB, so ist auf jeden Fall zusätzlich die genauere Auswertung des Zeitsignals zu empfehlen, um exaktere Expositionswerte zu erhalten.

Wesentlich geringere Differenzen ergeben sich zwischen der genauen Auswertung des Zeitsignals und der vereinfachten Betrachtung (Leistung des Downlinksubframe). Die mittlere Abweichung wurde bei diesen vier Auswertungen zu ca. -0,5 dB bestimmt. Es ist also festzuhalten, dass mit dieser vergleichsweise einfachen Auswertung der exakte Wert für die aktuelle Exposition bereits relativ korrekt abgebildet wurde, allerdings ergibt sich der Trend zur leichten Unterbewertung der Exposition, was insbesondere bei grenzwertnahen Messwerten beachtet werden sollte.

Grundsätzlich sollte aber nicht vergessen werden, dass man bei Zeitbereichsmessungen vor Ort nie sicher sein kann, wirklich das ungünstigste Zeitbereichssignal (also das Signal mit maximaler mittlerer Leistung) messen zu können, da dies *nur bei entsprechender Auslastungssituation* auftritt (siehe dazu auch Bild 2.11). Daher wird es in der Regel nicht möglich sein, die Immissionserfassung für maximale Auslastung mittels der Zeitbereichsmessung durchzuführen (man bedenke auch den sich für Messung und Auswertung ergebenden erhöhten Zeitaufwand). In diesen Fällen bietet die Worst-Case Erfassung mittels Auswertung des Beaconsignals einen guten Kompromiss aus Zeitaufwand, Sicherheit und Genauigkeit.

2.2.1.3 Empfindlichkeit und Nachweisgrenzen

Ziel des nachfolgenden Abschnitts ist die Abschätzung von Empfindlichkeitsgrenzen der frequenzselektiven Messtechnik unter Berücksichtigung der in den vorangegangenen Abschnitten definierten Einstellparameter. Die Empfindlichkeitsgrenzen werden mit den Mindestversorgungspegeln für eine WiMAX-Versorgung verglichen.

Eine Abschätzung von *Mindest-Versorgungsfeldstärken* kann aus der Empfängerempfindlichkeit (R_{SS}) der eingesetzten Endgeräte erfolgen, die wiederum aus der minimalen Signal- zu Rauschleistung (SNR_{min}) berechnet wird, die im WiMAX-Standard für jede der möglichen Codier- und Modulationsschemen definiert ist. Nach [MAU 07] sind in dem für WirelessMAN-OFDM definierten PHY-Profilen Mindestanforderungen für die Empfängerempfindlichkeit definiert, die von der Bandbreite und dem Modulationsverfahren abhängen. Die Bandbreite der Empfängerempfindlichkeiten reicht dabei von -94 dBm (Bandbreite 1,75 MHz, BPSK-1/2) bis zu -68 dBm (Bandbreite 10 MHz, 64-QAM-3/4). Unter Annahme eines Empfangsantennengewinns von etwa 16 dBi und eines Betrages von 3 dB zur Berücksichtigung aller Verluste im Empfänger (z.B. Leitungsverluste) lassen sich hieraus die notwendigen Versorgungsfeldstärken berechnen. Sie liegen im Bereich zwischen 41 dB μ V/m (R_{SS} =-94 dBm) und 67 dB μ V/m (R_{SS} =-68 dBm).

Die *Messempfindlichkeit* des spektralen Messsystems ist nach [BOR 06-2] vom Spektrumanalysator, der eingesetzten Messantenne und vom HF-Verbindungskabel abhängig. Grundüberlegung ist hierbei, dass nur solche Expositionssignale gemessen werden können, die größer als das Grundrauschen des Messgerätes sind. Neben dem gewählten Gerätetyp sind für das Grundrauschen vor allem die Einstellparameter entscheidend, und zwar insbesondere die Auflösebandbreite, die Vordämpfung und der Detektortyp.

Für den hochwertigen Labor-Spektrumanalysator der Firma Rohde & Schwarz FSP-7 beträgt das Grundrauschen für den Parametersatz RBW=1 MHz, 0 dB Vordämpfung, RMS-Detektor mit 100 ms Sweepzeit etwa 17 dB μ V. Für ein tragbares Gerät des selben Herstellers (FSH-6) liegt bei gleichen Parametern das Grundrauschen bei etwa 33 dB μ V.

Der maßgebliche Parameter der verwendeten Messantenne in der Empfindlichkeitsbetrachtung ist der so genannte Antennenfaktor K (in dB/m). Er bezeichnet als Wandlungsmaß das Verhältnis zwischen der elektrischen Feldstärke des Feldes, in dem sich die Antenne befindet, zur anliegenden Hochfrequenzspannung am Antennenfußpunkt. Die Antennenfaktoren sind im Allgemeinen frequenzabhängig. In Tabelle 2.3 sind für drei Typen von prinzipiell einsetzbaren Antennenarten die jeweiligen Antennenfaktoren angegeben.

Antenne	Typ	Hersteller	Antennenfaktor [dB/m]	
			bei 3,5 GHz	bei 5,8 GHz
USLP-9142	logarithmisch-periodisch	Schwarzbeck	34,6	39,3
EMCO-3115	Breitbandhorn	EMCO	32,0	34,8
SBA-9112	bikonisch	Schwarzbeck	45,7	48,7

Tabelle 2.3: Antennenfaktoren von zur Messung von WiMAX-Expositionen geeigneten Antennen

Zusammen mit den typischen Kabeldämpfungen von geeigneten Messkabeln (Länge z.B. 3 m, typ. 3 dB bei 3,5 GHz und 5 dB bei 5,8 GHz) lassen sich hieraus die erzielbaren Empfindlichkeiten des gesamten Messsystems ableiten:

Antenne	Analysator	erzielbare Empfindlichkeit [dB μ V/m]		Mindestversorgungs- feldstärke [dB μ V/m]	Grenzwert nach 26. BlmSchV [dB μ V/m]
		bei 3,5 GHz	bei 5,8 GHz		
USLP-9142	FSP-7	55	61	40-70	156
	FSH-6	71	76		
EMCO-3115	FSP-7	52	57		
	FSH-6	68	73		
SBA-9112	FSP-7	66	71		
	FSH-6	82	87		

Tabelle 2.4: Erzielbare Empfindlichkeiten für WiMAX in Abhängigkeit von Antenne, Analysator und Frequenz, Parameter RBW=1 MHz, RMS-Detektor, Sweeptime=100 ms, Eingangsdämpfung 0 dB, minimaler Referenzpegel

Fazit:

- Mit den ausgewählten Spektrumanalysatoren und Antennen ist eine Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte sicher gegeben. Selbst mit der ungünstigsten Kombination von Analysator und Antenne besteht etwa 70 dB Empfindlichkeitsreserve des Messsystems zu den Grenzwerten.
- Im direkten Umfeld der WiMAX-Basisstation ist mit logarithmisch-periodischen und Hornantennen ein sicherer Nachweis des WiMAX-Signals gegeben. Am Rand der Versorgungszelle kann es allerdings dazu kommen, dass auch unter Verwendung von stärker richtenden Hornantennen das Messsystem nicht mehr in der Lage ist, den Signalpegel zu messen.
- Bei Verwendung von schwächer richtenden Antennen (bikonische Antennen) sinkt die Empfindlichkeit nochmals um mehrere dB, so dass hiermit die Exposition nur in unmittelbarem Umfeld der Anlage messbar ist.
- Das Labormessgerät hat, bedingt durch das hier ermittelte um etwa 16 dB bessere Grundrauschen, eindeutige Empfindlichkeitsvorteile gegenüber dem mobilen Messgerät und ist in Verbindung mit stark richtenden Antennen am besten für Messungen im Umfeld von WiMAX-Stationen geeignet. Nachteilig ist hier jedoch die fehlende Mobilität sowie die Notwendigkeit einer externen Stromversorgung. Das mobile Gerät hingegen dürfte aufgrund seiner begrenzten Empfindlichkeit nur in unmittelbarer Umgebung der Station, keinesfalls jedoch am Zellrand, einsetzbar sein.

Speziell bei Mobile WiMAX haben die Endgeräte aufgrund der geforderten Mobilität stellenweise einen wesentlich kleineren Empfangsgewinn als 16 dBi. Dies muss dann durch eine entsprechende Erhöhung der basisstationsseitigen Sendeleistung kompensiert werden, so dass sich die Nachweisgrenze vergrößert.

2.2.1.4 Reproduzierbarkeit

Im Rahmen der Studie wurden auch Untersuchungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit von WiMAX-Messungen durchgeführt. Zum Ansatz kam dabei das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Messverfahren mittels Schwenkmethode (Max-Hold) im Zeitbereich (Zero-Span). Die Messungen wurden an einer Anlage in der Kruppstraße in Wuppertal durchgeführt, wo die Deutsche Breitband Dienste GmbH im Frequenzblock D auf den früheren WLL-Frequenzen eine WiMAX-Anlage betreibt. Vom Messpunkt aus bestand direkte Sicht auf die Sendeanlage.

Die Messungen wurden von zwei Personen jeweils drei mal durchgeführt. In Tabelle 2.5 sind die Messwerte aufgelistet.

Wie aus Tabelle 2.5 ersichtlich ist, beträgt die Spanne zwischen den Versuchen und den unterschiedlichen Messpersonen lediglich 0,9 dB. Somit kann von einer guten Reproduzierbarkeit der Messungen gesprochen werden.

Person	Versuch	Messwert [dB μ V/m]
1	1	99,3
1	2	99,9
1	3	99,0
2	1	99,5
2	2	99,8
2	3	99,1

Tabelle 2.5 Ergebnisse der Reproduzierungsmessungen



Bild 2.14 WiMAX-Anlage in Wuppertal, an der die Reproduzierbarkeitsmessungen durchgeführt wurden

2.2.2 Örtlich und zeitlich gemittelte Durchschnittswerte

2.2.2.1 Beschreibung des Messverfahrens

Im Unterschied zu Messungen, die dem Zweck der Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten dienen, benötigt man z.B. für epidemiologische Studien häufig eine Größe zur Charakterisierung der typischen durchschnittlichen Exposition von Personen. Daher würde es wenig Sinn machen, die örtlich und zeitlich maximierten Messwerte, wie sie mit den Verfahren aus Abschnitt 2.2.1 gewonnen werden, für derartige Untersuchungen zu verwenden. Vielmehr ist es hier angebracht einen Immissionswert durch örtliche und zeitliche Mittelung der Exposition zu gewinnen. Prinzipiell kann dies auf zwei Arten geschehen (siehe Bild 2.15):

- Messung der aktuell vorhandenen Immission im betrachteten Volumen (z.B. ein Wohnraum) an einer ausreichend großen Anzahl von Einzelpunkten mit anschließender Mittelwertbildung.
- Permanente Messung der Felder mit einer entsprechend Software gesteuerten Messeinrichtung und gleichzeitiger Bewegung der Antenne innerhalb des Messvolumens (Volumenscan) mit anschließender Mittelwertbildung [BOR 06-2].

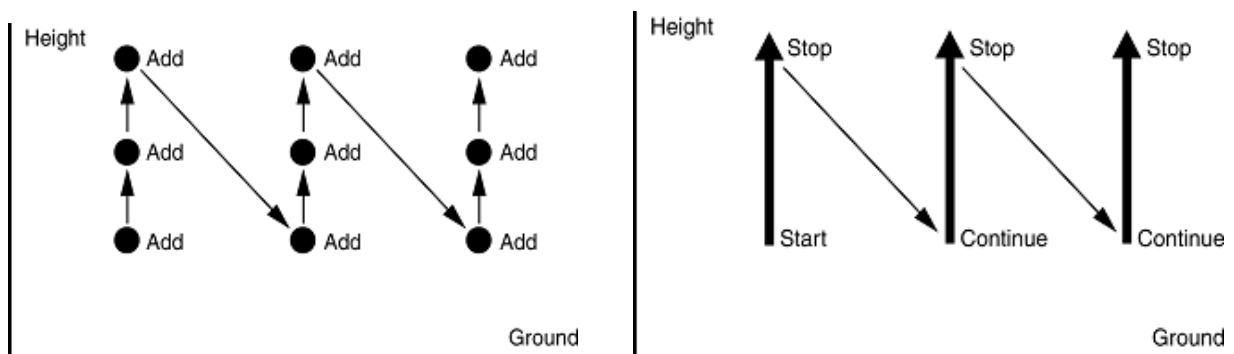


Bild 2.15: Bestimmung der örtlich und zeitlich gemittelten Exposition mittels Einzelpunktmessung (links) oder kontinuierlicher Erfassung (rechts); (Quelle: Narda Safety Test Solutions).

Für das zweite Verfahren sind isotrope Antennen unverzichtbar, das erste Verfahren kann zwar prinzipiell auch unter Verwendung einachsiger Dipolantennen durchgeführt werden (Einzelmessung der drei orthogonalen Polarisierungen am Messpunkt mit anschließender vektorieller Addition), allerdings ist dabei zu bedenken, dass aufgrund des Zeitbedarfs für die Messung der drei Achsen die Resultate insbesondere bezüglich der variablen Auslastung unter Umständen unkorreliert zu einander sind und deren Addition daher eigentlich nicht zulässig ist. Beim zweiten Verfahren ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Abtastgeschwindigkeit im Messvolumen an die Messgeschwindigkeit des Analysators (Sweepzeit) angepasst ist, so dass eine ausreichend dichte Abtastung des Volumens sichergestellt ist.

Da derzeit von den Herstellern (noch) keine isotropen Sonden für den Frequenzbereich über 3 GHz angeboten werden, sind derartige Durchschnittsmessungen bei WiMAX-Signalen nur mit Breitbandsonden möglich. Einige Breitbandmessgeräte unterstützen die Vorgehensweise bei der Bestimmung der mittleren Exposition auch durch spezielle Messmodi. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass eine Breitbandmessung nur bei Feldern ab etwa 0,5 V/m möglich ist.

Im nächsten Abschnitt wird geprüft, ob die derzeit angebotenen Isotropsonden für frequenzselektive Messungen eventuell auch noch im Frequenzbereich über 3 GHz verwendbar sind.

Besonders geeignet für eine Erfassung der örtlich und zeitlich gemittelten Exposition erscheint die Messung im Frequenzbereich, da hiermit auch mehr als ein Signal gleichzeitig erfasst werden kann. Aber auch die Kanalleistungsmessung ist im Prinzip zur Erfassung räumlicher und zeitlicher Durchschnittswerte verwendbar.

Unbedingt ist darauf zu achten, dass die Verweilzeit pro Pixel mindestens der Dauer eines Frame des WiMAX-Signals entspricht (Sweepzeit entsprechend einstellen!), damit der Analysator die *mittlere* Feldstärke eines Frames anzeigt und nicht mehr (wie es bei den Messungen in Abschnitt 2.2.1 notwendig war) den Maximalwert.

Manche Spektrumanalysatoren bieten zusätzlich auch die Möglichkeit, eine Messung im Zeitbereich wie mit einem Messempfänger durchzuführen („Receiver Mode“). Die Messung findet bei fester Mittenfrequenz und Auflösungsbreite permanent statt. Das Ergebnis wird allerdings nicht in Grafikform über der Zeit dargestellt, sondern als numerischer Wert ausgegeben. Falls in diesem Mode eine ausreichend große Messbandbreite eingestellt werden kann und ein RMS-Detektor vorhanden ist, kann damit ebenfalls der zeitliche Durchschnittswert der Exposition für einzelne Punkte ermittelt werden (Mittelungszeit wieder mindestens so groß wie ein Frame). Eine äquivalente Vorgehensweise hierzu ist auch das neu entwickelte Verfahren, das unter Abschnitt 2.2.3 vorgestellt wird (Langzeitmessung mit extrem hoher Sweepzeit und nachträglicher Mittelung über alle Pixel).

2.2.2.2 Untersuchungen zur Isotropie

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, sind zur Erfassung von örtlich und zeitlich gemittelten Durchschnittswerten isotrope Antennen Voraussetzung. Hierfür existieren z.B. mit dem Messsystem „TS-EMF“ der Firma Rohde & Schwarz oder mit dem selektiven Strahlungsmessgerät „SRM-3000“ der Firma Narda Safety Test Solutions kommerzielle Lösungen. Allerdings sind die bei diesen Systemen verwendeten isotropen Antennen nur bis zu einer Frequenzobergrenze von 3 GHz spezifiziert und können deswegen nicht ohne weiteres für Messungen an WiMAX-Funksystemen bei 3,5 GHz und 5,8 GHz verwendet werden.

Die Isotropsonde des SRM-3000 ist nur mit dem dazugehörigen Grundgerät zu betreiben, das seinerseits eine Frequenzobergrenze von 3 GHz hat. Überprüfungen der Sondereigenschaften bei Frequenzen oberhalb von 3 GHz sind deswegen mit Hinblick auf einen praktischen Messeinsatz des Gerätes nicht sinnvoll.

Anders verhält es sich bei der Isotropsonde des Messsystems „TS-EMF“: Diese Sonde kann mit geeigneten Spektrumanalysatoren auch oberhalb von 3 GHz betrieben werden, wobei hierzu die zugehörigen Antennenfaktoren zu ermitteln sind. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden der Einfachheit halber die selben Antennenfaktoren wie bei 3 GHz verwendet. Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es festzustellen, wie groß die Einbußen in der Isotropie der Isotropsonde werden, wenn sie bei 3,5 GHz (repräsentativ für den WiMAX-Frequenzbereich 3.400 - 3.600 MHz) und 5,8 GHz (repräsentativ für das lizenzfreie 5 GHz WiMAX Band) *außerhalb* ihres spezifizierten Frequenzbereiches betrieben wird.

Hierzu wurden Messungen in der EMV-Absorberkammer der IMST GmbH wie folgt durchgeführt: Nach Bild 2.16 wurde das TS-EMF-Messsystem mit der Isotropantenne auf den Drehtisch platziert (vordere Bildhälfte) und in 4,7 m Entfernung in gleicher Höhe von 1,5 m eine Sendeantenne aufgestellt (Schwarzbeck Breitbandhorn BBHA 9120-B). Die Sendeantenne wurde mit einem CW-Signal eines angeschlossenen Signalgenerators (Rohde & Schwarz SMIQ) bei 3,5 und 5,8 GHz gespeist. Der Boden zwischen Sendeantenne und TS-EMF wurde zur Dämpfung von Bodenreflexionen mit Absorbern ausgekleidet.

Die Messungen wurden durchgeführt

- bei vertikaler und horizontaler Polarisation der Sendeantenne,
- bei drei verschiedenen Positionen der Empfangs-Isotropantenne, und zwar
 - aufrecht stehend wie in Bild 2.16,
 - waagrecht montiert wie in Bild 2.17 links, geriffelte Seite des Griffes zur Seite,
 - waagrecht montiert wie in Bild 2.17 rechts, geriffelte Seite des Griffes nach unten.



Bild 2.16: Messaufbau zur Überprüfung der Isotropie der Sonde, hier Position 1

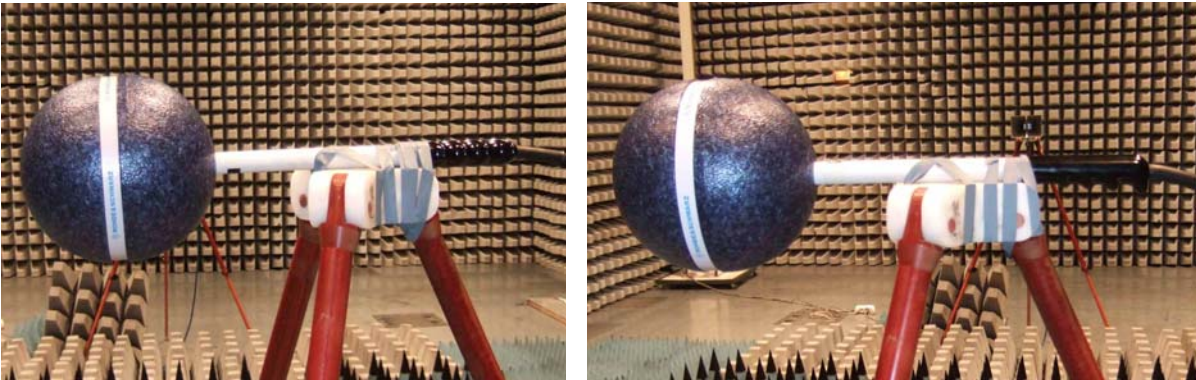


Bild 2.17 Position 2 (Griffriffelung zur Seite, links) und 3 (Griffriffelung nach unten, rechts). Die kugelförmige Isotropantenne befindet sich exakt im Drehtischzentrum.

Durch 360°-Drehung der Isotropantenne in allen drei Positionen und mit beiden Polarisierungen können die Isotropieeigenschaften der Antenne hinreichend gut charakterisiert werden.

In den Bildern 2.18 bis 2.21 sind die Ergebnisse für 3,5 GHz und 5,8 GHz für beide Sendepolarisationen dargestellt. Die Ergebnisse sind auf den pro Frequenz und Polarisation auftretenden Maximalwert normiert.

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den Messungen ziehen:

- Für vertikale Sendepolarisation und aufrecht stehender Isotropantenne (Position 1) ist bei beiden Frequenzen eine gute Isotropie gegeben. Dies ist offensichtlich die „günstigste Ausrichtung“ von Feldpolarisation zu Antenne, da die Empfangsspannung jeweils nur vom senkrecht stehenden Monopol dominiert wird (die beiden anderen Monopole sind kreuzpolar dazu angeordnet) und außerdem der Antennengriff bzw. das Antennenkabel kopolar zum Feld sind. Laut Kalibrierschein des Antennenherstellers beträgt die Isotropie in Position 1 und vertikaler Polarisation bei 3 GHz etwa $\pm 2,1$ dB, hat also eine Schwankungsbreite von 4,2 dB. Bei der oben dokumentierten Messung (Bild 2.18 oben) wurde für diese Anordnung bei 3,5 GHz eine maximale Schwankungsbreite von 2,5 dB festgestellt (bzw. bei Bezug auf den in Position 2 festgestellten maximalen Signalpegel 4,9 dB). Weiterführende Daten für andere Positionen bzw. horizontale Polarisation bei 3 GHz sind den Kalibrierdaten nicht zu entnehmen, so dass hier ein Vergleich nicht möglich ist.
- Bei den Positionen 2 und 3 ist bei vertikaler Polarisation die Welligkeit größer (insbesondere bei 5,8 GHz), wobei interessanter Weise ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Positionen besteht.
- Bei horizontaler Sendepolarisation wird die Empfangsspannung aus der Kombination der beiden waagerecht liegenden Monopole gebildet; insofern ist hier durch die Drehung des Messsystems im Feld eine größere Richtungsabhängigkeit zu erwarten und auch zu beobachten. Wohingegen diese bei 3,5 GHz noch einigermaßen tolerabel sind, ist bei 5,8 GHz doch eine deutliche Aufzipfelung des Empfangsdiagramms zu beobachten, die für isotrope Messungen unzureichend ist.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass die Isotropantenne des Messsystems „TS-EMF“ von Rohde & Schwarz, obwohl sie nur bis zu einer Frequenzobergrenze bis 3 GHz spezifiziert ist, mit einigen Einschränkungen auch für WiMAX-Messungen bei 3,5 GHz verwendet werden kann. Bei 5,8 GHz ist sie aber aufgrund der zu großen Aufzipfelung des Antennendiagramms (Abweichung der Isotropie von mehr als 20 dB) für isotrope Messungen nicht mehr einsetzbar.

Somit sind isotrope Messungen bei WiMAX im Frequenzbereich 5 GHz derzeit nicht (bzw. nur an fixen Punkten mit manueller Umpositionierung der dipolartigen Einzelsonde) durchführbar. Es bleibt abzuwarten, in wieweit seitens der Hersteller dieses Problem in den nächsten Monaten angegangen wird.

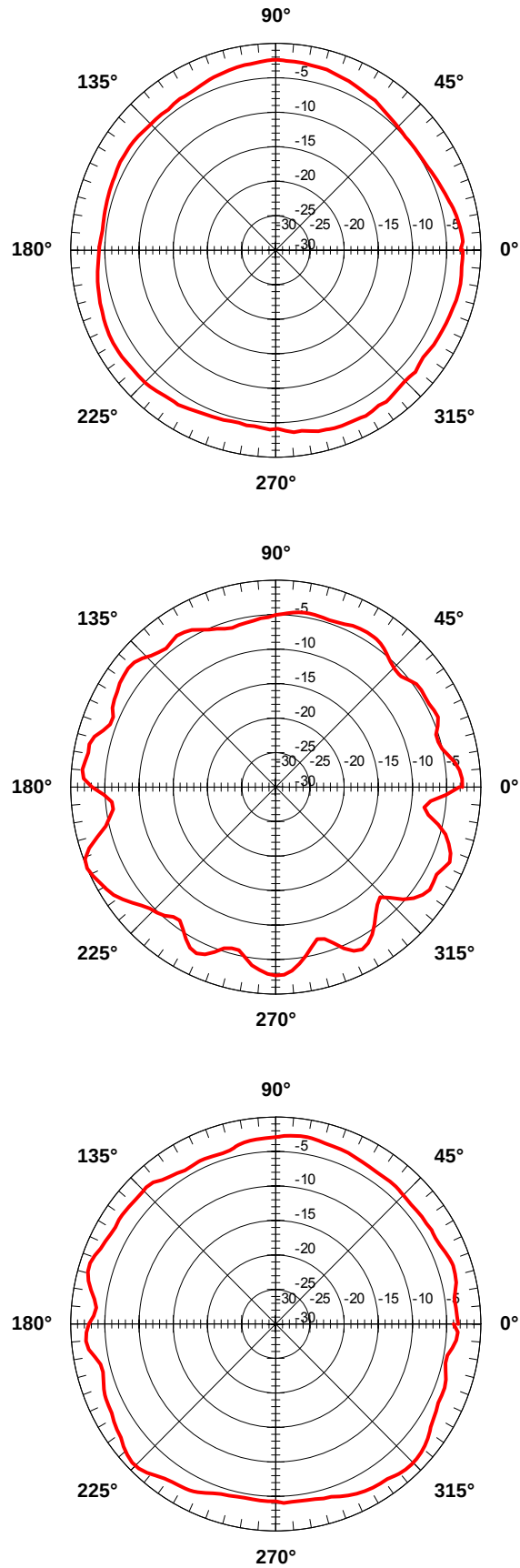


Bild 2.18: Ergebnisse 3,5 GHz vertikale Sendepol., Position 1 (oben), 2 (Mitte), 3 (unten)

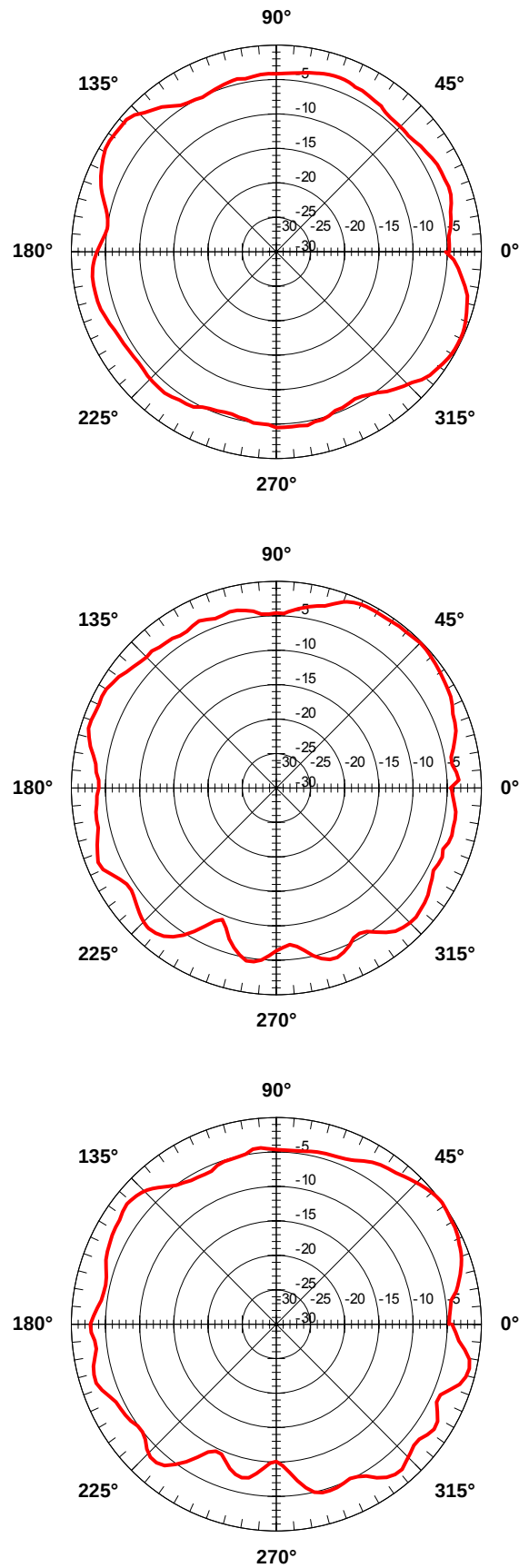


Bild 2.19 Ergebnisse 3,5 GHz horizontale Sendepol., Position 1 (oben), 2 (Mitte), 3 (unten)

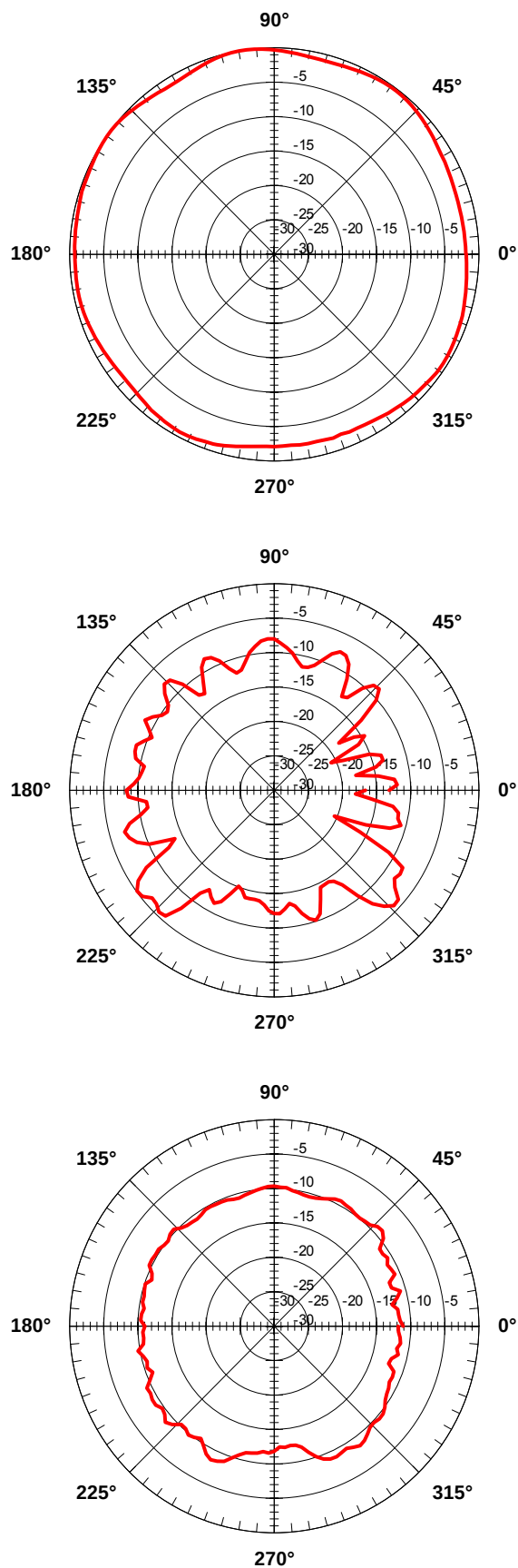


Bild 2.20

Ergebnisse 5,8 GHz vertikale Sendepol., Position 1 (oben), 2 (Mitte), 3 (unten)

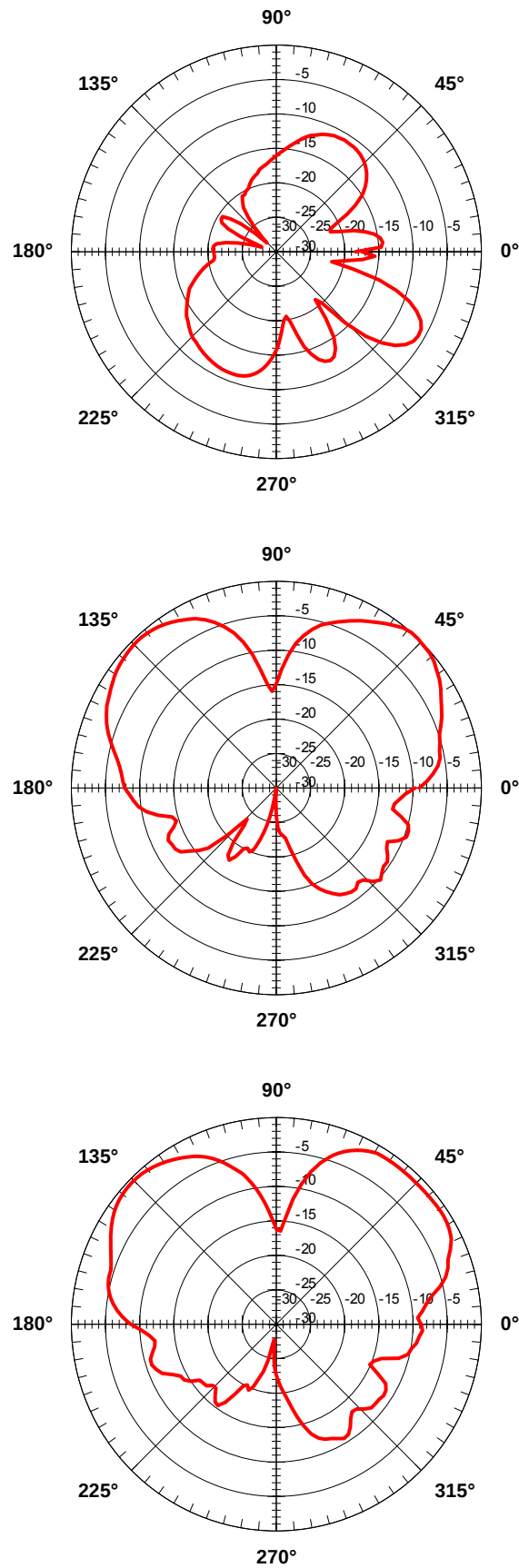


Bild 2.21 Ergebnisse 5,8 GHz horizontale Sendepol., Position 1 (oben), 2 (Mitte), 3 (unten)

2.2.3 Langzeitmessungen

Die optimale Antenne für Langzeitmessungen ist natürlich die Isotropantenne, da nur mit ihr ein Signal mit unbekannter Polarisation und Einfallsrichtung korrekt erfasst werden kann. Langzeitmessungen von WiMAX-Signalen mit Breitbandsonden stellen somit kein prinzipielles Problem dar, so lange die zu messende Feldstärke oberhalb der Empfindlichkeitsgrenze von Breitbandmessgeräten liegt. Bei Signalen mit zeitlich variierender Pulslänge sind dann allerdings Thermoelementsonden zu verwenden und keine Sonden mit Diodengleichrichter, damit die schwankende mittlere Leistung der WiMAX-Anlagen korrekt erfasst wird.

Sind die Felder zu schwach, als dass Breitbandmessgeräte verwendet werden können, bzw. liegt ein multifrequentes Expositionsszenario vor, muss eine frequenzselektive Langzeitmessung vorgenommen werden. Dafür existieren derzeit jedoch auf dem Markt noch keine Isotropsonden. Wie in Abschnitt 2.2.2.2 dargestellt, können die derzeit verfügbaren Sonden mit Einschränkungen noch im 3,5-GHz-Bereich eingesetzt werden. Eine weitere Alternative stellt die Verwendung einer schmalbandigen Einachssonde mit einer vertikalen Monopolantenne über einer Groundplane dar, mit der zumindest im Azimut ein Rundstrahlverhalten erzielt werden kann. Eine derartige Antenne kann eingesetzt werden, wenn es weniger um hundertprozentig korrekte absolute Messergebnisse geht, sondern um die reine Beobachtung des zeitabhängigen Abstrahlverhaltens von Sendeanlagen. Sind die zu messenden WiMAX-Signale sehr schwach, so dass Isotropantennen oder Monopole aufgrund ihres geringen Antennengewinns kein ausreichend starkes Messsignal mehr liefern, ist notfalls auch die Verwendung von Richtantennen (z.B. Log-Per oder Horn) denkbar. Hier sollte man allerdings bedenken, dass in diesem Fall die Absolutmessung der Immission nicht mehr verlässlich ist und nur noch Auskünfte über Immissionsschwankungen zur Verfügung gestellt werden können.

Als Messverfahren für Langzeitmessungen ist die frequenzselektive Erfassung denkbar. Hier wird, wie in Abschnitt 2.2.1 bereits beschrieben, durch eine ausreichend lange Verweilzeit pro Pixel der aktuelle mittlere Leistungswert der einzelnen WiMAX-Signale gemessen und abgespeichert. Natürlich ist alternativ auch die Kanalleistungsmessung als Verfahren möglich. Die Messung im Zeitbereich hingegen ist für eine Software gesteuerte Langzeiterfassung üblicherweise weniger geeignet, es sei denn, das Messgerät kann auch (wie in Abschnitt 2.2.2.1 bereits erwähnt) als Messempfänger betrieben werden.

Allerdings lässt sich im Zeitbereich bei Verwendung einer extrem langen Sweepzeit die Veränderung der Leistung, verursacht durch ein Funksignal, auf einfache Weise direkt auf dem Schirm eines Analysators darstellen, wie folgendes Bild verdeutlicht:

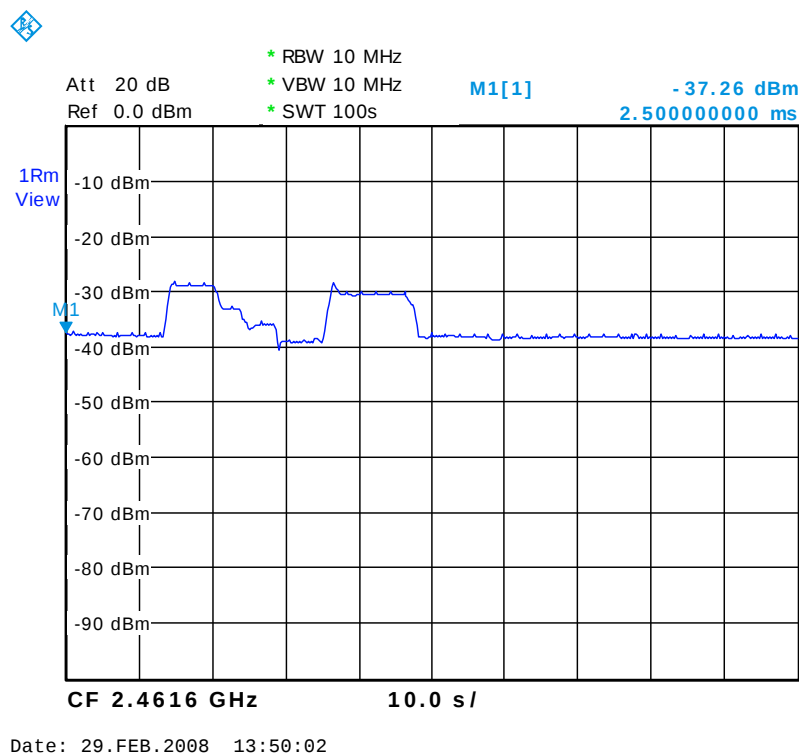


Bild 2.22: Direkte Darstellung der zeitlichen Veränderung der mittleren Leistung eines gepulsten Funksignals (hier Beaconsignal eines WLAN-Accesspoints) für einen Zeitraum von 100 Sekunden.

Die in Bild 2.22 sichtbaren Schwankungen der mittleren Exposition wurden durch Veränderung des Abstandes zwischen Sender und Messantenne erzeugt. Durch die sehr lange Sweepzeit wird sichergestellt, dass am Schirm die mittlere Feldstärke des gepulsten Signals dargestellt wird. Diese „Langzeitmessung“ ist einfach zu realisieren und benötigt keinen zusätzlichen Steuerrechner mit spezieller Software. Jedoch sind mit diesem Verfahren, je nach der am Analysator maximal einstellbaren Sweepzeit, nur „Langzeitmessungen“ über einen Zeitraum von einigen Minuten möglich. Danach wird die Messung entweder angehalten („Single Sweep“) oder das Ergebnis in einem neuen Durchlauf überschrieben.

Das hier beschriebene Verfahren ist nach Kenntnis der Autoren in der Expositionsmesstechnik neuartig. Es stellt eine vergleichsweise einfache Möglichkeit dar, Langzeitmessungen (oder in Verbindung mit einer räumlichen Bewegung der Messantenne auch räumlich und zeitlich gemittelte Messungen, siehe Abschnitt 2.2.2.1) durchzuführen. Da seitens einiger Gerätehersteller (z.B. Rohde & Schwarz oder Narda Safety Test Solutions) Messtechniklösungen existieren, bei denen ohne externen Steuerrechner direkt im Spektrumanalysator eine Ansteuerung und Aufsummation der drei Einzelkomponenten bei einer isotropen Messung möglich sind, kann bei einer Messung im Feld das somit ermittelte Spektrum als Messkurve abgespeichert werden und im Labor nachträglich ausgewertet werden (z.B. als leistungsmäßige Mittelwertbildung über alle Pixel zur Erfassung des räumlichen und zeitlichen Durchschnittswertes).

2.3 Messungen an Endgeräten

Im Gegensatz zu den Ausführungen in Kapitel 2.2 werden im folgenden grundsätzliche Verfahren zur Messung der von den *Endgeräten* verursachten Immissionen vorgestellt. Insbesondere wird dabei beurteilt, in wieweit sich die in Kapitel 2.2 hergeleiteten Verfahren zur Messung der Exposition an Basisstationen auch an Endgeräten einsetzen lassen.

Bei der Expositionsbestimmung an Endgeräten wird unterschieden zwischen

- Feldmessungen und
- SAR-Messungen.

Feldmessungen werden dann eingesetzt, wenn Messungen im Fernfeld oder zumindest im strahlenden Nahfeld durchgeführt werden, d.h. bei Abständen von mehr als einer Wellenlänge (9 cm bei 3,5 GHz, 5 cm bei 5 GHz WiMAX). Für kürzere Abstände, d.h. bei körpernahen Anwendungen oder bei Körperkontakt, sind wegen der zu starken Verkopplung des Menschen mit dem Endgerät SAR-Messungen durchzuführen.

2.3.1 Feldmessungen

Genau genommen ist zur Expositionsbeurteilung die *Summenexposition* aus Basisstation und Endgerät relevant. Trotzdem kann es z.B. zu Studienzwecken interessant sein, den Anteil der Endgeräte zu separieren und getrennt zu untersuchen.

Hierbei ist es wichtig zu unterscheiden, mit welchem Duplexverfahren gearbeitet wird: Nach den gegenwärtigen Erkenntnissen

- werden die Mobile-WiMAX-Netze derzeit mit TDD aufgebaut,
- arbeiten existierende Fixed-WiMAX-Netze im lizenzierten Frequenzbereich von 3,4 bis 3,6 GHz im FDD Mode, und
- ist in den lizenzfreien Bändern (5 GHz) derzeit nur TDD zulässig.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Endgeräte mit einer Leistungsregelung arbeiten. Laut [FUJ 04] sollten Endgeräte ohne Subträger einen minimalen regelbaren Bereich von 30 dB vorweisen, während Geräte mit Subträgern mindestens einen Dynamikbereich von 50 dB bezüglich der Sendeleistung haben sollten. Die aktuelle Sendeleistung hängt dann vom Abstand zur Basisstation, den Ausbreitungseigenschaften des Funkkanals, der Kanalbandbreite und der verwendeten Modulation ab.

Wird der **FDD Mode** verwendet, senden Basisstation und Endgerät auf unterschiedlichen Frequenzen. Dies hat für die Expositionserfassung den Vorteil, dass unter Zuhilfenahme von Messungen mit Spektrumanalysatoren die Immission der Basisstation „ausgeblendet“

werden kann. Zur Messung sind dann prinzipiell alle in Kapitel 2.2 vorgestellten Verfahren - d.h. spektrale Messung, Kanalleistungsmessung und Zeitbereichsmessung - möglich. Bei einem Endgerätesignal, das innerhalb eines Sendepulses die Leistung ändert (siehe z.B. Bild 2.23) lässt sich allerdings - zumindest unter gleichzeitiger Anwendung der „Max-Hold“-Methode - mit dem spektralen Verfahren nur dann die *mittlere* Leistung erfassen, wenn die Verweilzeit pro Pixel mindestens der Dauer eines Frames des WiMAX-Signals entspricht (Sweepzeit entsprechend einstellen!). Bei kürzerer Sweepzeit würde der *Maximalwert* innerhalb des Pulses angezeigt werden, was einer Art „worst case“ Betrachtung entsprechen würde. Einer echten Extrapolation auf den maximalen Betriebszustand entspricht dies jedoch nicht, da nach gegenwärtigem Kenntnisstand das Endgerät anders als die Basisstation *kein* Präambelsignal ausstrahlt, das zur Hochrechnung verwendet werden kann. Die Exposition bei maximaler Auslastung eines Endgerätes lässt sich nur dann ermitteln, wenn das Endgerät mit einem Basisstationssimulator zum Senden auf definierter (maximaler) Leistung angesteuert wird. Im Abschnitt 2.3.2 werden solche Geräte vorgestellt.

Prinzipiell erscheinen auch Messungen mit Breitbandsonden geeignet, wobei die Einschränkungen bezüglich des Detektortyps in Abhängigkeit von der Variation der Breite des Sendepulses zu berücksichtigen sind (siehe Abschnitt 2.2.3). Endgeräte, die z.B. in den Fixed-WiMAX-Netzen der Deutschen Breitband Dienste GmbH eingesetzt werden, verfügen über Ausgangsleistungen von typisch 29 dBm EIRP. Somit sind hier unter Freiraumbedingungen in 1 m Entfernung Feldstärken von etwa 5 V/m und in 5 m Entfernung etwa 1 V/m zu erwarten, die mit Breitbandsonden noch gut aufgelöst werden können. Derzeit eingesetzte Endgeräte bei Mobile WiMAX (z.B. Zyxel) verfügen über ähnliche Sendeleistungen.

Im **TDD Mode** ist die Messung komplizierter, da Endgeräte und Basisstation auf derselben Frequenz senden und nur durch verschiedene Zeitabschnitte im Pulsregime separierbar sind. Dies ist z.B. mit der Situation bei einem WLAN-Netz vergleichbar, bei dem Access-Point und Endgerät(e) ebenfalls auf ein und derselben Frequenz arbeiten. Hier ist es dann von der Lage des Messpunktes abhängig, ob

1. die Exposition durch das Endgerät die Gesamtmission dominiert (Bild 2.23), oder
2. die Exposition der Basisstation die Gesamtmission dominiert (Bild 2.24), oder
3. beide Immissionsanteile vergleichbar sind.

Besonders interessant bezüglich der Exposition von Endgeräten sind hierbei natürlich Szenarien, bei denen die Immission des Endgerätes im Vordergrund steht.

In den Bildern 2.23 und 2.24 sind zu den ersten beiden Aufzählungspunkten Beispiele dargestellt: Bild 2.23 wurde in unmittelbarer Nähe eines Zyxel-Endgerätes (Innengerät, 27 dBm Ausgangsleistung) im ersten kommerziellen Mobile-WiMAX-Netz Deutschlands in Wadrill/Saarland aufgenommen (Betreiber: VSE-NET GmbH). Bild 2.24 stammt aus einem IMST-Versuchsaufbau mit den Komponenten Sequans SQN2110-RD2 (Basisstation) und SQN1130-RD2 (Endgerät, 22 dBm Ausgangsleistung).

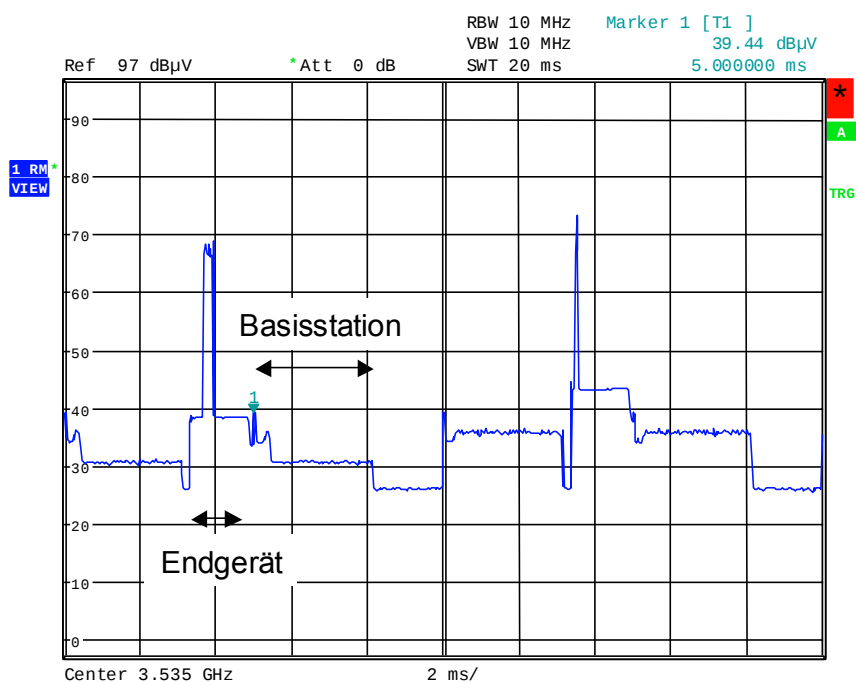


Bild 2.23: TDD Mode, Exposition durch das Endgerät ist größer als durch die Basisstation

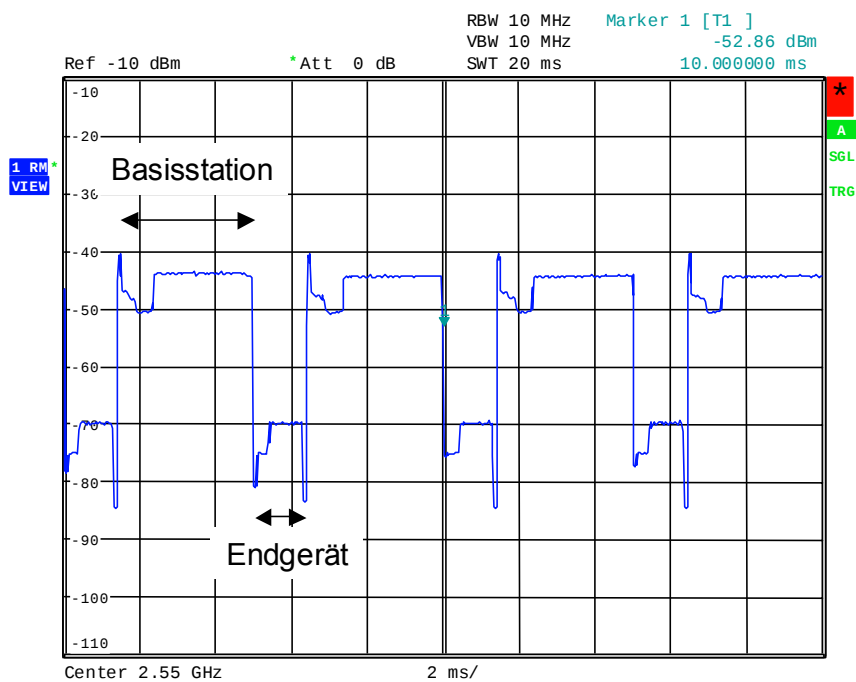


Bild 2.24: TDD Mode, Exposition durch die Basisstation ist größer als durch das Endgerät

Für den ersten Fall können prinzipiell spektrale Verfahren, Kanalleistungsmessung und Zeitbereichsmessung zur Erfassung der Immission eingesetzt werden. Beim spektralen Verfahren und der Kanalleistungsmessung wird die Exposition allerdings um den Anteil der Basisstation überbewertet, d.h. das Verfahren ist umso genauer, je kleiner der Expositionsanteil der Basisstation ist. Eine zeitliche Mittelung kann durch eine genügend große Sweepzeit erreicht werden (Verweilzeit pro Pixel mindestens so lange wie Dauer eines Frame des WiMAX-Signals). Bei kleinerer Sweepzeit muss dann aus der gemessenen Maximalleistung P_S äquivalent zur Formel 2.3 das Verhältnis der durchschnittlichen Uplinkdauer t_{Uplink} zur gesamten Rahmendauer T_{Frame} ins Verhältnis gesetzt werden:

$$P = P_S (t_{\text{Uplink}}/T_{\text{Frame}}) \quad (2.5)$$

Eine zusätzliche Berücksichtigung von unterschiedlichen Signalleistungen P_S zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb eines Uplink-Pulses (vgl. Bild 2.23) in Formel 2.5 ist zwar möglich, aber u.U. unpraktikabel, da sich dieses Verhältnis bei jedem Frame ändern kann. Es ist also hier anzuraten, zunächst mit einer Zeitbereichsdarstellung die Signalcharakteristika zu studieren und dann gegebenenfalls auf eine Channel-Power-Messung auszuweichen.

Eine exaktere Betrachtung, d.h. ohne Überbewertung des Anteiles durch die Basisstation, ist prinzipiell nur mit dem Zeitbereichsverfahren möglich. Wie oben beschrieben ist es hier unter Einsatz der Schwenkmethode von der eingestellten Sweepzeit abhängig, ob ein Mittelwert (dann allerdings wieder unter Einbeziehung der Immission der Basisstation), oder ein Spitzenwert (d.h. der durch das Endgerät verursachte) gemessen wird.

Auch der Einsatz von thermischen Breitbandsonden ist hier in Abhängigkeit des Abstands zum Endgerät möglich, wobei damit wiederum die Gesamtimmission gemessen wird.

Für den zweiten Fall (Exposition der Basisstation dominiert) sind weder Breitbandmessung, noch Kanalleistungsmessung oder spektrale Messung zulässig, da mit diesen die durch die Basisstation dominierte Gesamtimmission angezeigt wird. Als einziges verbleibt die Zeitbereichsmessung, die sich aber nicht mit der Schwenkmethode kombinieren lässt, da durch die damit verbundene „Max-Hold“-Funktion des Analyser auf dem Bildschirm die dominierende Exposition der Basisstation dargestellt wird.

Beim dritten Fall (Exposition von Basisstation und Endgerät vergleichbar) können wiederum alle Methoden eingesetzt werden, wobei jeweils eine Korrektur nach Formel (2.5) zur Separierung des Endgeräteanteils verwendet werden muss.

2.3.2 SAR-Messungen

2.3.2.1 Prinzipielles Messverfahren

Das in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Verfahren eignet sich primär zur Expositionsbestimmung im Fernfeld bzw. strahlenden Nahfeld des Endgerätes. Bei einem Betrieb des Endgerätes im Körperkontakt bzw. bei körpernaher Anwendung kann diese Messmethodik nicht mehr verwendet werden, da zwischen Körper und Endgerät eine starke elektromagnetische Verkopplung besteht. Zur Beurteilung eines solchen Expositionsszenarios muss das tatsächliche Befeldungsszenario mittels eines Phantoms nachgebildet werden. Außerdem macht es hier keinen Sinn, die „abgeleiteten Grenzwerte“ (also Feldstärken bzw. Leistungsflussdichten) zu messen, die als ungestörte Feldwerte ohne die Anwesenheit von Personen im Feld definiert sind. Statt dessen muss der relevante Basisgrenzwert, d.h. die Spezifische Absorptionsrate (SAR) direkt im Phantom gemessen werden.

Zur messtechnischen Ermittlung des SAR-Wertes werden spezielle Messsysteme verwendet, wie z.B. das System DASY4 der schweizerischen Firma SPEAG. Dieses bei der IMST GmbH im akkreditierten Laboreinsatz befindliche System ist als Prinzipskizze in Bild 2.25 dargestellt. Bild 2.26 zeigt den realen Messaufbau im Labor der IMST GmbH.

Das zu testende Gerät, in diesem Fall das WiMAX-Endgerät, wird in einer oder mehreren standardisierten Positionen mittels einer nichtmetallischen Haltevorrichtung am Phantom befestigt. Das Endgerät arbeitet dabei üblicherweise mit der maximal möglichen Sendeleistung. Anschließend wird die elektrische Feldstärke in dem mit gewebesimulierender Flüssigkeit gefüllten Phantom gemessen. Hierzu werden miniaturisierte Sonden mit hoher Empfindlichkeit und geringer Rückwirkung auf das Feld des Testgerätes verwendet, die mit einem Präzisionsroboter positioniert werden. Aus den gemessenen Feldstärkewerten wird unter Berücksichtigung der bekannten Massendichte ρ und der elektrischen Leitfähigkeit σ der Flüssigkeit die spezifische Absorptionsrate nach Formel 2.6 berechnet. Die Steuersoftware führt die für die Bewertung der Teilkörper-SAR-Werte notwendigen Mittelungen der SAR z.B. über 10 g Gewebenvolumen durch.

$$SAR = \sigma \frac{E^2}{\rho} = c \frac{\partial T}{\partial t} \bigg|_{t \rightarrow 0+} \quad (2.6)$$

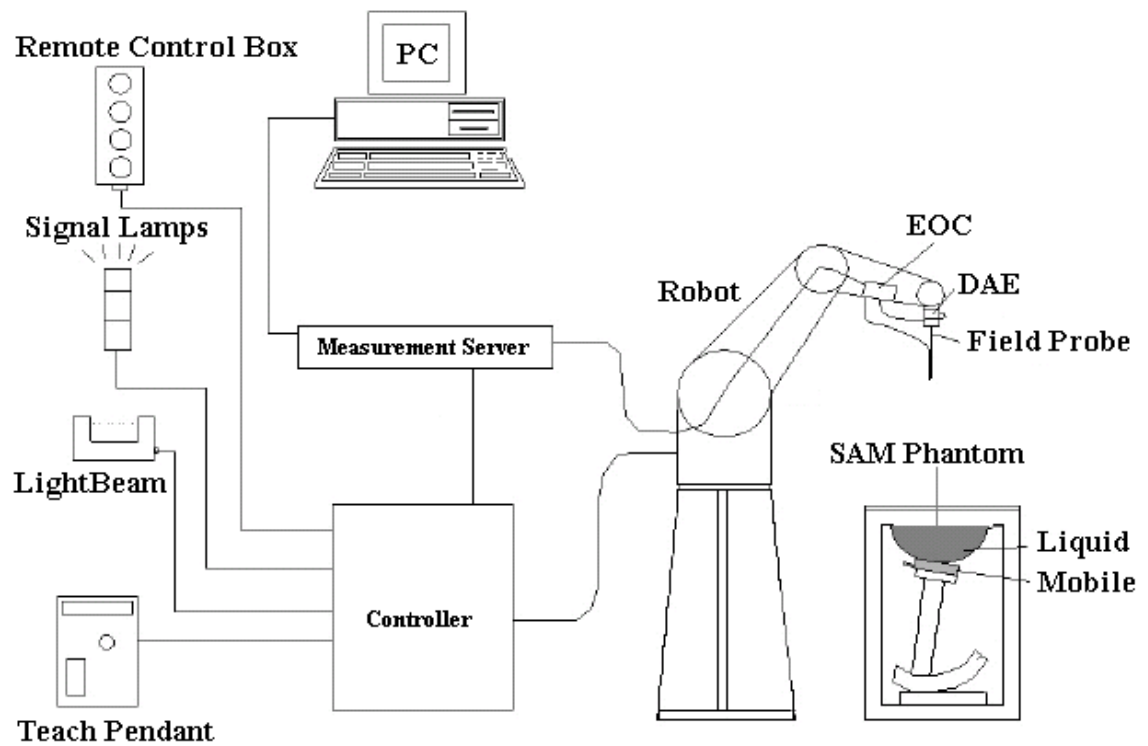


Bild 2.25: Das DASY4 Messsystem im Prinzipaufbau



Bild 2.26 Messaufbau mit zwei Phantomen, die mit gewebesimulierender Flüssigkeit gefüllt sind

Für die Anwendung des SAR-Messverfahrens auf die SAR-Bestimmung von WiMAX Endgeräten sind folgende Fragen zu diskutieren:

- Existieren entsprechende Produktnormen?
- Sind gewebesimulierende Flüssigkeiten für 3,5 GHz und 5,8 GHz spezifiziert?
- Sind Sonden in den genannten Frequenzbereichen verfügbar und sind diese ausreichend empfindlich?
- Wie kann eine definierte Ansteuerung der WiMAX-Endgeräte erfolgen?

Auf diese Fragen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

2.3.2.2 Anwendung der SAR-Messungen auf WiMAX-Endgeräte

Für die Durchführung von SAR-Messungen an WiMAX-Endgeräten erscheint die Anwendung der 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)*“ angebracht. Allerdings existiert diese Norm derzeit nur in einer Draft-Version; mit ihrer Verabschiedung ist aber kurzfristig zu rechnen. Teilweise erfolgen Messungen auch unter Bezugnahme auf die EN 50383 „*Basic Standard for the Calculation and Measurement of Electromagnetic Field Strength and SAR Related to Human Exposure From Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems (110 MHz - 40 GHz)*“, obwohl dieser eigentlich auf „Mobilfunk-Basisstationen und stationäre Teilnehmergeräte von schnurlosen Kommunikationseinrichtungen“ beschränkt ist, wozu allenfalls ein fest installiertes, keinesfalls aber ein mobiles Endgerät gehört. Außerdem ist der Anwendungsbereich von EN 50383 für SAR-Messungen auf eine Frequenzobergrenze von 3 GHz begrenzt.

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.

Die notwendige Empfindlichkeit der Proben wird mit mindestens 0,01 W/kg spezifiziert. Seitens der Firma SPEAG sind dreidimensionale E-Feld-Sonden des Typs EX3DV4 im für WiMAX relevanten Frequenzbereich bis 5,8 GHz verfügbar, die mit einer Mindestempfindlichkeit von 10 μ W/g (entsprechend 0,01 W/kg) spezifiziert sind.

Für eine Ansteuerung der Endgeräte in einen definierten Sendezustand existieren derzeit folgende Möglichkeiten: Stellenweise lassen sich einige Endgeräte im Prototypenstadium mittels einer speziellen Softwareversion in einen CW-Sendezustand definierter Leistung überführen. Die SAR beim späteren realistischen Sendezustand lässt sich nach den Messungen herunterskalieren. Darüber hinaus sind jedoch auch seitens einiger Messgerätehersteller Basisstationsemulatoren verfügbar, mit denen sich das Endgerät über die Luftschnittstelle ansteuern lässt. Beispiele hierfür sind der Rohde & Schwarz „CMW270 WiMAX Communication Tester“ oder das Agilent „E6651A Mobile WiMAX test set“.

2.4 Mehrantennentechniken

Der WiMAX-Standard lässt als Antennen für Basisstationen adaptive Antennen bzw. MIMO-Antennen (Multiple Input Multiple Output) zu. In diesem Abschnitt werden die genannten zukünftigen Antennentechniken kurz vorgestellt und Auswirkungen auf die Expositionsmesstechnik an Basisstationen abgeleitet.

Im Standard IEEE 802.16 sind drei verschiedene Mehrantennentechniken spezifiziert:

1. Space Time Coding (auch als MIMO Matrix A bezeichnet)
2. Spatial Multiplexing (auch als MIMO Matrix B bezeichnet) und
3. Adaptive Antennensysteme bzw. Beamforming.

2.4.1 Space Time Coding (STC)

Beim Space Time Coding wird ein einzelner Datenstrom repliziert und simultan über mehrere Antennen abgestrahlt. Befinden sich die Sendeantennen weit genug voneinander entfernt, so sind die Fading-Eigenschaften der jeweiligen Ausbreitungspfade zum Empfänger unabhängig voneinander. Die redundanten Datenströme werden mit einem „Space Time Block Code“ genannten mathematischen Algorithmus codiert. Durch diese Codierung ist jedes übertragene Signal orthogonal zu den anderen Signalen, wodurch die Eigeninterferenz reduziert wird und die Fähigkeit des Empfängers verbessert wird, multiple Signale zu unterscheiden. Durch diese mehrfache Übertragung des codierten Datenstroms über unabhängige Pfade steigt die Chance für den Empfänger, das Signal zuverlässig zu empfangen, selbst wenn einer der Pfade sehr starkem Fading unterliegt. Im Empfänger können zusätzlich so genannte „Maximum Ratio Combining (MRC)“ Techniken zur Kombination der Mehrfachsignale eingesetzt werden, um einen robusteren Empfang zu ermöglichen. Space Time Coding wird primär genutzt, um die Systemreichweite zu erhöhen. Die Datenübertragungsrate wird jedoch nicht vergrößert.

Bild 2.27 zeigt die Prinzipskizze für das Space Time Coding mit zwei Sende- und einer Empfangsantenne [aus MAU 07].

Da sich beim Space Time Coding die Abstrahlungseigenschaften der Antennen zeitlich nicht ändern, hat diese Mehrantennentechnik keine Auswirkungen auf die Expositionsmesstechnik.

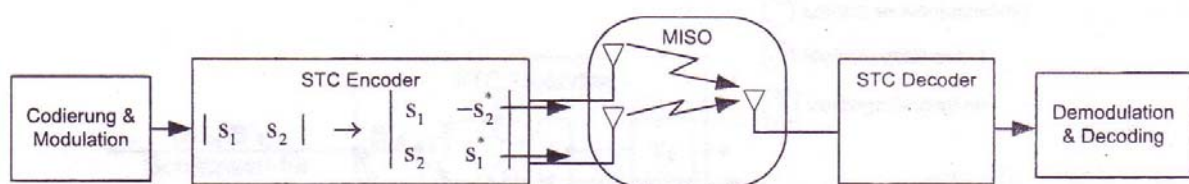


Bild 2.27: Prinzip des Space Time Coding mit zwei Sendeantennen, aus [MAU 07]

2.4.2 Spatial Multiplexing

Beim Spatial Multiplexing wird das zu übertragende Signal in mehrere Einzeldatenströme aufgeteilt. Jeder Teildatenstrom wird über eine andere Sendeantenne abgestrahlt. In Bild 2.28 ist dies in einer Prinzipskizze dargestellt (aus [MAU 07]): Ein seriell ankommender Datenstrom aus $M_t \cdot z$ Modulationssymbolen wird in M_t parallele Blöcke mit jeweils z Symbolen aufgeteilt und über M_t Sendeantennen übertragen. Auch hier müssen durch einen Mindestabstand der Antennen die Ausbreitungspfade unkorreliert sein. Unter der Annahme einer Mehrwegeumgebung treffen die unterschiedlichen Sendesignale an den Empfangsantennen mit genügend unterschiedlichen räumlichen Signaturen ein und ermöglichen im Empfänger eine Unterscheidung der verschiedenen Datenströme. Das Spatial Multiplexing ermöglicht gegenüber STC einen Durchsatzgewinn, d.h. eine höhere Datenrate bei gleich bleibender Robustheit.

Auch beim Spatial Multiplexing ändern sich die Abstrahlungseigenschaften der Antennen zeitlich nicht, weswegen diese Mehrantennentechnik keine Auswirkungen auf die Expositionsmesstechnik hat.

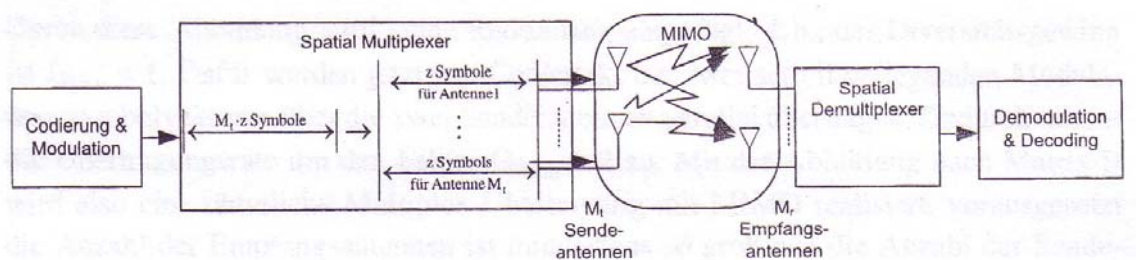


Bild 2.28: Prinzip des Spatial Multiplexing, aus [MAU 07]

In praktischen Mehrantennensystemen ist eine Kombination aus STC und Spatial Multiplexing möglich. Beide Techniken benötigen jedoch Umgebungen, in denen die räumlichen Ausbreitungspfade möglichst wenig miteinander korreliert sind. In Umgebungen mit einem dominanten Ausbreitungspfad, wie z.B. in LOS-Szenarien, kann mit diesen beiden Techniken nur ein geringer Gewinn realisiert werden.

2.4.3 Adaptive Antennensysteme

Die Idee bei einem adaptiven Antennensystem ist es, die Sendeenergie der Antenne nicht gleichmäßig im Sektor zu verteilen, sondern auf einzelne Benutzer zu fokussieren. Durch die damit verbundene Interferenzminimierung wird u.a. eine Kapazitätserhöhung (bzw. bei gleicher Datenrate auch eine Expositionsminderung) erreicht. Adaptive Antennensysteme können auch im Empfangspfad eingesetzt werden; die Wirkung, nämlich ein winkelabhängiger Antennengewinn (und damit z.B. eine höhere Empfindlichkeit in der Richtung des Endgerätes), ist identisch zum Sendepfad.

Adaptive Antennensysteme werden derzeit noch nicht im Regelnetzbetrieb eingesetzt, sondern befinden sich im Entwicklungsstadium. Es gibt jedoch z.B. seitens der Firma Alcatel-

Lucent bereits konkrete Produkte für adaptives Beamforming auf der Basisstationsantennenseite (Bild 2.29).

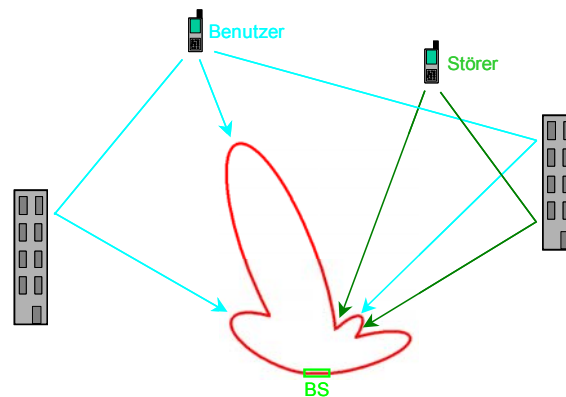


Bild 2.29 Adaptives Beamforming

Beim „adaptive beamforming“ wird die Abstrahlcharakteristik mit Hilfe einer digitalen Signalverarbeitung in optimaler Weise an das jeweilige Versorgungsszenario angepasst. Das Antennendiagramm wird dabei so geformt, dass ein Strahlungskegel in Richtung des gewünschten Benutzers ausgebildet wird, wobei hier auch Reflexionspfade berücksichtigt werden können. Zu Benutzern, die anderen Zellen zugeordnet sind und durch ihre Immission Interferenzen in der „adaptiven“ Zelle verursachen, wird ein Minimum im Abstrahldiagramm ausgebildet.

Die Firma Alcatel Lucent hat hierfür ein horizontales Array aus vier Einzelementen realisiert. Mit diesem Array ist eine Strahlformung und ein Schwenken der Strahlrichtungen in horizontaler Richtung möglich. An ein vertikales Schwenken wird derzeit nicht gedacht.

Die beim „adaptive beamforming“ entstehende zeitliche Änderung des Antennendiagramms hat Auswirkungen auf die Expositionsmessungen: Es kann nämlich im Allgemeinen nicht ermittelt werden, wie das Antennendiagramm der Basisstation zum Zeitpunkt der Messungen geformt ist, so dass nicht sichergestellt werden kann, dass der „maximale Zustand“ vorlag. Allerdings gibt es jedoch auch hier eine prinzipielle Möglichkeit, eine worst case Extrapolation zum Zwecke der Grenzwertüberprüfung vorzunehmen. Dies basiert darauf, dass nach derzeitigen Erkenntnissen die Präambel *ungeformt* in die Zelle abgestrahlt wird. Dies ist aus Signalisierungsgründen für andere Endgeräte in der Versorgungszelle notwendig und z.B. ähnlich zur ungeformten Abstrahlung des P-CPICH bei UMTS [BOR 06-2]. Damit erscheint eine generelle Übertragbarkeit des in Kapitel 2.2 abgeleiteten, auf der Auswertung der Präambel basierenden Messverfahrens wie folgt möglich:

Es wird die durch die Präambel verursachte Exposition gemessen. Danach erfolgt eine Extrapolation der Immission durch Hochrechnung mit einem Faktor Δg , der sich nach Bild 2.30 aus der Differenz des maximalen Gewinns des geformten Antennendiagramms (in Richtung der stärksten Abstrahlung) zum Gewinn des ungeformten Antennendiagramms der Präambel ergibt. Die Gewinndaten sind beim Anlagenbetreiber bzw. beim Antennenhersteller abzufragen. Der maximale Gewinn des geformten Diagramms (bzw. durch Verknüpfung mit der Eingangsleistung in die Antenne die maximale Strahlungsleistung EIRP) ist eine Größe,

die auch seitens der BNetzA bei der Berechnung des Sicherheitsabstandes berücksichtigt werden muss.

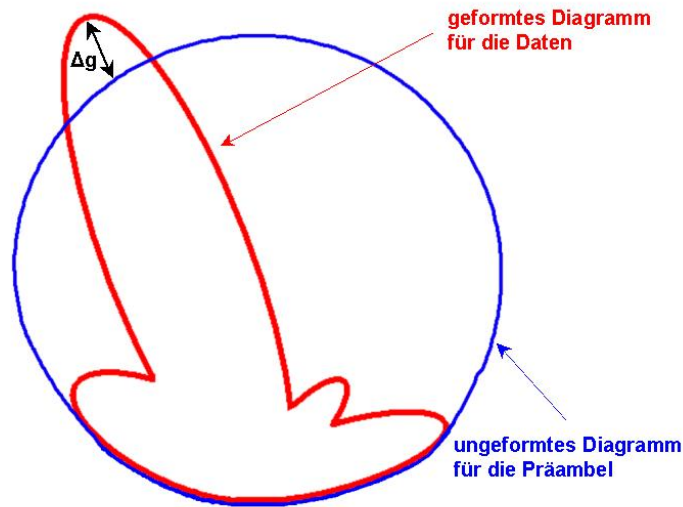


Bild 2.30 Prinzip der Extrapolation der worst case Exposition aus der Immission der Präambel

Die hier durchgeführten theoretischen Betrachtungen erfordern selbstverständlich umfangreiche Tests an realen Stationen. Dies kann jedoch erst dann erfolgen, wenn mit solchen Systemen ausgestattete WiMAX-Anlagen in Betrieb sind.

Streng genommen funktioniert das hier vorgeschlagene Verfahren nur, wenn der Faktor Δg im ganzen Schwenkbereich der adaptiven Antenne konstant bleibt. Dies ist nach Einführung dieser Technik in den Regelnetzbetrieb entsprechend zu überprüfen.

3 Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei WiMAX

3.1 Grundsätzliche Aspekte

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Untersuchung von Berechnungsverfahren zur Expositionsbestimmung bei WiMAX-Sendeanlagen. In zwei dieser Studie vorangegangenen Projekten des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms mit dem Titel „*Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen*“ [BOR 05] und „*Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen*“ [BOR 06-2] konnten bereits wichtige grundsätzliche Erkenntnisse über geeignete Berechnungsverfahren für GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen gewonnen werden, die auf vorliegende Aufgabenstellung übertragbar sind.

So hat sich beispielsweise gezeigt, dass mit Vollwellenlösungen (z.B. FDTD, FDFD, Momentenmethode o.ä.) höchstens Details der Antenne selbst bzw. der Montageumgebung untersucht werden können. Dies gilt bei WiMAX gleichermaßen, wobei hier aufgrund der geringfügig höheren Frequenz sogar noch eine feinere Diskretisierung des Berechnungsgebietes vorgenommen werden muss, wodurch der ohnehin schon enorme Rechenaufwand noch vergrößert wird. Rein empirische Verfahren hingegen bilden gerade im unmittelbaren Anlagenumfeld die Realität nur mit vergleichsweise großen Unsicherheitsbeiträgen ab. Als geeignet haben sich hingegen strahlenoptische Verfahren, ggf. mit empirischen Näherungen, erwiesen. So lieferten die in [BOR 05] und [BOR 06-2] untersuchten Programme einen guten Prognosewert der Feldstärke verglichen mit entsprechenden Messergebnissen.

Für die in dieser Studie betrachtete Aufgabenstellung wurden die in folgender Tabelle dargestellten Softwarepakete untersucht. Sie sind kommerziell verfügbar und beinhalten oftmals mehrere 10 Mannjahre Entwicklungsaufwand. Ferner sind sie von vielen Anwendern evaluiert und die Bedienung ist gut dokumentiert.

Programm	Verfahren	Hersteller	Internet	Version
EFC-400	strahlenoptisch	FGEU	www.fgeu.de	Version 2007 (Build 2664)
WinProp	strahlenoptisch	AWE-Com.	www.awe-communications.com	Version 7.35
Wireless Insite	strahlenoptisch	Remcom	www.remcom.com	Version 2.1.0
Fieldview	Freiraum- ausbreitung	EM-Institut	www.em-institut.de	Version 3.3

Tabelle 3.1: Verwendete kommerziell verfügbare Softwarepakete

Das Programm *EFC-400* wurde von der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH entwickelt. Wie schon in der Softwareversion, die in [BOR 05] bzw. [BOR 06-2] verwendet wurde, kann der Gebäudeeinfluss über die Angabe eines globalen

bzw. individuellen Dämpfungsfaktors berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann vom Benutzer ein Multireflexionslevel gewählt werden, der die Anzahl der zu berechnenden Reflexionen bestimmt. In diesem Zusammenhang ist aber zu beachten, dass keine Informationen bezüglich der Phase in die Berechnung eingehen. Darüber hinaus sind Importfilter für Gebäude, Algorithmen zur Erkennung der Überlappungen von Gebäudewänden und vieles mehr integriert.

Die folgenden Voraussetzungen sind vom Hersteller angegeben, um einen optimalen Ablauf des Programms zu gewährleisten:

- Prozessor: 2 GHz
- Freier Arbeitsspeicher: 128 MB
- Grafikkarte: Open GL Beschleunigung
- Freier Festplattenplatz: 20 GB
- Betriebssystem: Microsoft Windows
- Kosten für eine Einzellizenz: 13.590,- €

Die Software *Wireless Insite* wurde von der Firma Remcom entwickelt und basiert auch auf dem strahlenoptischen Wellenausbreitungsmodell. Es ist möglich, eine dreidimensionale Simulationsumgebung zu modellieren. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Pentium III 800 MHz (oder vergleichbarer AMD)
- Freier Arbeitsspeicher: Minimum 512 MB
- Grafikkarte: OpenGL Beschleunigung
- Freier Festplattenplatz: Minimum 500 MB
- Betriebssystem: Windows 2000 oder XP
- Kosten für eine Einzellizenz: 12.000,- US \$

Die Software *WinProp* wurde von der Firma AWE-Communications entwickelt. Sie ist modular aufgebaut, so dass der Benutzer das Programm seiner Aufgabenstellung nach entsprechend zusammen setzen kann. Darüber hinaus existieren je nach eingesetztem Modul verschiedene auf das jeweilige Problem optimierte Ausbreitungsmodelle. In dieser Studie wird zunächst das Modul „WallMan“ verwendet. Hiermit kann die Simulationsumgebung (z.B. Stadtgebiet, Indoor-Szenario) modelliert und für den anschließenden Einsatz im Wellenausbreitungsmodul „ProMan“ vorbereitet werden. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Prozessor: Intel CPU oder vergleichbar mit min. 1000 MHz
- Freier Arbeitsspeicher: Minimum 256 MB
- Grafikkarte: min. 1024 x 768 Pixel und 65536 Farben
- Freier Festplattenplatz: Minimum 2 GByte
- Betriebssystem Windows (95/98/ME/NT 4.0/2000/XP)
- Kosten für eine Einzellizenz: stark abhängig von der Anzahl der eingesetzten Module; für die hier zu lösende Aufgabe ca. 6.500,- € für eine Jahreslizenz

Die Software *Fieldview* wurde von der EM-Institut GmbH entwickelt und beruht auf der Berechnung mit reiner Freiraumausbreitung. Es können Antennendiagramme eingelesen und anschließend die Immissionsverteilung in beliebigen horizontalen oder vertikalen Ebenen berechnet werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, einen frei wählbaren additiven Zuschlag zur Berücksichtigung von Reflexionen anzugeben. Auch die grenzwertbezogene Summation von mehreren Einzelsignalen ist möglich. Als Voraussetzungen sind vom Hersteller folgende Parameter angegeben:

- Betriebssystem: Windows (95/98/ME/NT 4.0/2000/XP)
- Kosten für eine Einzellizenz: 1.300,- €

3.2 Eingabeparameter

Die erforderlichen Eingabeparameter für die oben vorgestellten Softwarepakete lassen sich in anlagenseitige, topographische und gebäudebezogene Parameter aufteilen. Die für eine Simulation notwendigen technischen Parameter der WiMAX-Sendeanlage sind nur begrenzt der Standortbescheinigung zu entnehmen. Hierzu zählen z.B. die Montagehöhe der Sendeanenne über Grund (Unterkante) oder die Hauptstrahlrichtung im Azimut. Darüber hinaus werden aber noch weitere anlagenseitige Parameter wie Antennenart und Sendeleistung am Antenneneingang benötigt, die nicht der Standortbescheinigung entnommen werden können. In diesem Fall ist die *Mithilfe der Betreiber* unumgänglich.

Im folgenden werden weitere für eine Simulation wesentliche Eingabeparameter (Abstrahlcharakteristik, Geländedaten, Gebäudedaten und Materialdaten) nochmals im Einzelnen aufgeführt und untersucht.

3.2.1 Abstrahlcharakteristik der „konventionellen“ Sendeantenne

Wie schon bei den Sendeantennen für den Mobilfunk ist auch die Abstrahlcharakteristik der WiMAX-Basisstationsantenne maßgeblich für die Verteilung der Immission im Umfeld der Sendeanlage verantwortlich. Sofern konventionelle Antennen für WiMAX zum Einsatz kommen, können die wesentlichen Ergebnisse aus [BOR 05] und [BOR 06-2] für die vorliegende Aufgabenstellung übertragen werden, da sich im Wesentlichen nur die Sendefrequenz ändert. So ist die Abstrahlcharakteristik abhängig vom eingestellten elektrischen Downtilt, von der Montageumgebung und der Sendefrequenz. Letzteres ist in den zwei folgenden Bildern exemplarisch für Antennen von zwei unterschiedlichen Herstellern dargestellt.

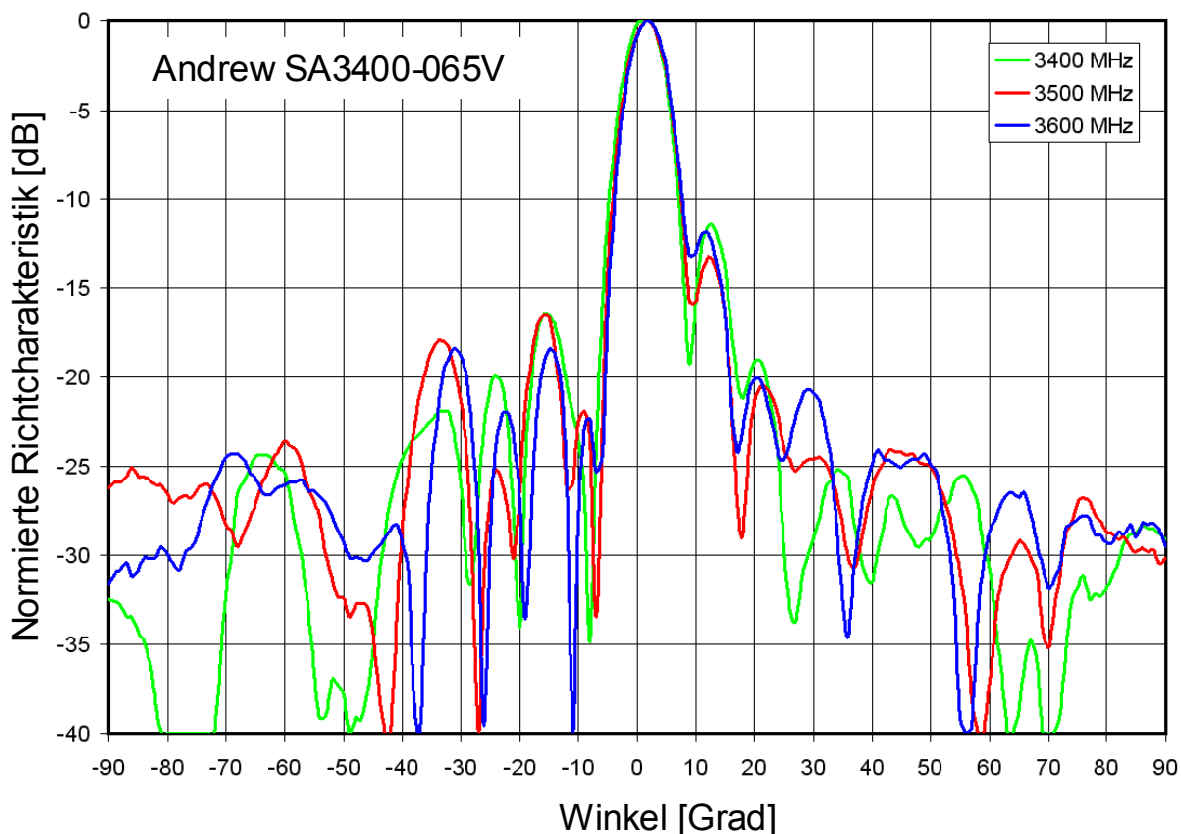


Bild 3.1: Abhängigkeit der Richtcharakteristik der WiMAX-Sendeantenne Andrew SA 3400 von der Sendefrequenz; Herstellerangaben

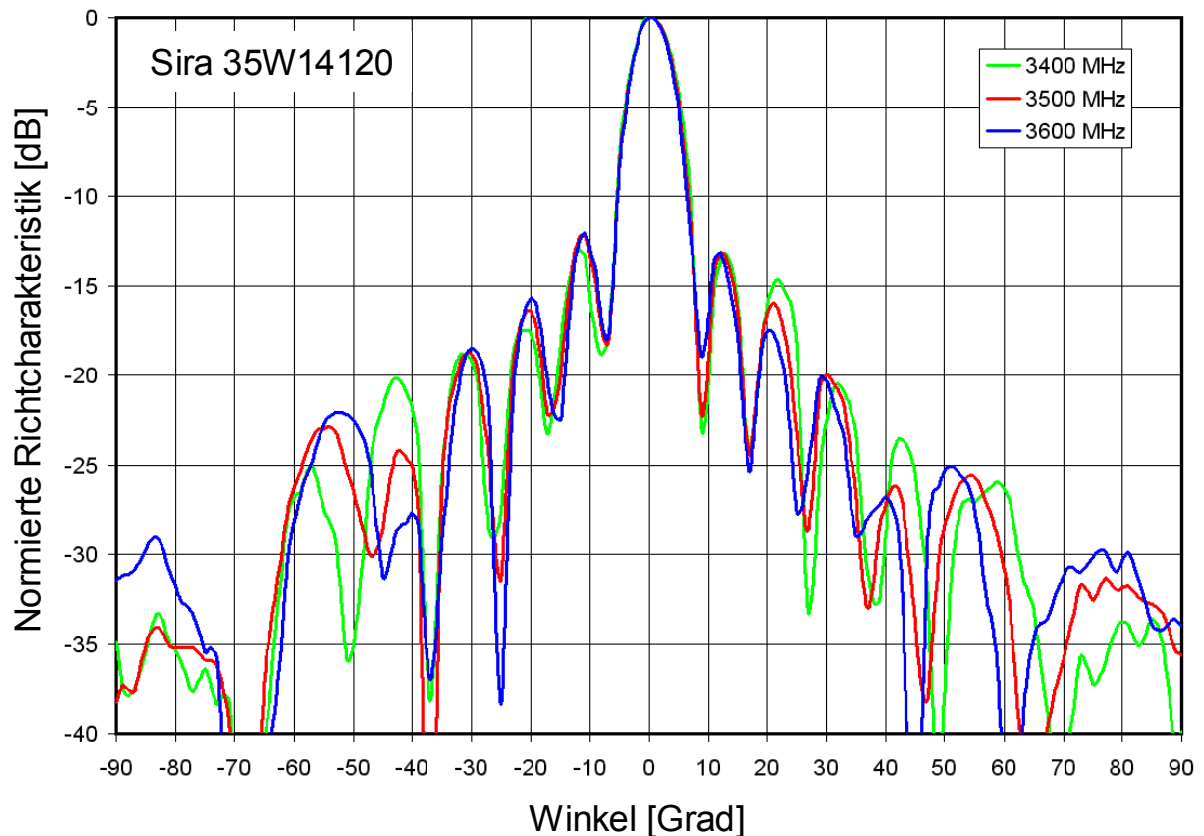


Bild 3.2: Abhängigkeit der Richtcharakteristik der WiMAX-Sendeantenne Sira 35W12120 von der Sendefrequenz; Herstellerangaben

Der Frequenzbereich vom lizenzierten (3,4 – 3,6 GHz) wie auch vom lizenzfreien WiMAX (5,15 – 5,85 GHz) umfasst über alle Betreiber gesehen mehrere 100 MHz (siehe Teilbericht I). Somit ist es auch hier sinnvoll, ein synthetisiertes Antennendiagramm zu erstellen. Eine Synthese des Antennendiagramms bedeutet vor diesem Hintergrund für die Frequenzabhängigkeit, dass die einmal synthetisierte Abstrahlcharakteristik für den gesamten Frequenzbereich gleichermaßen eingesetzt werden kann. Darüber hinaus wird mit nur einer numerischen Simulation nicht eine sehr spezifische Momentaufnahme berechnet, sondern eine allgemein gültigere Prognose der Immission. Ein derartiges synthetisiertes Antennendiagramm wird erzeugt (siehe Bild 3.3), indem die Abstrahlcharakteristik auf den maximalen Wert im Nebenzipfelbereich aufgefüllt wird, getrennt nach Vorder- und Rückstrahlbereich. Auf diese Art und Weise wird der Abhängigkeit des Antennendiagramms von dem eingestellten elektrischen Downtilt, der Frequenz und der Montageumgebung Rechnung getragen.

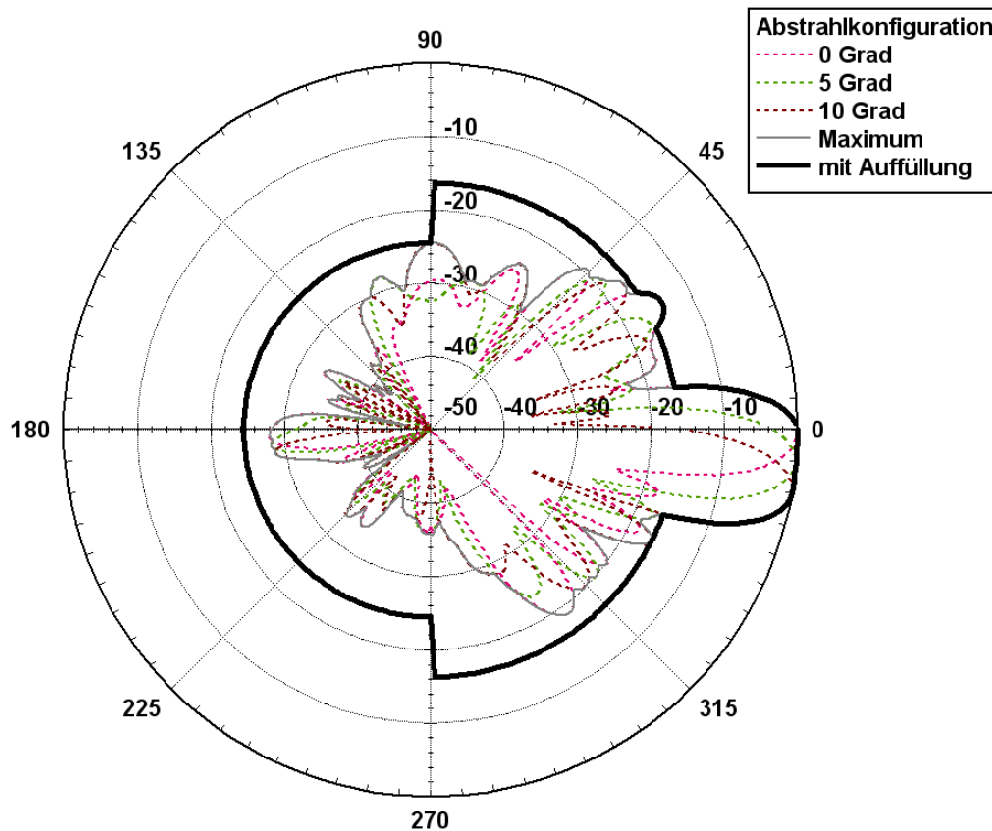


Bild 3.3: Synthetisiertes Antennendiagramm für eine „konventionelle“ WiMAX-Sendeantenne

3.2.2 Geländedaten

In [BOR 06-2] wurde gezeigt, dass eine Berücksichtigung des Geländeverlaufs bei einer Immissionsberechnung zwingend erforderlich ist. Es wurden Werkzeuge entwickelt, um die Geländedaten in die verwendeten Programme integrieren zu können. Dienen USGS Geländedaten als Grundlage für die Simulationen, können diese durch folgende schematisch dargestellte Vorgehensweise in die hier verwendeten Softwarepakete integriert werden.

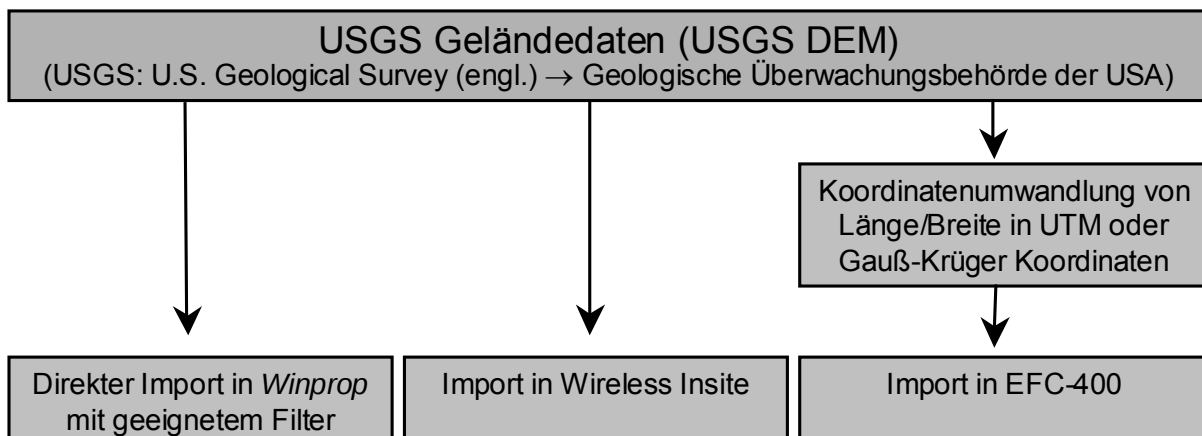


Bild 3.4: Schematische Darstellung der Integration von Geländedaten in die verwendeten Programme auf Basis von USGS-DEM Daten

3.2.3 Gebäudedaten

Gebäude haben durch Abschattung, Reflexionen, Beugungen usw. großen Einfluss auf die Immissionsverteilung und sollten insofern auch in einer Berechnung geeignet berücksichtigt werden.

Bezüglich der Integration von Gebäudeinformationen wurde bereits in [BOR 06-2] festgestellt, dass bei einer Berechnung der Immission im Bereich einer gesamten Versorgungszelle die manuelle Erstellung jedes einzelnen Gebäudes auf Basis von z.B. Satellitenbildern in den Programmen nicht praktikabel ist. Daher wurden bereits Werkzeuge entwickelt, um die Vielzahl von Gebäudedaten vor dem Hintergrund der Immissionsberechnung in einer kompletten Versorgungszelle zu vereinfachen. Im folgenden Bild ist die Vorgehensweise hierzu schematisch für die einzelnen Programme dargestellt. Als Grundlage dienen schwarz-weiß Grundrissbilder, die in Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (<http://www.lverma.nrw.de/index.htm>) durch einen Filter aus digital vorliegenden Katasterplänen gewonnen werden konnten.

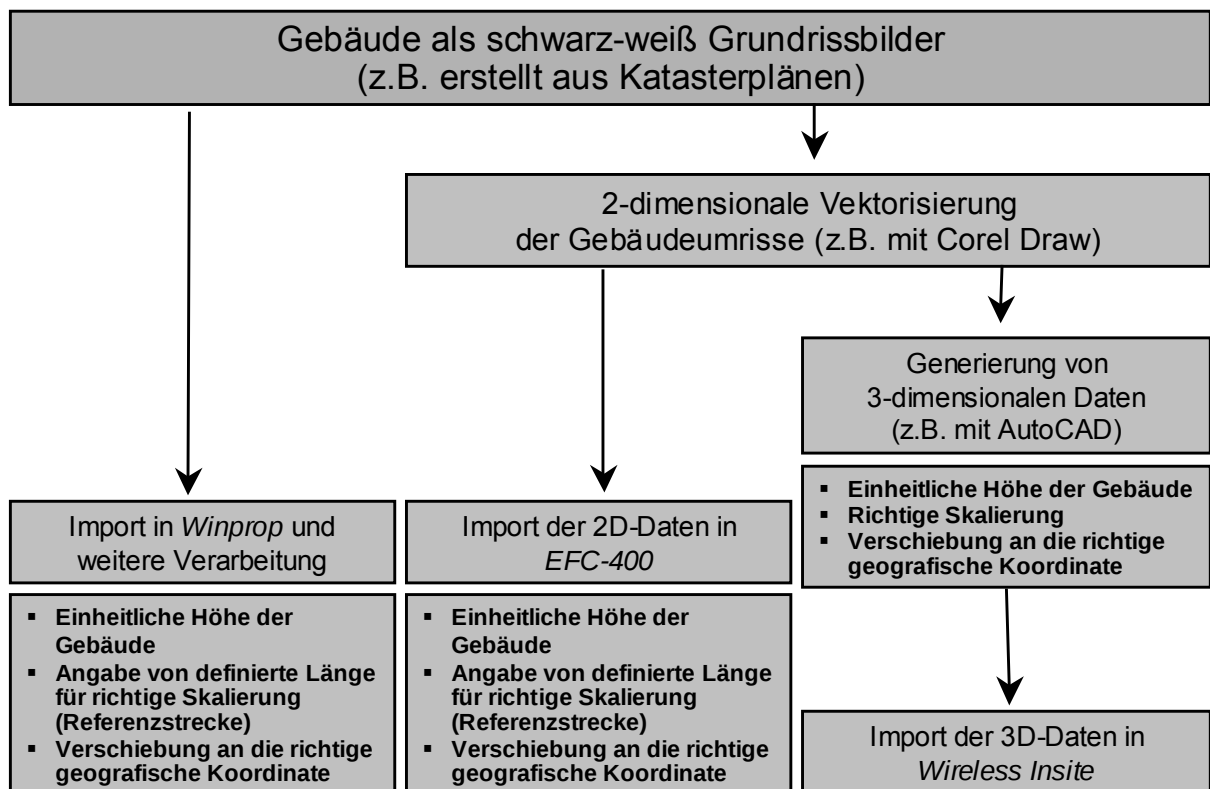


Bild 3.5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Integration von Gebäudedaten in die verwendeten Programme auf Basis von schwarz-weiß Grundrissbildern

3.2.4 Materialdaten

Neben der Integration von Gelände- und Gebäudedaten spielt die Berücksichtigung von Baumaterialien (Beton, Glasscheiben usw.) in den einzelnen Programmen gerade für die Indoor-Berechnung eine entscheidende Rolle. Da die Materialien einen nicht unerheblichen

Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben, ist es für den hier anzustellenden Vergleich von Simulationen mit unterschiedlichen Programmen wichtig, dass die Materialien in allen Softwarepaketen möglichst identisch behandelt werden. Durch die differierende Handhabung ist dieses aber nicht direkt gewährleistet. So wird ein Material in Wireless Insite durch die relative Permittivität und die Leitfähigkeit, in EFC-400 einzig durch seine Dämpfung und in Winprop durch seine relative Permittivität, Leitfähigkeit und zusätzliche empirische Faktoren definiert.

Vor einem Vergleich von Berechnungsergebnisse mit unterschiedlichen Programmen ist es daher notwendig, die verwendeten Materialien möglichst identisch durch die unterschiedlichen Programmparameter nachzubilden.

Als Grundlage für die verwendeten Materialien dienen drei Datenbanken aus dem Programm Winprop für die Frequenzen 900 MHz, 1800 MHz und 2000 MHz. Um überhaupt Materialdaten für Frequenzen von 3500 MHz und 5800 MHz zu erhalten, wurden die Parameter aus den vorhandenen Daten auf Frequenzen von 3500 MHz und 5800 MHz wie in Tabelle 3.2 zu sehen linear extrapoliert.

Material	Relative Permittivität	Datenbank (Winprop)			Extrapoliert	Extrapoliert
		Leitfähigkeit (900 MHz) [S/m]	Leitfähigkeit (1800 MHz) [S/m]	Leitfähigkeit (2000 MHz) [S/m]	Leitfähigkeit (3500 MHz) [S/m]	Leitfähigkeit (5800 MHz) [S/m]
Beton	6	0,035	0,07	0,078	0,136	0,226
Glas	6	0,003	0,005	0,006	0,0089	0,017
Gips	4	0,02	0,04	0,044	0,0778	0,128
Holz	2	0,018	0,035	0,039	0,069	0,103

Tabelle 3.2: Extrapolation der Leitfähigkeit für Frequenzen von 3500 MHz und 5800 MHz

Die relative Permittivität und die Leitfähigkeit für 3500 MHz können problemlos in die Programme Wireless Insite und Winprop integriert werden. Die zusätzlichen empirischen Werte bei Winprop wurden aus den vorliegenden Datenbanken übernommen. Anschließend konnten mit den extrapolierten Daten die Dämpfungsfaktoren anhand einer Simulation mit Wireless Insite berechnet und dann in EFC-400 übernommen werden. Die resultierenden Transmissionsdämpfungen liegen in ähnlichen Größenordnungen wie die Ergebnisse aus [PAU 00] und sind in der folgenden Tabelle zu sehen.

Material	Materialdicke [cm]	Relative Permittivität	Transmissionsdämpfung [dB] für 3500 MHz	Transmissionsdämpfung [dB] für 5800 MHz
Beton	20	6	20	47
Glas	2	6	1,5	5,5
Gips	10	4	7,5	32,5
Holz	5	2	1,3	8

Tabelle 3.3: Bestimmung der Transmissionsdämpfung durch eine Simulation mit Wireless Insite

Für eine verbesserte Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse der verschiedenen Softwarepakete untereinander wurde darüber hinaus in den outdoor-Berechnungen Material für Gebäude mit folgenden Parametern verwendet:

- rel. Permittivität: 4
- Leitfähigkeit: 0,01 S/m

Die Ergebnisse aus [BOR 06-2] haben gezeigt, dass gerade bei Simulationen in dichter besiedelten Gebieten die Transmission durch Gebäude eine untergeordnete Rolle spielt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit zu den anderen Programmen wurde daher bei den Berechnungen mit EFC-400 eine Transmissionsdämpfung von 15 dB angenommen. Ferner wurde der Reflexionsfaktor von ca. 40% für die Simulationen mit EFC-400 aus einer Berechnung mit Wireless Insite abgeschätzt.

3.3 Adaptive Antennen zum Beamforming

Im Standard für WiMAX ist neben der Benutzung von konventionellen Antennen (vgl. Abschnitt 3.2.1) auch die Verwendung von Mehrantennentechniken vorgesehen. Bereits in Kapitel 2.4 wurden diese prinzipiell erläutert und festgestellt, dass lediglich adaptive Antennensysteme Auswirkungen auf die Immissionserfassung haben. Da diese bislang aber nur geplant oder sich noch in der Einführung befinden, werden im folgenden einige *prinzipielle* Überlegungen im Hinblick auf eine Berücksichtigung von adaptiven Antennen zum Beamforming in einer Immissionsberechnung angestellt.

Aus der Kombination eines Antennenarrays (zweidimensionale Anordnung von Antennenelementen) und einer adaptiven digitalen Signalverarbeitung der Empfangs- und Sendesignale lassen sich durch die unabhängige Veränderung der Amplituden und Phasen des Antennenstroms jedes Antennenelementes unterschiedliche Abstrahl- und Empfangscharakteristiken des Arrays einstellen. Auf diese Weise können schmale (bezüglich Azimut und Elevation) Abstrahlbereiche erzeugt werden, mit denen die jeweilige Abstrahlung in zeitlicher

Abfolge gezielt auf den jeweils aktiven Benutzer gerichtet werden kann. Schematisch ist dies im nachfolgenden Bild dargestellt.

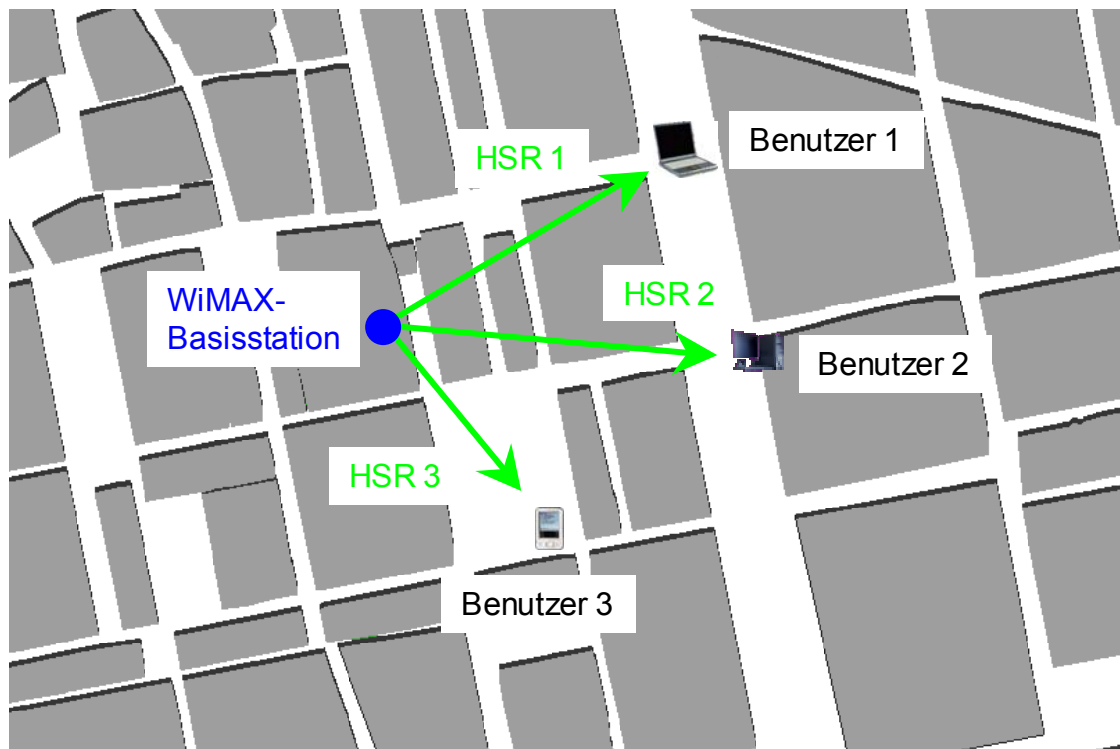


Bild 3.6: Schematische Darstellung der adaptiven Ausrichtung der Richtcharakteristik auf den jeweils aktiven Benutzer; HSR = Hauptstrahlrichtung

Mit Hilfe einer intelligenten Signalverarbeitung wird das Antennendiagramm in optimaler Weise an den Funkkanal angepasst. Dieser Funkkanal beinhaltet zum einen die Strahlung des Endgerätes, die sich aus dem direkten Pfad und indirekten Ausbreitungswegen über Reflexionen ergibt, und darüber hinaus noch die Strahlungen von anderen Benutzern, die auf der gleichen Frequenz senden (diese werden im folgenden als Störer bezeichnet). Aus den jeweiligen Einfallsrichtungen wird das neue Abstrahlverhalten generiert.

Dieses Diagramm wird in vorliegender Situation (vgl. folgendes Bild) so modelliert, dass die Haupt- und Nebenstrahlungsbereiche direkt in die Einfallsrichtungen des Benutzers fallen, wohingegen an den Einfallsrichtungen der Störer Nullstellen generiert werden.

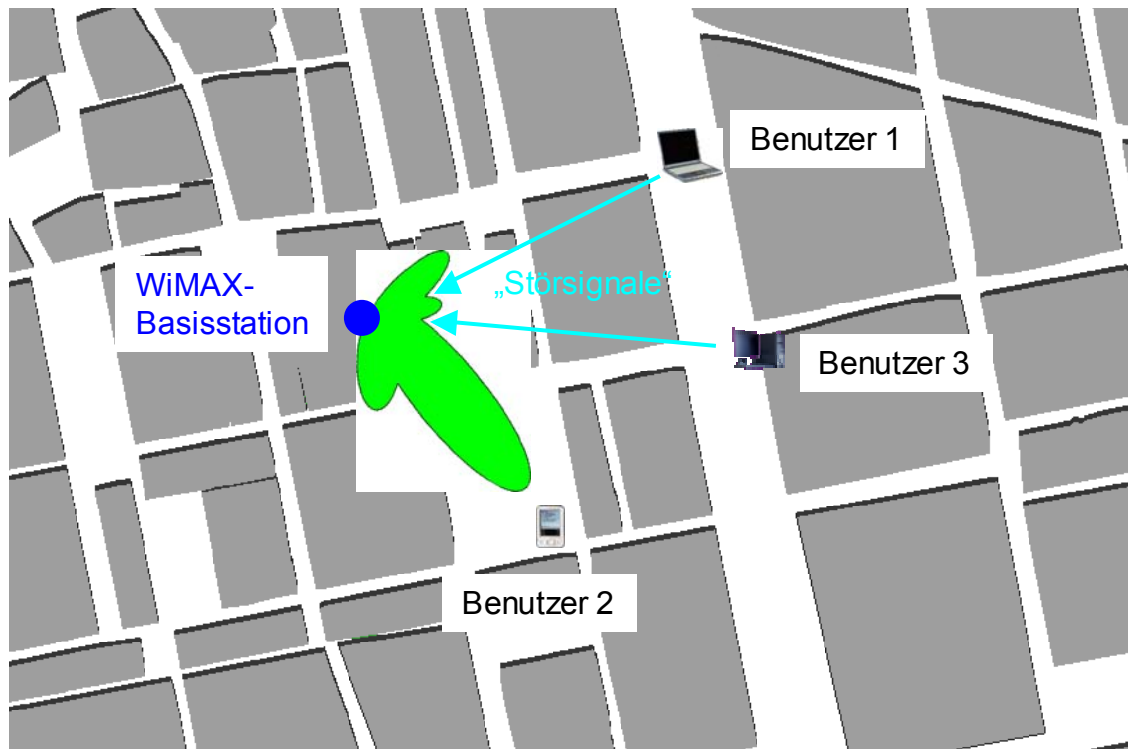


Bild 3.7: Ausrichtung einer adaptiven Antennencharakteristik

Neben der Strahlbündelung in vertikaler Richtung, die auch bei konventionellen Antennen angewendet wird (Elevationsdiagramm), erfolgt diese bei adaptiven Antennen zum Beam-forming nun auch in der horizontalen (azimutalen) Richtung. In folgendem Bild wird diese spezielle Formgebung der Richtcharakteristik durch intelligente Antennen (Bild 3.8 b) mit der Abstrahlcharakteristik einer herkömmlichen Sektorantenne (Bild 3.8 a) dreidimensional verglichen.

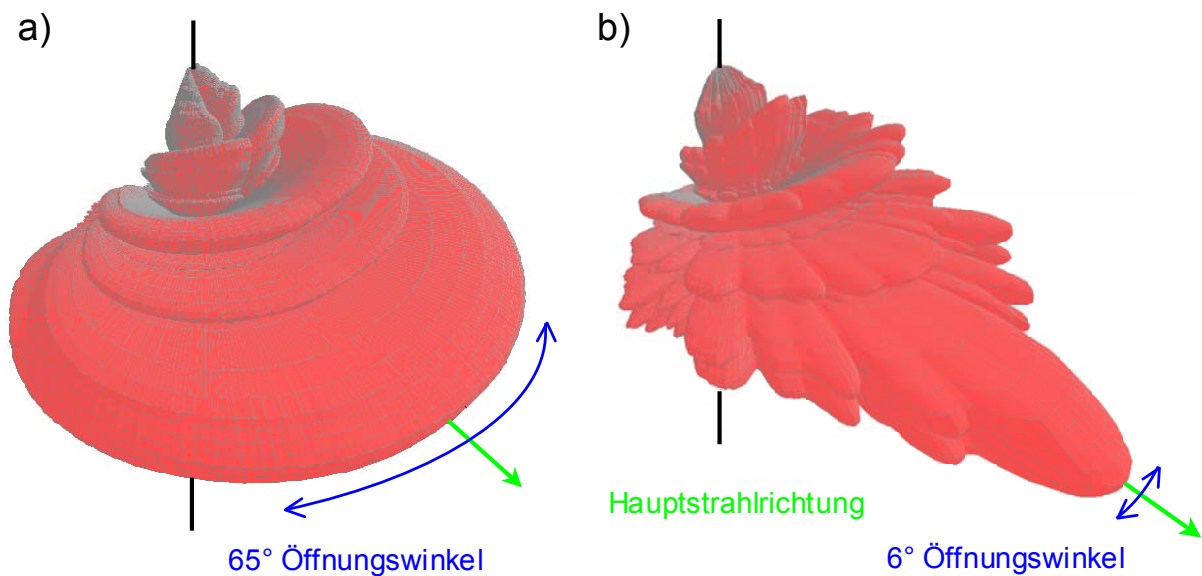


Bild 3.8: Vergleich der Abstrahlcharakteristik einer „konventionellen“ (a) und einer „adaptiven“ (b) Antenne

Für die Berechnung der Exposition durch eine WiMAX-Sendeanlage, die mit einer adaptiven Antenne zum Beamforming betrieben wird, können unter Berücksichtigung der vorangegangenen Informationen folgende Vorgehensweisen abgeleitet werden:

Zunächst kann eine kurzfristige momentane Expositionssituation für einen einzelnen Zustand des adaptiven Antennendiagramms berechnet werden. Hierfür ist es allerdings notwendig, dass dem Anwender auch die Vielzahl aller möglichen Zustände der Abstrahlcharakteristiken vorliegen. Dies scheint in der Praxis aufgrund der großen Anzahl aber eher schwer realisierbar. Hierbei ist auch nicht klar, ob überhaupt seitens der Antennenhersteller eine Vielzahl von Diagrammen vermessen werden wird. Darüber hinaus stellt ein derartiges Berechnungsergebnis nur eine kurzzeitige Momentaufnahme der Immissionsverteilung dar und ist somit auch nur für einen kurzen zeitlichen Zustand gültig.

Die zweite Möglichkeit einer Expositionsrechnung besteht daher in dem Ansatz, die große Vielzahl der durch die intelligente Signalverarbeitung erzeugten adaptiven Antennendiagramme geeignet zu reduzieren. Ähnlich wie bei den konventionellen Antennen kann eine Art synthetisierte Antennencharakteristik durch die Überlagerung aller möglichen Zustände der adaptiven Antenne vorgenommen werden. Auf diese Weise liefert das Berechnungsergebnis dann auch nicht nur eine kurzfristige, momentane, sondern eine längerfristige Prognose, die allerdings für die Bereiche außerhalb der aktuellen Hauptstrahlrichtung eine Überschätzung liefert. In den folgenden Bildern ist die Erstellung einer derartigen synthetisierten Abstrahlcharakteristik schematisch dargestellt: Aus der Vielzahl der möglichen Abstrahlkonfigurationen (siehe Bild 3.9) wird durch die Überlagerung ein einzelnes Antennendiagramm erzeugt, in dem alle möglichen Zustände enthalten sind (siehe Bild 3.10).

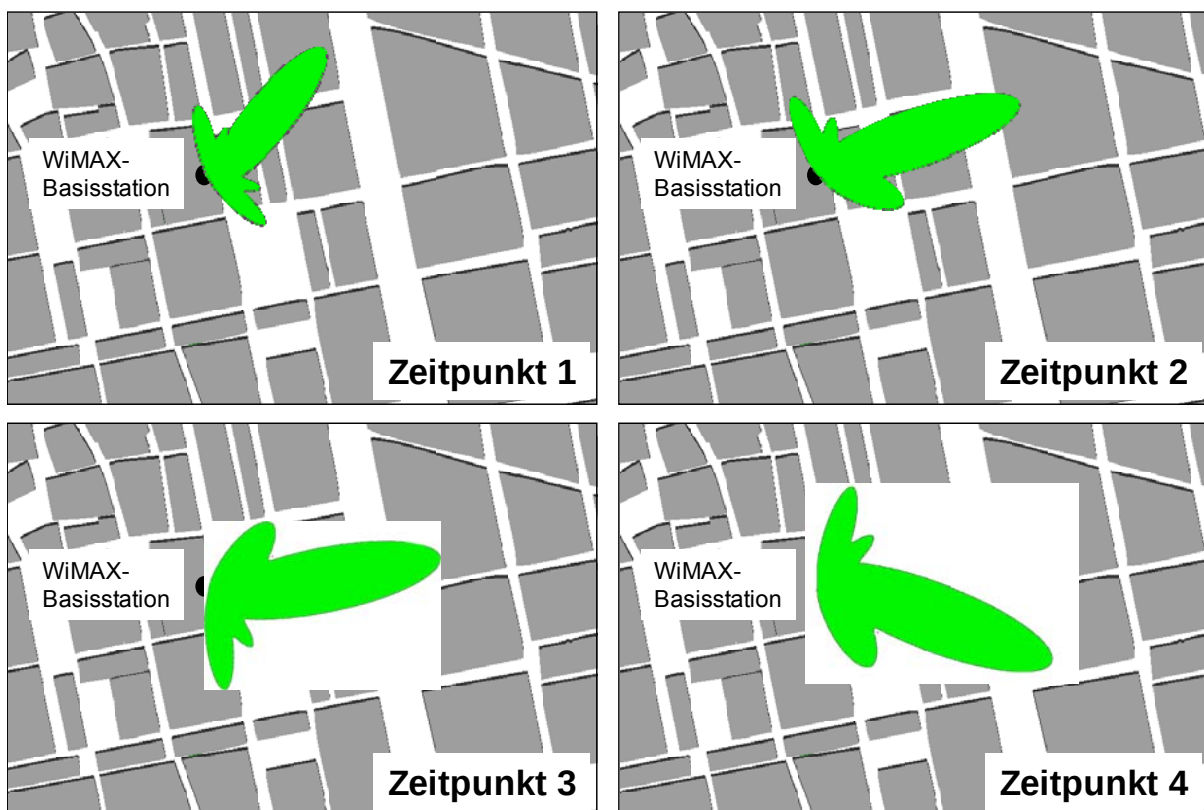


Bild 3.9: Schematische Darstellung der verschiedenen zeitlichen Zustände der adaptiven Abstrahlcharakteristik bzgl. Beamforming

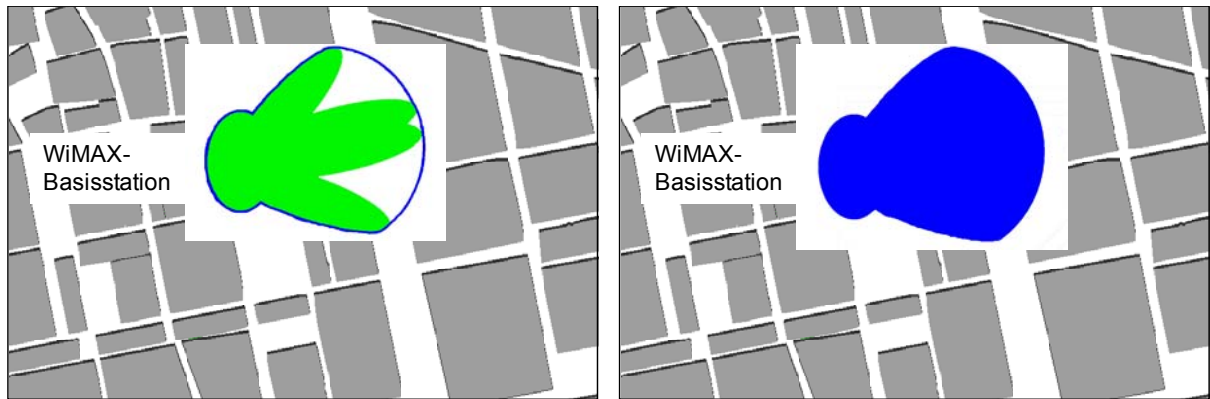


Bild 3.10: Schematische Darstellung: Hüllkurve über alle mögliche adaptiven Antennendiagramme bzw. über den gesamten Azimutwinkelbereich

Darüber hinaus scheint es dann auch vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus [BOR 05] und [BOR 06-2] sinnvoll, den rückwärtigen Nebenzipfelbereich wie bereits im vorangegangenen Abschnitt für die „konventionellen“ Antennen beschrieben, auf dessen maximalen Wert aufzufüllen.

3.4 Simulationen

Im folgenden werden verschiedene Konfigurationen mit den jeweiligen Softwarepaketen modelliert und berechnet. Für den späteren Vergleich zwischen rechentechnisch prognostizierter und messtechnisch ermittelter Exposition ist es sinnvoll, verschiedene, praxisrelevante Expositionsszenarien zu definieren. Hierbei werden exemplarisch folgende Konfigurationen ausgewählt:

- Basisstation auf einem Gebäudedach im städtischen, dicht besiedelten Gebiet (outdoor)
- Basisstation auf einem Gebäudedach im ländlichen, dünn besiedelten Gebiet (outdoor)
- Basisstation auf einem Gebäudedach und Bestimmung der Immissionsverteilung innerhalb eines benachbarten Gebäudes (indoor)
- Bestimmung der Immissionsverteilung durch ein Endgerät innerhalb einer Indoorumgebung (indoor)

Innerhalb dieser Konfigurationen werden neben hohen und niedrigen Stationsinstallationen, Berechnungspunkten mit unterschiedlichen Sichtbedingungen (LOS bzw. nLOS), indoor und outdoor liegenden Berechnungspunkten auch Berechnungen der Exposition durch die Basisstation und durch Endgeräte betrachtet.

Anhand dieser typischen Anwendungsfälle werden die Softwarepakete im folgenden *prinzipiell* auf ihre Eignung für vorliegende Aufgabenstellung überprüft. Ein Vergleich mit Messwerten wird erst im Teilbericht III anhand von ausgewählten Szenarien durchgeführt.

Alle Berechnungen wurden auf einem Computer mit folgenden Eckdaten durchgeführt:

- Betriebssystem: Microsoft Windows XP
- Prozessor: Pentium IV
- Taktfrequenz: 1,8 GHz
- Arbeitsspeicher: 2 GB
- Grafikkarte: Aopen Gforce 4 TI 4200, 64 MB, Open GL

Für die Durchführung der Simulationen und vor dem Hintergrund eines Vergleichs der Berechnungsergebnisse sind noch folgende kurze Anmerkungen zu machen:

Bei der Anwendung der Programme sind die unterschiedlichen Winkeldefinitionen von Azimut und Elevation zu berücksichtigen. Gerade bei einem Vergleich der Berechnungsergebnisse stellen diese eine mögliche Fehlerquelle dar.

Bei der Software Wireless Insite ist kein flächiger Simulationsraum gegeben, sondern es müssen so genannte Empfangsantennen an zu betrachtenden Punkten platziert werden. An diesen Punkten erhält man dann die Immission als Empfangsleistung in dBm (vgl. [BOR 05]). Um die Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen vergleichen zu können, ist eine Umrechnung von dBm in die Einheit dBμV/m mit folgenden Formeln durchzuführen.

$$P_e [W] = 0,001 \cdot 10^{\left(\frac{P [dBm]}{10}\right)} \quad (3.1)$$

$$E \left[dB \frac{\mu V}{m} \right] = 20 \cdot \log \left(\frac{\sqrt{P_e \cdot Z_{F0} \cdot 4\pi^2 \cdot \frac{f^2}{c_o^2}}}{1 \frac{\mu V}{m}} \right) \quad (3.2)$$

3.4.1 Konfiguration 1: Stadtgebiet

In der im folgenden untersuchten Konfiguration wird ein Stadtgebiet mit dichter Bebauung im Zentrum von Krefeld betrachtet. Hierzu wurde hinsichtlich Gebäudedaten und Geländedaten nach der oben dargestellten Vorgehensweise für die verschiedenen Softwarepakete verfahren. Als anlagenseitige Simulationsparameter werden folgende Daten angenommen:

- Sendeanenne: Andrew SA3400
- Sendeleistung: 10 W
- Sendefrequenz: 3500 MHz
- Antennenhöhe: 24 m
- Azimut: 320° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdrehsinn)
- Downtilt: 4°

Darüber hinaus wurden die Simulationen in allen Softwarepaketen auf einer Ebene von 1,7 m über Grund durchgeführt. Die Konfiguration mit den fünf verschiedenen Vergleichsgebieten ist in Bild 3.11 zu sehen.

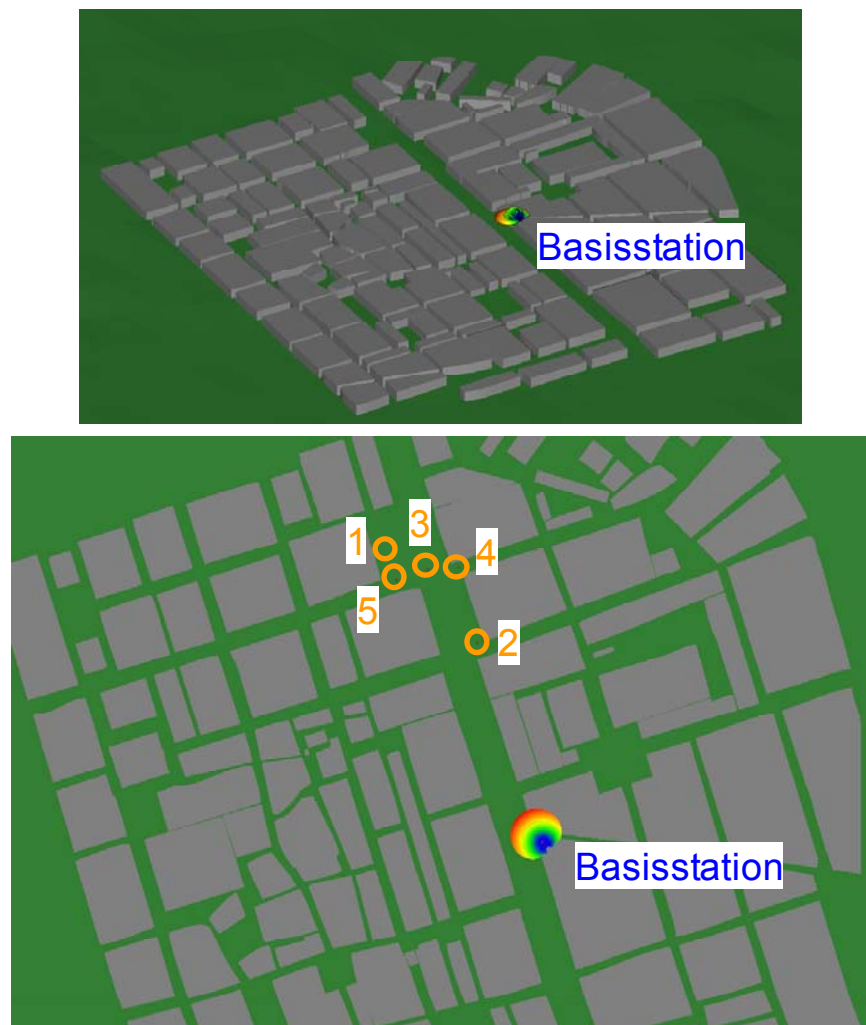


Bild 3.11: Konfiguration für die Simulation „Stadtgebiet mit dichter Bebauung“

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Lage und Sichtverhältnisse (LOS: direkte Sicht; nLOS: keine direkte Sicht) in den jeweiligen Vergleichsgebieten zur Sendeantenne sowie die zugehörigen lateralen Abstände.

Szenario: Stadtgebiet (dichte Bebauung)			
	Lage	Sichtverhältnis zur Basisstation	Laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet 1	outdoor	nLOS	382
Vergleichsgebiet 2	outdoor	nLOS	230
Vergleichsgebiet 3	outdoor	LOS	325
Vergleichsgebiet 4	outdoor	nLOS	315
Vergleichsgebiet 5	outdoor	nLOS	335

Tabelle 3.4: Überblick über die Lage der Vergleichsgebiete, die Sichtverhältnisse und der Abstände für dieses Szenario

Zunächst ist in Bild 3.12 das Simulationsergebnis von Winprop sowohl in dreidimensionaler als auch zweidimensionaler Weise flächig dargestellt. Neben dem Standort der Basisstation sind die fünf unterschiedlichen Vergleichsgebiete eingezeichnet, deren Immissionswert aus den Simulationen mit den verschiedenen Softwarepaketen im Anschluss miteinander in Beziehung gesetzt wird.

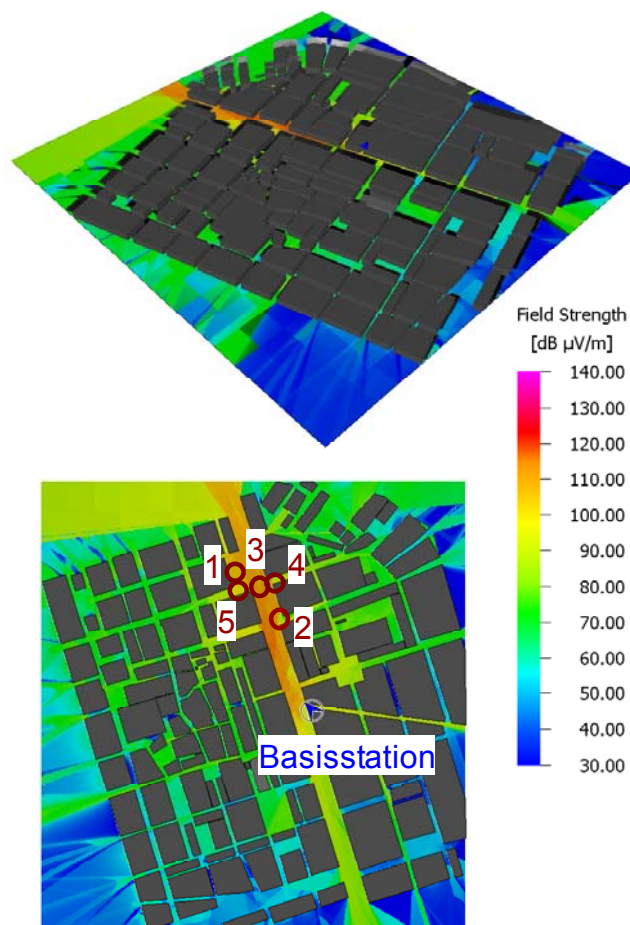


Bild 3.12: Simulationsergebnis von Winprop

Analog zu der Darstellungsweise des vorangegangenen Berechnungsergebnisses sind in den folgenden Bildern die Ergebnisse der Simulationen von EFC-400 (Bild 3.13) und Wireless Insite (Bild 3.14) dargestellt.

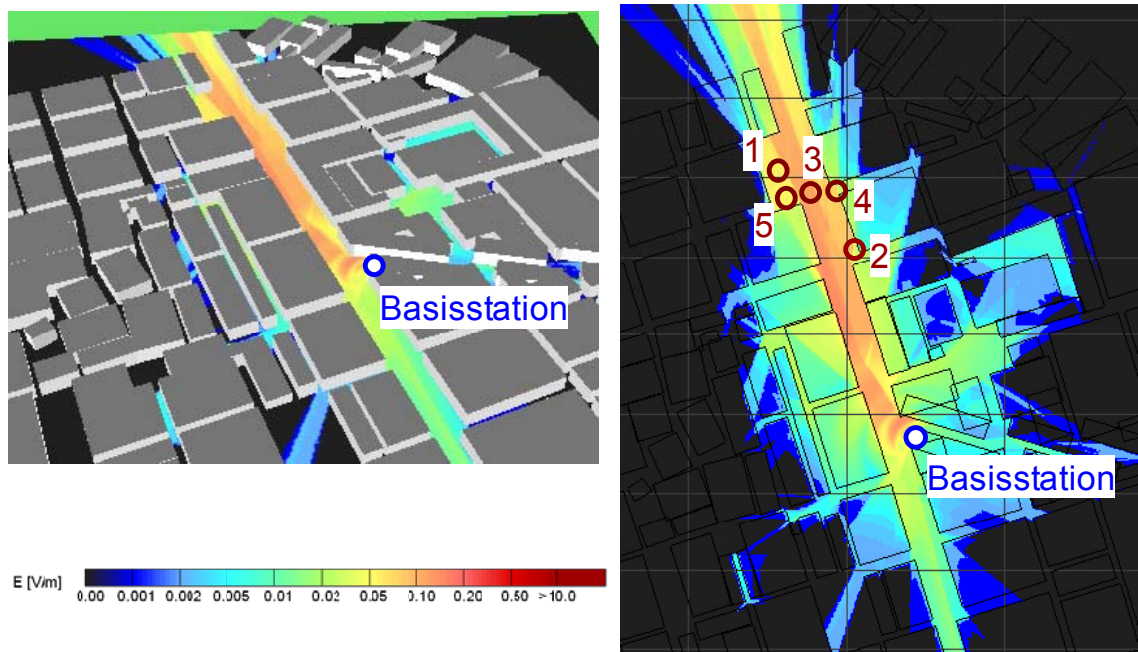


Bild 3.13: Simulationsergebnis von EFC-400

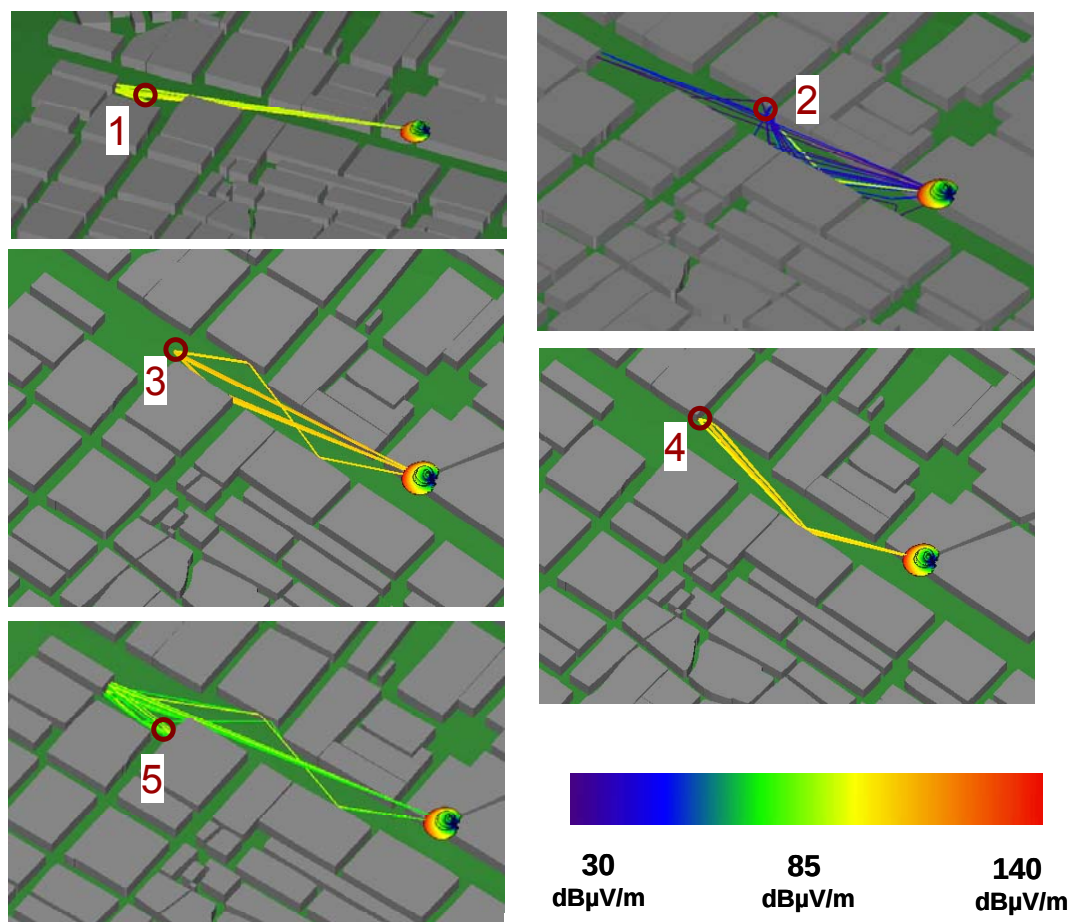


Bild 3.14: Simulationsergebnis von Wireless Insite

Das Simulationsergebnis von Wireless Insite ist im Gegensatz zu den anderen Programmen keine flächige Verteilung der Immission, was in der Rechenzeit begründet ist und später noch thematisiert wird.

Bild 3.15 zeigt nun den Vergleich der berechneten Immissionen in den fünf Vergleichsgebieten getrennt nach dem jeweiligen Softwarepaket. Neben den oben dargestellten Simulationsergebnissen wurde auch eine Berechnung mit dem Programm Fieldview durchgeführt. Hierdurch wird die Berechnungsmethode „Freiraumausbreitung mit einem Zuschlag von 3 dB auf die Sendeleistung zur Berücksichtigung von Reflexionen“ repräsentiert.

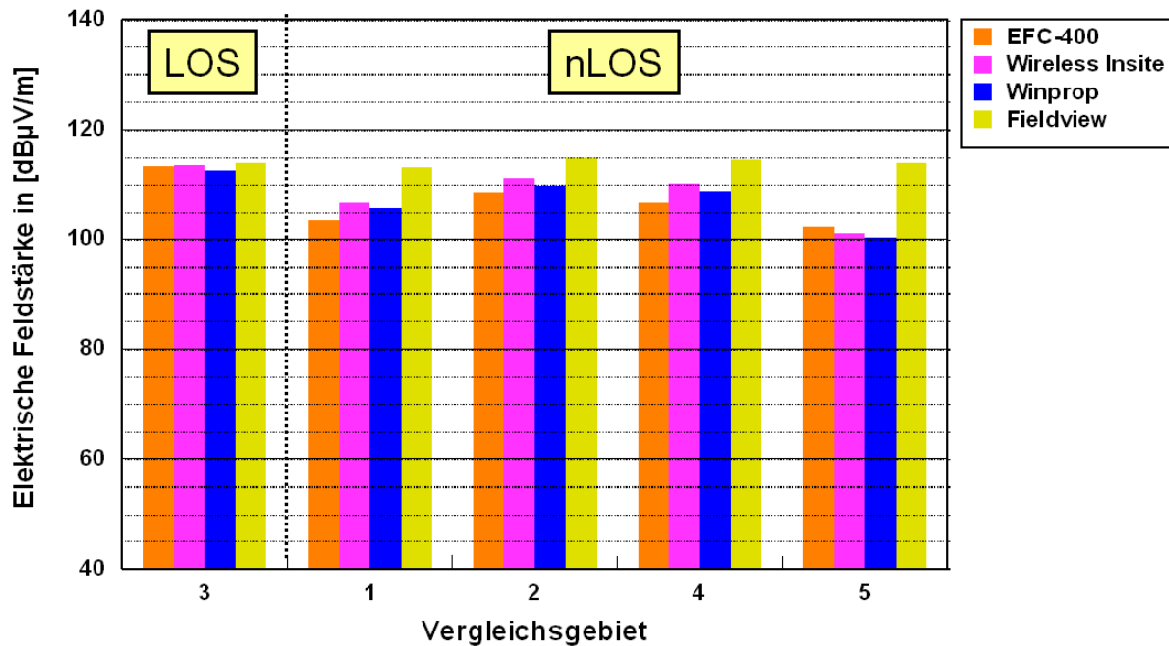


Bild 3.15: Vergleich der Simulationsergebnisse der verschiedenen Softwarepakete in den betrachteten Vergleichsgebieten

Aus obigen Bild lässt sich zunächst einmal festhalten, dass alle Softwarepakete im Vergleichsgebiet 3 bei direkter Sicht zur Sendeanlage eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse liefern. Dies korrespondiert mit den Resultaten aus [BOR 05] und [BOR 06-2]. Die absolute Schwankungsbreite für die Berechnungsergebnisse in diesem Gebiet liegt bei nur 1,4 dB.

In den Vergleichsgebieten ohne direkte Sicht zur Sendeanlage (nLOS) liegen die absoluten Schwankungsbreiten der Ergebnisse bei der hier betrachteten Konfiguration bei maximal 13,6 dB bzw. 3,7 dB bei Vernachlässigung von Fieldview.

Aus diesen Ergebnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen: Die Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ (Fieldview) weist auch bei WiMAX unter der Bedingung einer LOS-Situation ähnliche Simulationswerte wie die anderen hier untersuchten Programme auf. In nLOS-Situationen liegen die Ergebnisse dieser Methode allerdings oberhalb der anderen Softwarepakete, da ja keine Hindernisse o.ä. berücksichtigt werden.

In Tabelle 3.5 sind die einzelnen Simulationszeiten der Softwarepakete für die hier betrachtete Konfiguration zu sehen.

	EFC-400	Wireless Insite	Winprop	Fieldview
Zeitdauer in [h]	3	10	1 + 0,2	0,2

Tabelle 3.5: Simulations- und Modellierungszeit der einzelnen Programme für die hier betrachtete Konfiguration

Bei den Simulationszeiten ist zu beachten, dass bei Wireless Insite nicht das gesamte Stadtgebiet, sondern lediglich 5 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 Basisstationskonfigurationen oder differierende Standorte berechnet werden sollen, kann durch den nur einmaligen Preprocessing-Schritt insgesamt Simulationszeit eingespart werden.

3.4.2 Konfiguration 2: Ländliches Gebiet

In der nun untersuchten Konfiguration wird ein fiktives ländliches Gebiet mit dünner Bebauung und geringer Montagehöhe der Sendeantenne untersucht. Als anlagenseitige Simulationsparameter wurden folgende Daten angenommen:

- Sendeantenne: Andrew SA3400
- Sendeleistung: 10 W
- Sendefrequenz: 3500 MHz
- Antennenhöhe: 12 m
- Azimut: 90° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigerdrehsinn)
- Downtilt: 2°

Darüber hinaus wurden die Simulationen in allen Softwarepaketen auf einer Ebene von 1,7 m über Grund durchgeführt. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Lage und die Sichtverhältnisse in den fünf Vergleichsgebieten zur Sendeantenne sowie die zugehörigen lateralen Abstände.

Szenario: Ländliches Gebiet (lockere Bebauung)			
	Lage	Sichtverhältnis zur Basisstation	Laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet 1	outdoor	nLOS	285
Vergleichsgebiet 2	outdoor	LOS	410
Vergleichsgebiet 3	outdoor	nLOS	388
Vergleichsgebiet 4	outdoor	LOS	145
Vergleichsgebiet 5	outdoor	LOS	243

Tabelle 3.6: Überblick über die Lage der Vergleichsgebiete, die Sichtverhältnisse und die Abstände für dieses Szenario

Die Konfiguration mit dem Standort der Basisstation und den fünf Vergleichsgebieten ist in Bild 3.16 zu sehen.



Bild 3.16: Simulationsgebiet „Ländliches Gebiet mit dünner Bebauung“

Im anschließenden Bild ist zunächst das Simulationsergebnis von Winprop dargestellt. Neben dem Standort der Basisstation sind auch die fünf unterschiedlichen Vergleichsgebiete eingezeichnet. Hierbei weisen die Vergleichsgebiete 2, 4 und 5 direkte Sicht zur Anlage auf (LOS), wohingegen bei den verbleibenden Vergleichsgebieten keine direkte Sicht zur Anlage vorliegt (nLOS).

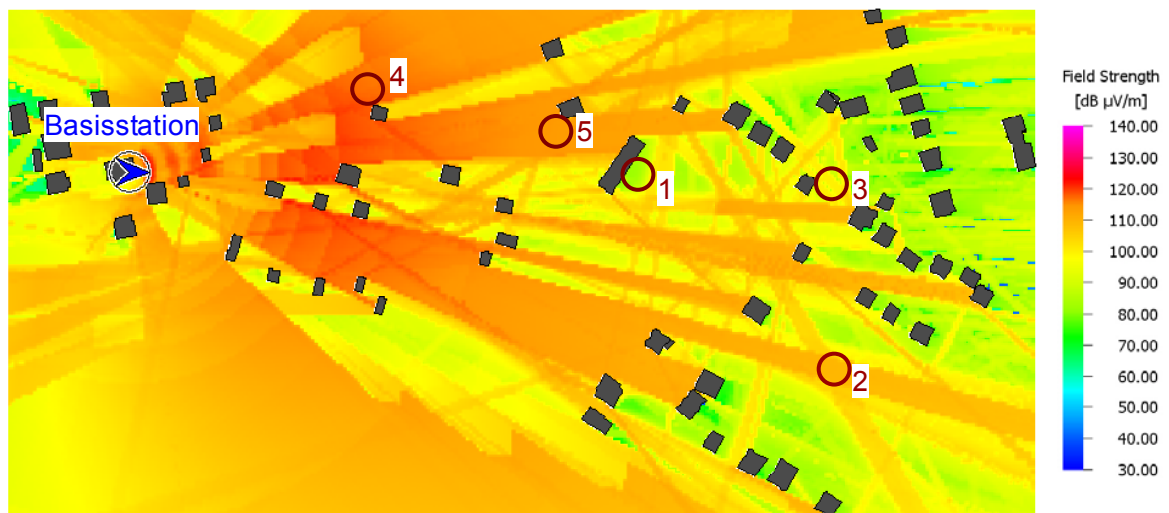


Bild 3.17: Simulationsergebnis mit Winprop

Analog zu den Darstellungsweisen der vorangegangenen Berechnungsergebnisse sind in den folgenden Bildern die Ergebnisse der Simulationen von EFC-400 (Bild 3.18) und Wireless Insite (Bild 3.19) dargestellt.

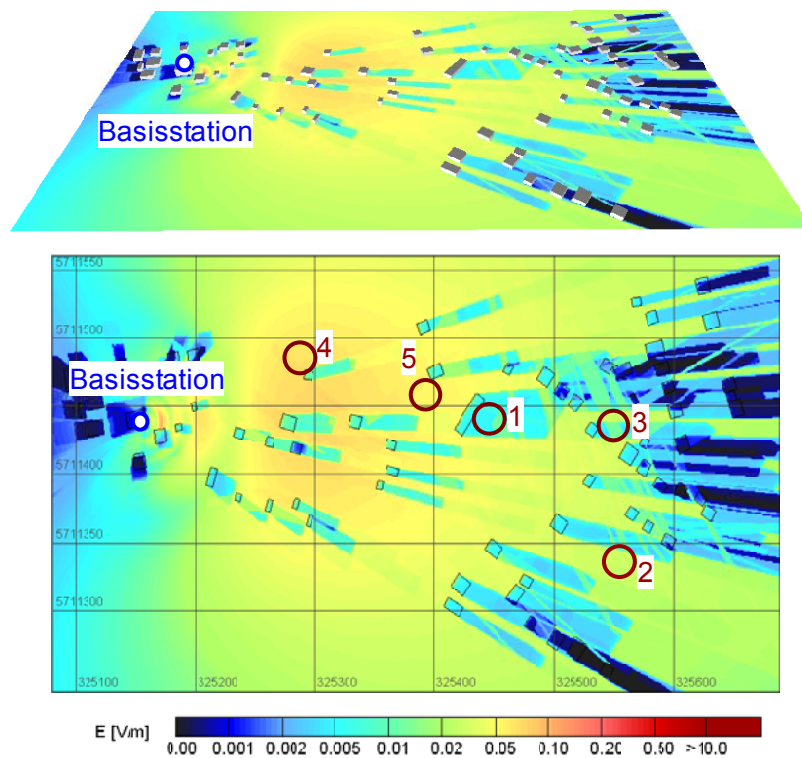


Bild 3.18: Simulationsergebnis mit EFC-400

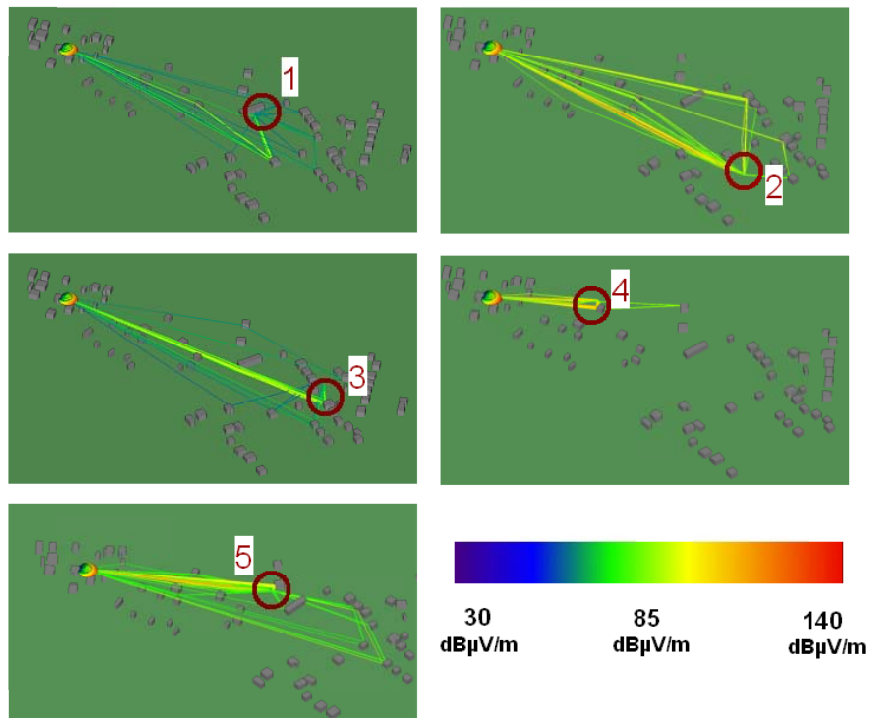


Bild 3.19: Simulationsergebnis von Wireless Insite; Darstellung der Ausbreitungspfade zu den einzelnen Vergleichsgebieten

Bild 3.20 zeigt als Zusammenfassung der Simulationen den Vergleich der berechneten Immissionen in den fünf Vergleichsgebieten getrennt nach dem jeweiligen Softwarepaket. Wie schon im vorangegangenen Abschnitt werden die Vergleichsgebiete wieder gruppiert nach dem Kriterium der Sichtverbindung. Darüber hinaus ist auch noch das Berechnungsergebnis für die Methode „Freiraum + 3 dB“ dargestellt.

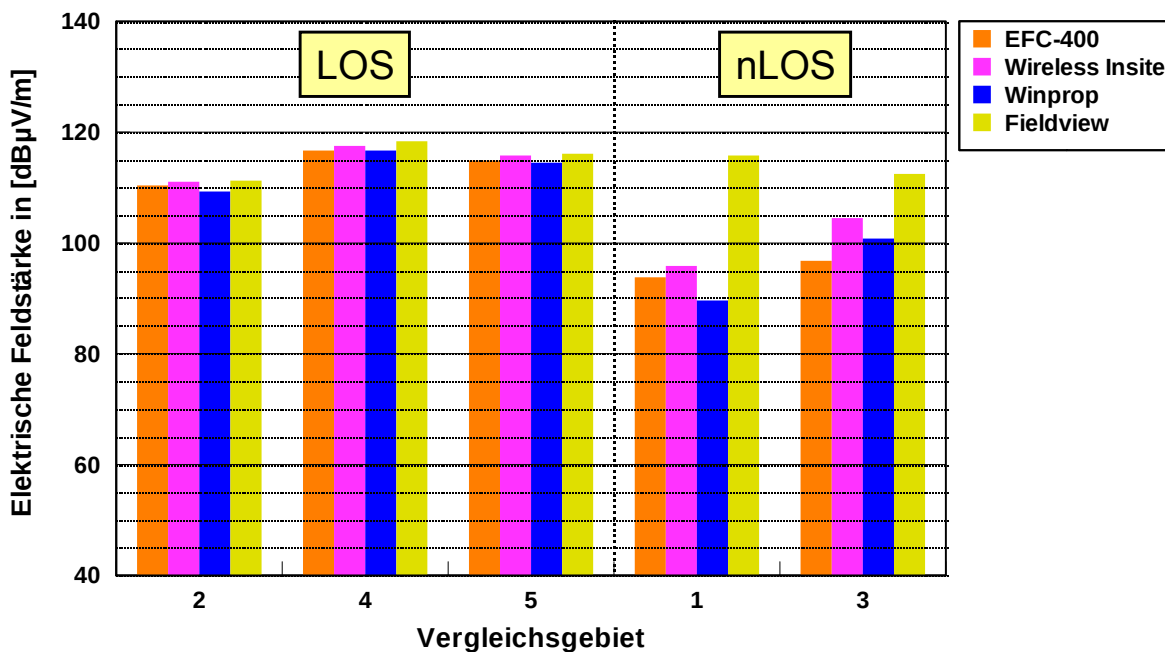


Bild 3.20: Vergleich der Simulationsergebnisse für die Konfiguration „ländliches Gebiet mit dünner Besiedlung“

Aus Bild 3.20 wird deutlich, dass alle Softwarepakete in den Vergleichsgebieten 2, 4 und 5 bei direkter Sicht zur Sendeanlage eine gute Übereinstimmung der berechneten Feldstärke liefern. Die absoluten Schwankungsbreiten für die Berechnungsergebnisse in diesen Gebieten liegen zwischen 1,6 dB und 1,9 dB. In den Vergleichsgebieten ohne direkte Sicht zur Sendeanlage liegen die absoluten Schwankungsbreiten der Ergebnisse bei der hier betrachteten Konfiguration bei maximal 26,2 dB bzw. 6,3 dB bei Vernachlässigung von Fieldview.

Aus diesen Ergebnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen: Die Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ (Fieldview) weist auch hier unter der Bedingung einer LOS-Situation ähnliche Simulationsergebnisse wie die anderen hier untersuchten Programme auf. In nLOS-Situationen liegen die Ergebnisse dieser reinen Freiraum-Methode allerdings zum Teil deutlich oberhalb der anderen Softwarepakete.

In Tabelle 3.5 sind wiederum die einzelnen Simulationszeiten für die hier betrachtete Konfiguration dargestellt.

	EFC-400	Wireless Insite	Winprop	Fieldview
Zeitdauer in [h]	3	12	2 + 0,2	0,1

Tabelle 3.7: Simulations- und Modellierungszeit der einzelnen Programme für die hier betrachtete Konfiguration

Bei den Simulationszeiten ist zu beachten, dass bei Wireless Insite nicht das gesamte Simulationsgebiet, sondern lediglich 5 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.

3.4.3 Konfiguration 3: Indoor-Berechnung

In diesem Abschnitt wird eine fiktive Konfiguration behandelt, bei der die Immission durch eine WiMAX-Basisstation, die sich auf einem Gebäude in einem z.B. Gewerbegebiet befindet, innerhalb eines Gebäudes berechnet wird. Als Grundlage für das Gebäude dient ein Trakt der IMST GmbH. Für die anlagenseitigen Simulationsparameter wurden folgende Daten angenommen

- Sendeanenne: Andrew SA3400
- Sendeleistung: 10 W
- Sendefrequenz: 3500 MHz
- Antennenhöhe: 24 m
- Azimut: 320° (bezogen auf die 0°-Nordrichtung, Uhrzeigersinn)
- Downtilt: 2°

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Lage und Sichtverhältnisse (LOS: direkte Sicht; nLOS: keine direkte Sicht) in den jeweiligen Vergleichsgebieten zur Sendeantenne sowie die zugehörigen lateralen Abstände.

Szenario: Indoor-Berechnung			
	Lage	Sichtverhältnis zur Basisstation	Laterale Entfernung zur Basisstation in [m]
Vergleichsgebiet 1	indoor	LOS	142
Vergleichsgebiet 2	indoor	LOS	158

Tabelle 3.8: Überblick über die Lage der Vergleichsgebiete, die Sichtverhältnisse und der Abstände für dieses Szenario

Die Simulationen in allen Softwarepaketen wurden auf einer Ebene von 4,4 m über Grund (1.OG) durchgeführt. Die Konfiguration mit der Basisstation und die zwei Vergleichsgebiete sind in Bild 3.21 zu sehen.

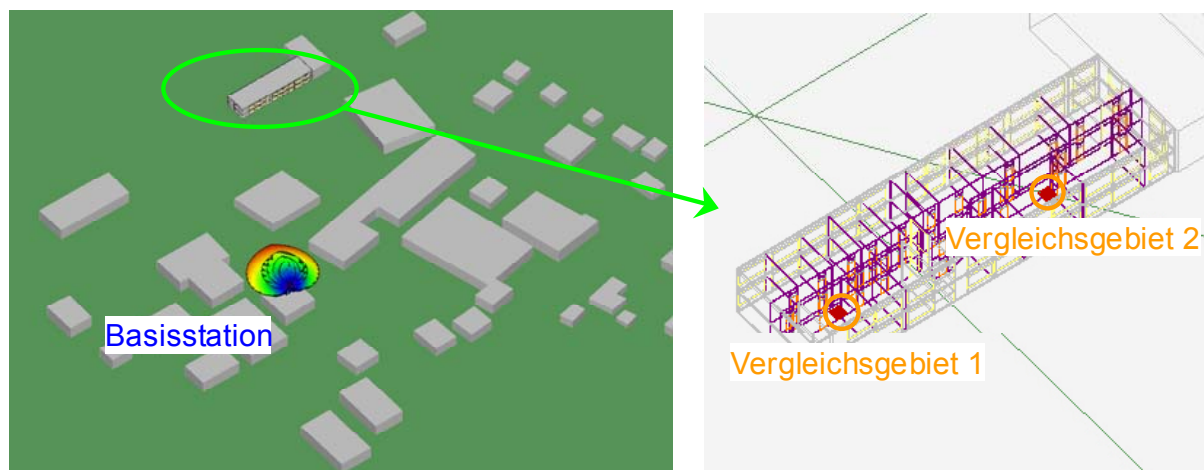


Bild 3.21: Simulationsumgebung: Immissionsverteilung innerhalb eines Gebäudes

In den anschließenden Bildern 3.22 bis 3.24 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Neben dem Standort der Basisstation sind auch wieder die zwei unterschiedlichen Vergleichsgebiete eingezeichnet. Es wurde die Immission nur innerhalb der Ebene der Vergleichsgebiete des betrachteten Gebäudes berechnet.

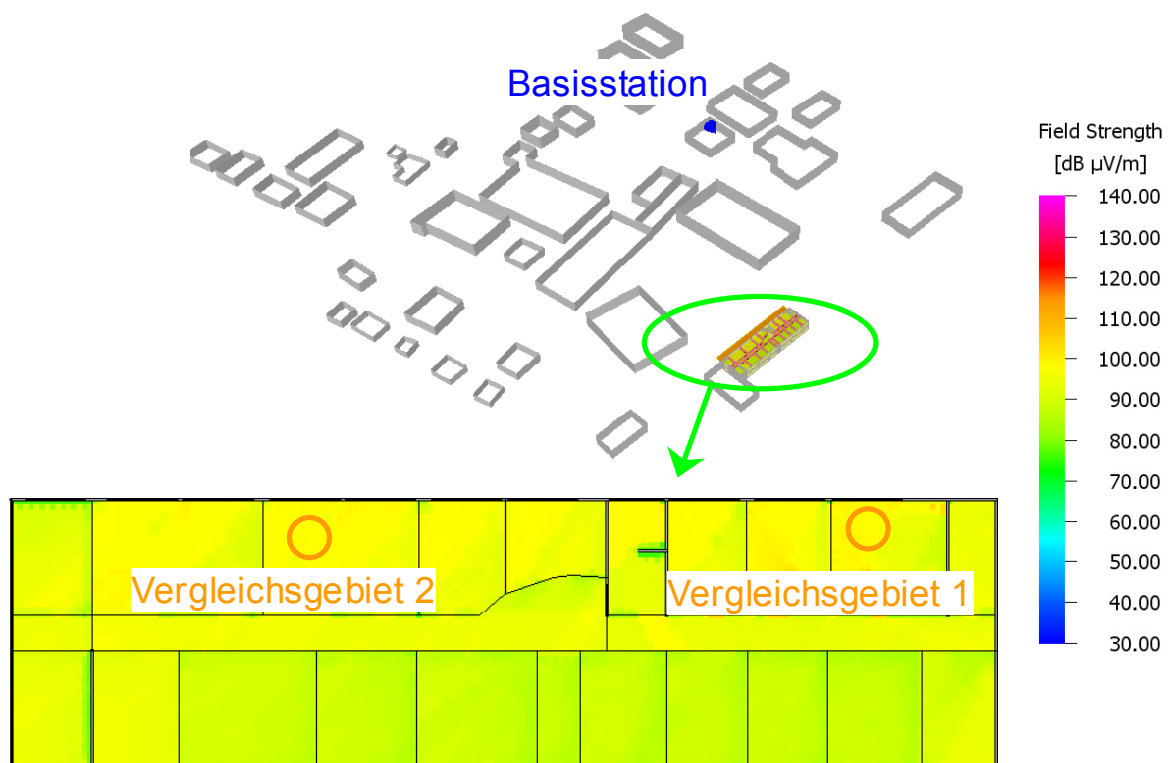


Bild 3.22: Simulationsergebnis mit Winprop

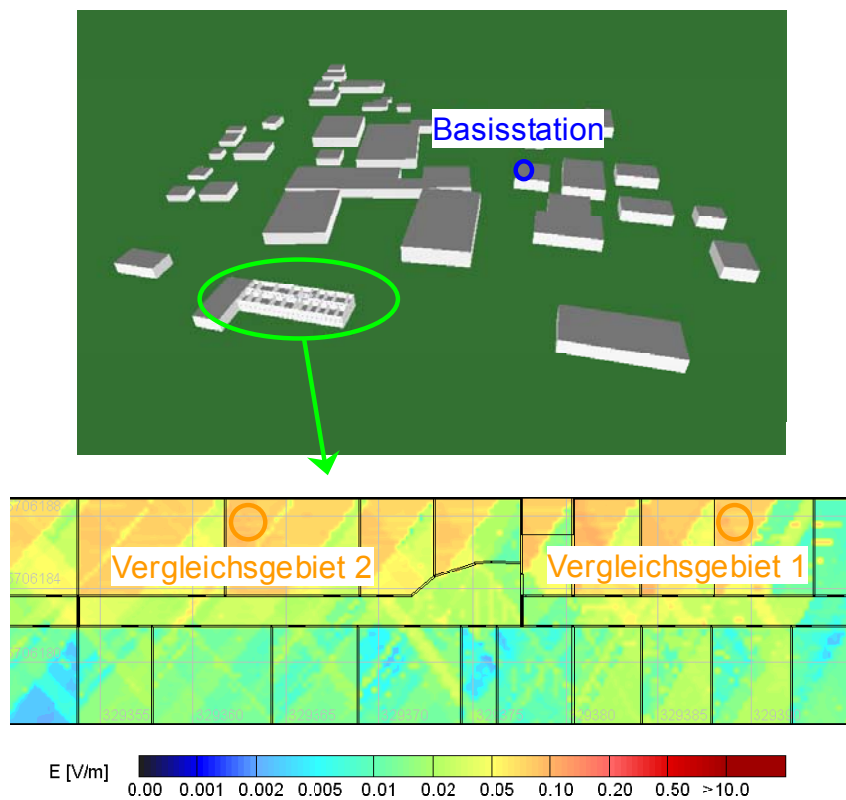


Bild 3.23: Simulationsergebnis von EFC-400

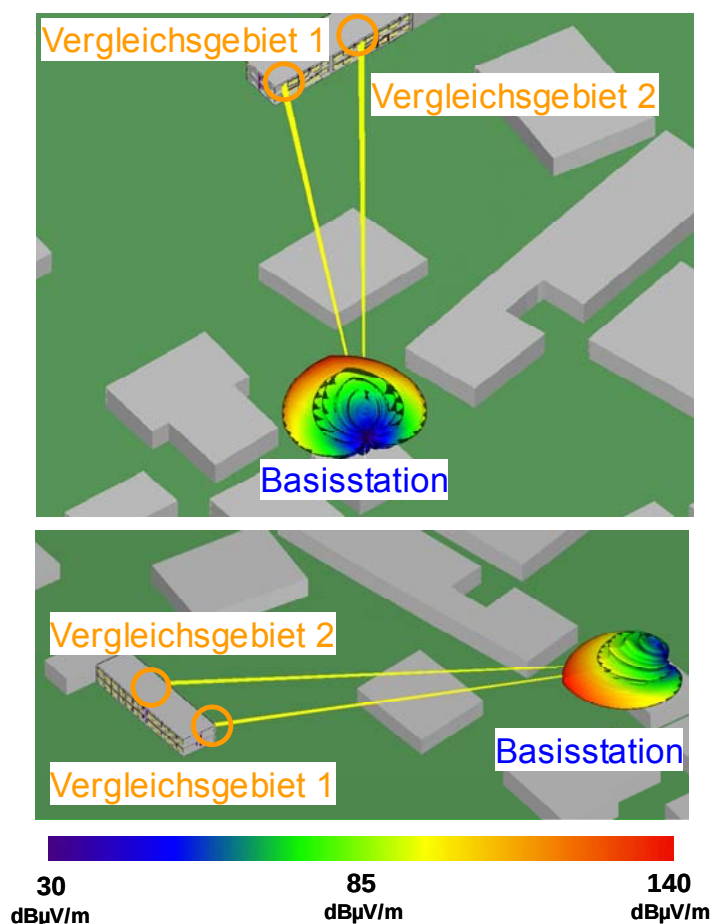


Bild 3.24: Simulationsergebnis von Wireless Insite

Bild 3.25 zeigt als Zusammenfassung der Simulationen den Vergleich der berechneten Immissionen in den zwei Vergleichsgebieten getrennt nach dem jeweiligen Softwarepaket.

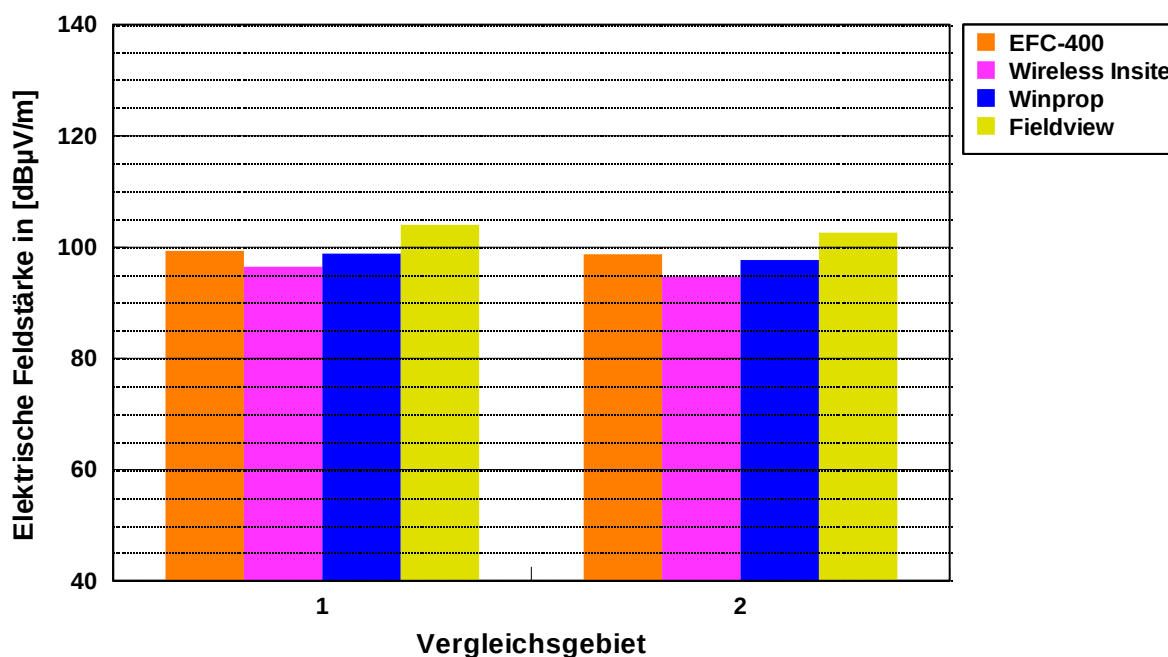


Bild 3.25: Simulationsergebnisse Indoor-Umgebung

Bild 3.25 zeigt auf den ersten Blick, dass alle Softwarepakete in den Vergleichsgebieten ähnliche Ergebnisse liefern. Hierbei ist aber folgender Aspekt zu berücksichtigen: Dadurch, dass das in den Simulationen verwendete Fensterglas nur eine Dämpfung von 1,5 dB (vgl. Tabelle 3.3) aufweist, liegt das Berechnungsergebnis der einfachen Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ in der gleichen Größe wie die der anderen Programme. Würde hier eine deutlich höhere Dämpfung der Glasscheiben vorliegen, würde auch die Überbewertung der Ergebnisse von Fieldview in gleichem Maße steigen.

In Tabelle 3.9 sind die einzelnen Simulationszeiten der Softwarepakete für die hier betrachtete Konfiguration zu sehen.

	EFC-400	Wireless Insite	Winprop	Fieldview
Zeitdauer in [h]	6	24	3 + 0,2	0,2

Tabelle 3.9: Simulations- und Modellierungszeit der einzelnen Programme für die hier betrachtete Konfiguration

Bei den Simulationszeiten ist zu beachten, dass die Immission bei Wireless Insite im Gegensatz zu EFC-400 und Winprop nicht in der gesamten Etage, sondern lediglich in zwei kleinen (1 m x 1 m) Arealen berechnet wurde.

3.4.4 Konfiguration 4: Endgerät

In diesem Abschnitt wird eine Konfiguration behandelt, bei der die Immission durch ein *Endgerät* berechnet wird. Als Grundlage für das im folgenden verwendete Gebäude dient ein Trakt der IMST GmbH in Kamp-Lintfort, das in den Softwarepaketen dreidimensional modelliert wurde. In Anlehnung an [SCHMI 06] wird das WiMAX-Endgerät als Dipol modelliert. Als Simulationsparameter wurden folgende Daten angenommen:

- Sendeanenne: Dipol
- Sendeleistung: 100 mW
- Sendefrequenz: 3500 MHz
- Antennenhöhe: 1,5 m
- Azimut: omnidirektional
- Downtilt: 0°

Die Simulationsumgebung besteht aus einer komplexen Gebäudestruktur mit zwei Etagen und unterschiedlichen Materialien (siehe Bild 3.26).

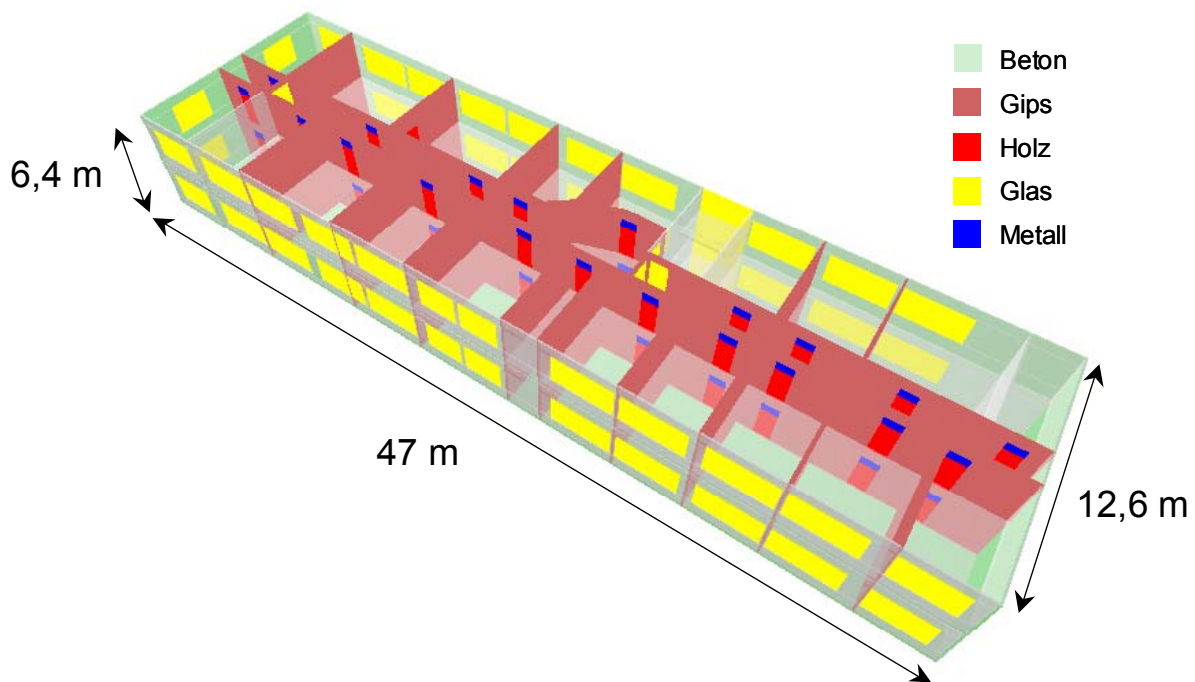


Bild 3.26: Modellierungsumgebung für die Bestimmung der Immission durch ein Endgerät

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 einem Nachbarbüro
- Direkte Sichtverbindung zum Endgerät (LOS)
- Keine direkte Sichtverbindung zum Endgerät (nLOS)
- Exposition durch ein Endgerät in einer anderen Etage

Wie schon in Abschnitt 3.2.4 beschrieben ist es für eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse der Programme untereinander essentiell, dass in allen Programmen die gleichen Materialien nachgebildet werden. Es existieren in den verwendeten Programmen aber unterschiedliche Methoden zur Behandlung von Materialien, wodurch sich bereits differierende Berechnungsergebnisse ergeben könnten. In den nachfolgend dargestellten Simulationen wurden folgende Materialien verwendet

	Winprop und Wireless Insite		EFC-400
Material	Relative Permittivität	Leitfähigkeit (3500 MHz) [S/m]	Transmissions- dämpfung [dB]
Beton	6	0,136	20
Glas	6	0,0089	1,5
Gips	4	0,0778	7,5
Holz	2	0,069	1,3
Metall	1	1000	400

Tabelle 3.10: Materialparameter für die Konfiguration „Expositionsbestimmung durch ein Endgerät“

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Lage und Sichtverhältnisse (LOS: direkte Sicht; nLOS: keine direkte Sicht) in den jeweiligen Vergleichsgebieten zur Sendeantenne sowie die zugehörigen lateralen Abstände.

Szenario: Indoor-Berechnung			
	Lage	Sichtverhältnis zur Basisstation	Laterale Entfernung zum Endgerät in [m]
Vergleichsgebiet 1	indoor	LOS	4,4
Vergleichsgebiet 2	indoor	nLOS	11,3
Vergleichsgebiet 3	indoor	nLOS	4,8
Vergleichsgebiet 4	indoor	nLOS	18,3
Vergleichsgebiet 5	indoor	nLOS	3,1
Vergleichsgebiet 6	indoor	nLOS	7,2

Tabelle 3.11: Überblick über die Lage der Vergleichsgebiete, die Sichtverhältnisse und der Abstände für dieses Szenario

Die Simulationen wurden mit allen Softwarepaketen in zwei verschiedenen Ebenen auf einer Höhe von 1,2 m bzw. 4,4 m über Grund durchgeführt. Im folgenden sind diese beiden Ebenen mit der Position des Endgerätes und der einzelnen Vergleichsgebiete dargestellt. In Bild 3.27 sind die beiden Ebenen in einer zweidimensionalen Darstellung und in Bild 3.28 als dreidimensionales Drahtgerüst zu sehen.

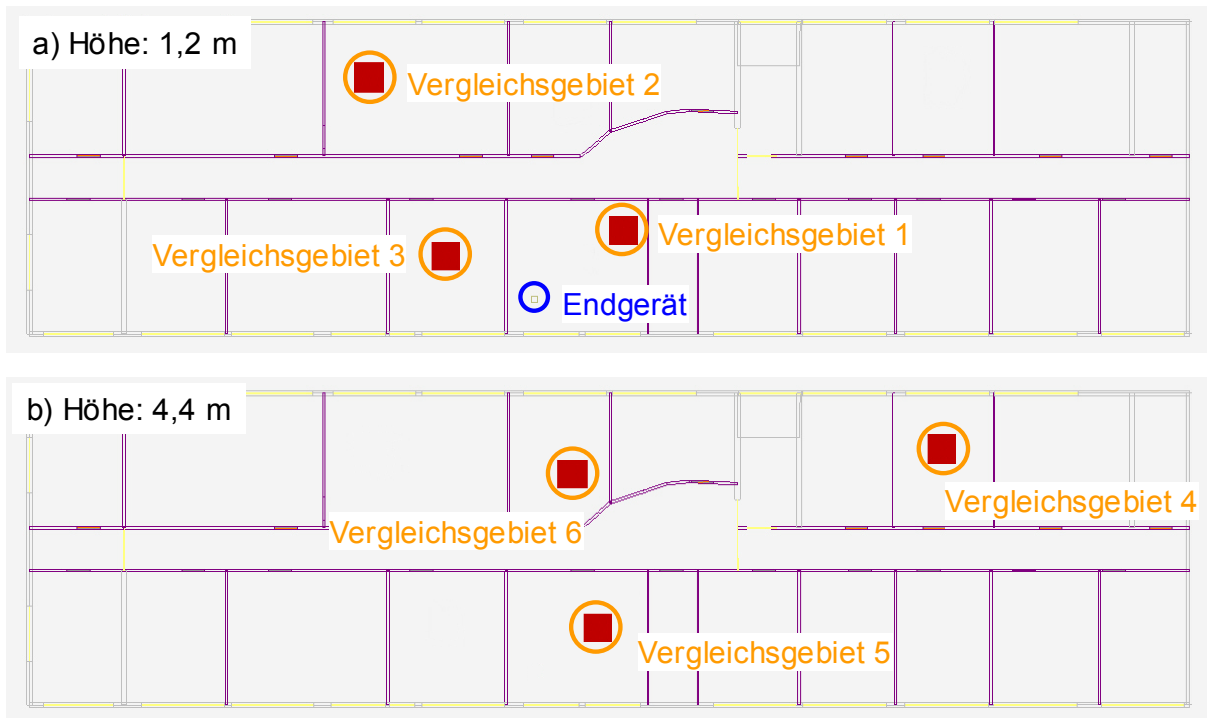


Bild 3.27: Zweidimensionale Übersicht über die Position des Endgerätes und die Verteilung der Vergleichsgebiete in einer Höhe von
 a) 1,2 m
 b) 4,4 m

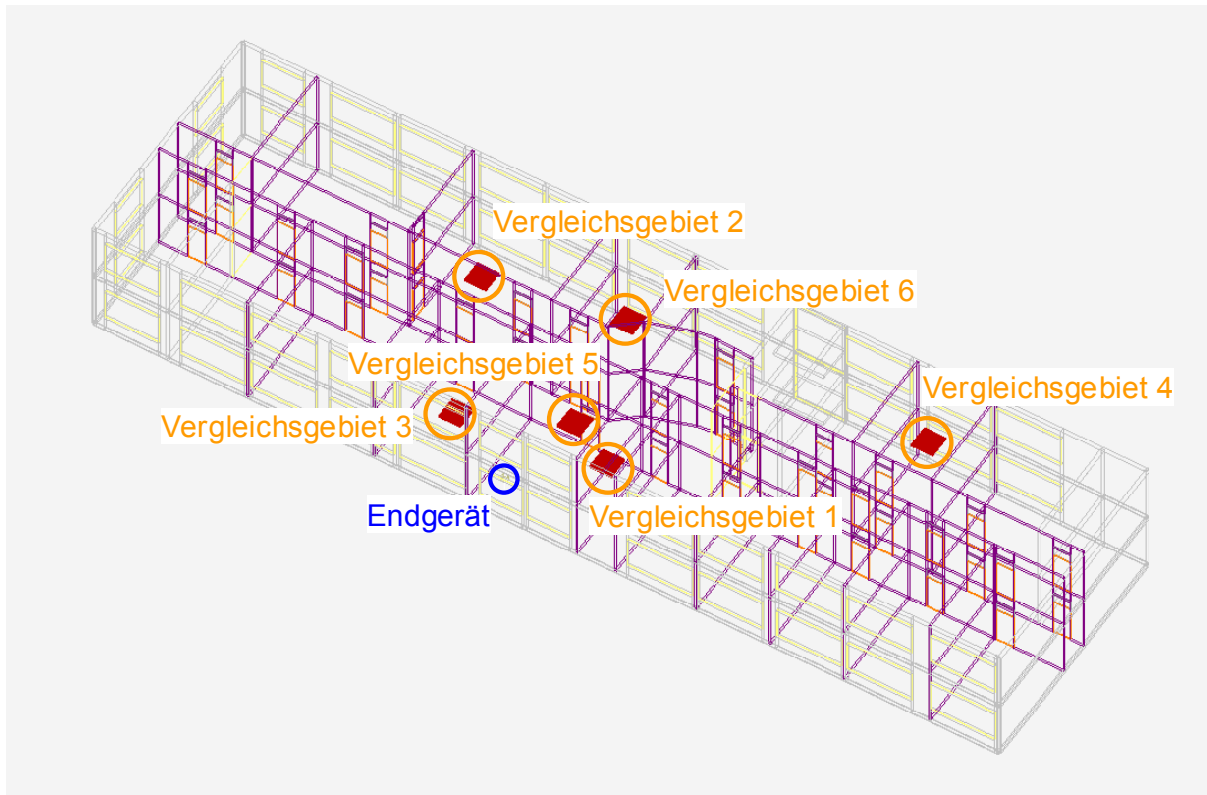


Bild 3.28: Dreidimensionale Übersicht über die Position des Endgerätes und die Verteilung der Vergleichsgebiete als Drahtgestell

Im anschließenden Bild sind die Simulationsergebnisse von Winprop für die beiden Ebenen dargestellt. Neben dem Standort des Endgerätes sind auch wieder die fünf unterschiedlichen Vergleichsgebiete markiert. Hierbei liegt bei Vergleichsgebiet 1 direkte Sicht zur Anlage vor (LOS), wohingegen die verbleibenden Vergleichsgebiete keine direkte Sicht zum Endgerät aufweisen (nLOS).

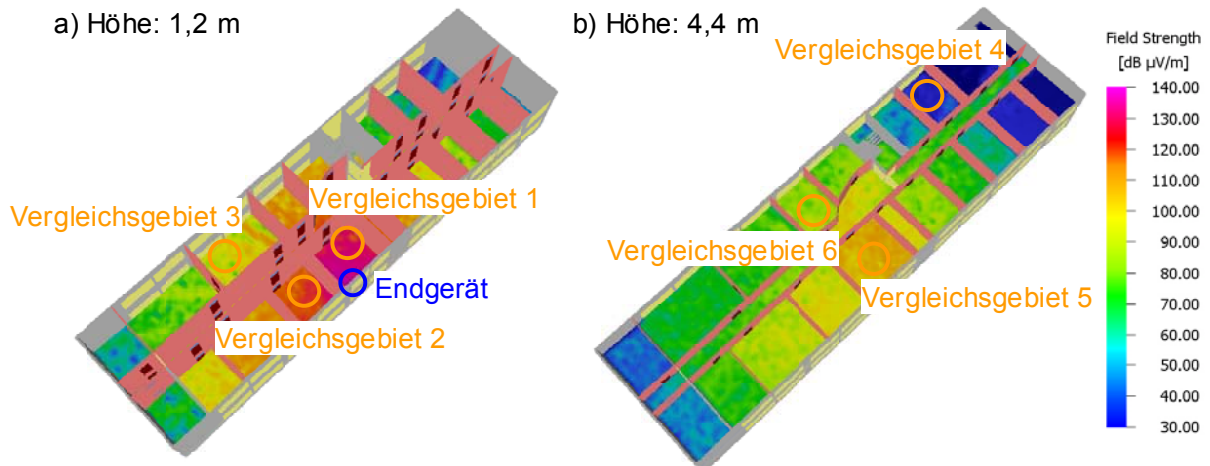


Bild 3.29: Simulationsergebnis von Winprop

Analog zu der Darstellungsweise des vorangegangenen Berechnungsergebnisses sind in den folgenden Bildern die Ergebnisse der Simulationen von EFC-400 (Bild 3.30) und Wireless Insite (Bild 3.31) dargestellt.

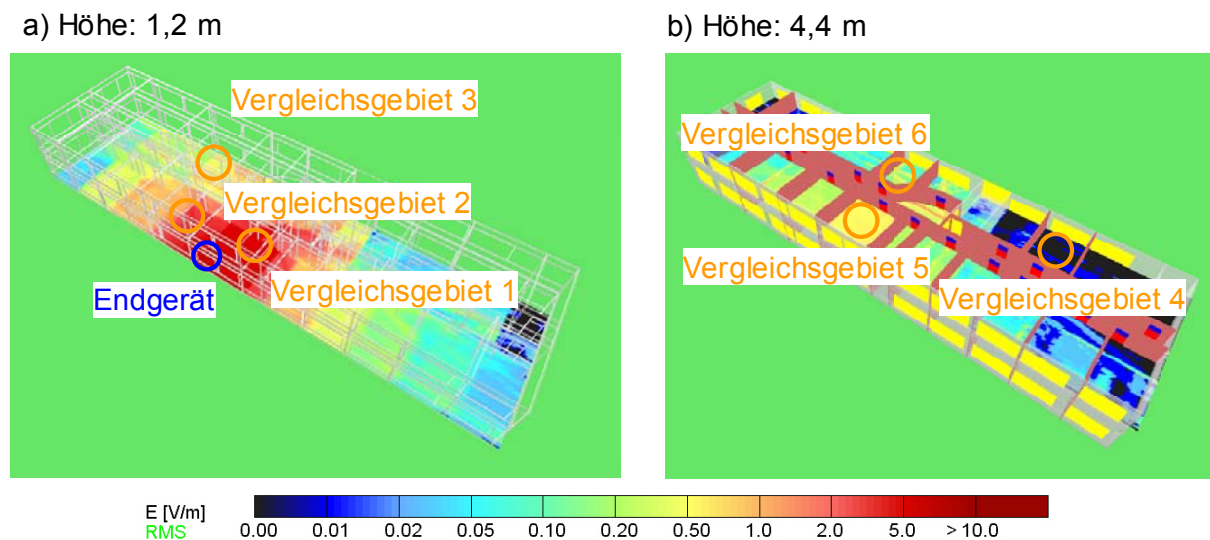


Bild 3.30: Simulationsergebnis von EFC-400

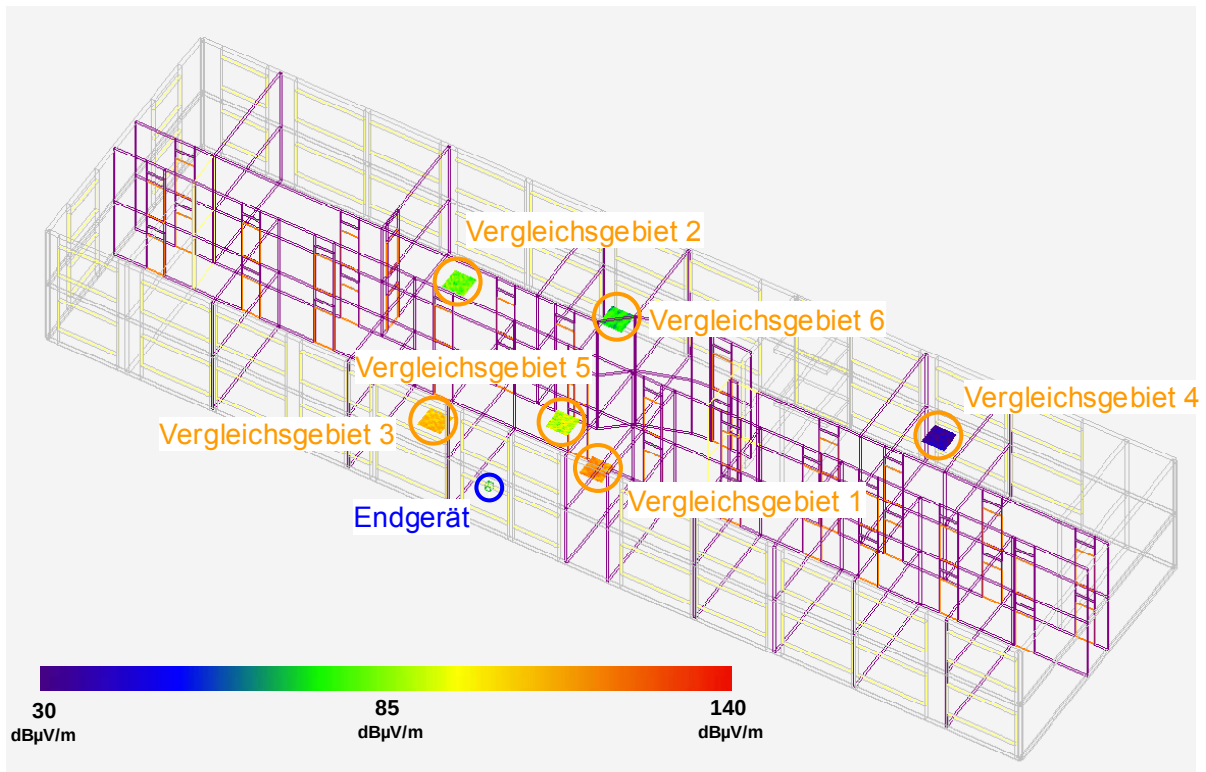


Bild 3.31: Simulationsergebnis von Wireless Insite

Bild 3.32 zeigt als Zusammenfassung der Simulationen den Vergleich der berechneten Immissionen in den fünf Vergleichsgebieten getrennt nach dem jeweiligen Softwarepaket. Die Vergleichsgebiete sind wieder nach dem Kriterium der Sichtverbindung gruppiert. Darüber hinaus wurde auch wieder die Immission mit der Methode „Freiraum + 3 dB“ berechnet.

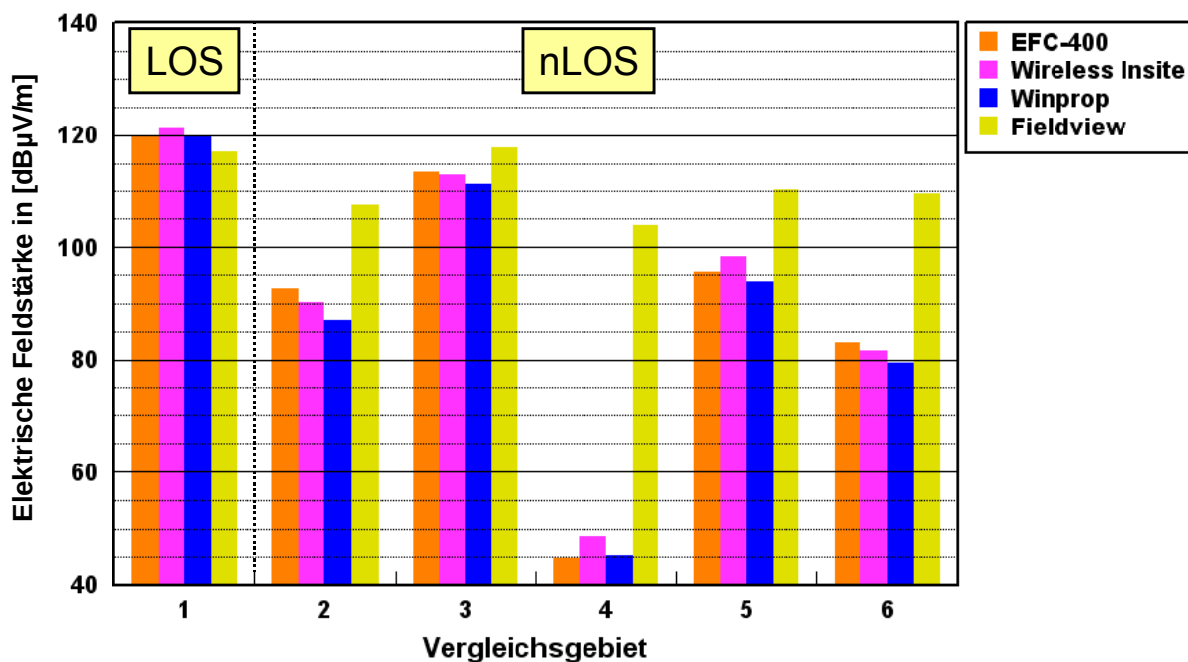


Bild 3.32: Simulationsergebnisse für die Konfiguration „Endgerät in einer Indoor-Umgebung“

Zu Bild 3.32 ist zunächst einmal noch folgende Anmerkung zu machen. Die minimale angezeigte Feldstärke bei EFC-400 liegt bei 0,001 V/m und somit bei 60 dB μ V/m (siehe Bild 3.30). Um auch für Vergleichsgebiet 4 eine Aussage bezüglich der Immission treffen zu können, wurde eine erneute Simulation mit einer Sendeleistung von 1 kW durchgeführt und anschließend die errechnete Feldstärke wieder auf eine Sendeleistung von 100 mW herunter skaliert.

Als Ergebnis lässt sich aus Bild 3.32 festhalten, dass alle Softwarepakete in dem Vergleichsgebiet 1 bei Sicht zum Endgerät ähnliche Ergebnisse liefern. Die absolute Schwankungsbreite für die Berechnungsergebnisse in diesem Gebiet liegt bei 4,3 dB und ohne Berücksichtigung des Resultates von Fieldview bei 1,7 dB. Es zeigt sich, dass die Methode „Freiraum + 3 dB“ im Gegensatz zu den anderen Programmen leicht geringere Werte liefert, was in der stark reflektierenden Simulationsumgebung begründet ist, in der ein Zuschlag auf die reine Freiraumausbreitung von 3 dB zu gering sein könnte. Dies wird im Teilbericht III nochmals durch einen Vergleich mit Messwerten in einem realen Szenario untersucht.

Die Simulationsergebnisse bei den Vergleichsgebieten ohne direkte Sicht zum Endgerät müssen differenziert betrachtet werden. Zum einen liefert die Methode „Freiraumausbreitung + 3 dB“ deutliche Überbewertungen, was ja aufgrund der Tatsache, dass keine Hindernisse in der Berechnung berücksichtigt werden, zu erwarten war. Für die Vergleichsgebiete 2 bis 6 liegt die absolute Schwankungsbreite der Ergebnisse ohne die Berücksichtigung von Fieldview bei maximal 5,5 dB.

Das Vergleichsgebiet 2, das abgesehen von Vergleichsgebiet 4 den größten Abstand zum Endgerät aufweist, hat auch die größte absolute Schwankungsbreite der Berechnungsergebnisse von 5,5 dB. Diese kann in den Unterschieden der Materialbehandlung in den einzelnen Programmen begründet sein. Ist z.B. jede Transmission durch eine Wand mit einem Dämpfungsunterschied behaftet, der z.B. daraus resultiert, dass die Dämpfung abhängig ist von der Einfallrichtung, diese aber bei EFC-400 nur durch einen einzelnen Wert widergespiegelt wird, so summiert sich diese Differenz natürlich mit steigender Anzahl von Transmissionen.

In Tabelle 3.12 sind die einzelnen Simulationszeiten der Softwarepakete für die hier betrachtete Konfiguration zu sehen.

	EFC-400	Wireless Insite	Winprop	Fieldview
Zeitdauer in [h]	10	28	8,5 + 0,2	0,2

Tabelle 3.12: Simulations- und Modellierungszeit der einzelnen Programme für die hier betrachtete Konfiguration

Bei den Simulationszeiten ist zu beachten, dass bei Wireless Insite nicht die gesamte Etage, sondern lediglich sechs 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.

3.5 Fazit

Es wurden verschiedene Softwarepakete und Eingabeparameter zur Berechnung der Immissionsverteilung von WiMAX-Basisstationen und Endgeräten untersucht.

Bezüglich der Eingabeparameter kann zusammenfassend festgehalten werden, dass für konventionelle Sendeantennen von Basisstationen eine Synthese der Abstrahlcharakteristik zur Kompensation der Abhängigkeit von Frequenz, Downtilt und Montageumgebung direkt aus [BOR 05] und [BOR 06-2] übernommen werden kann. Durch den Einsatz von adaptiven Antennen zum Beamforming können schmale (bezüglich Azimut und Elevation) Abstrahlbereiche erzeugt werden, mit denen die jeweilige Abstrahlung in zeitlicher Abfolge gezielt auf den jeweils aktiven Benutzer gerichtet werden kann. Für eine Expositionsberechnung, die nicht nur eine kurzfristige, momentane, sondern eine längerfristige Prognose liefern soll, scheint es sinnvoll, eine synthetisierte Antennencharakteristik als Umhüllende aller möglichen Zustände der adaptiven Antenne zu generieren.

Insgesamt zeigen die Vergleiche der Simulationsergebnisse (Maximalwerte in einer bestimmten Fläche) von den hier betrachteten Softwarepaketen keine gravierenden Unterschiede. Die Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ liefert gerade in Situationen mit direkter Sicht zur Sendeantenne annähernd die gleichen Ergebnisse wie die anderen hier betrachteten Programme. Es hat sich aber auch gezeigt, dass in Situationen, in denen keine Sicht zur Sendeantenne herrscht, die Berechnungsergebnisse der anderen Programme wesentlich kleiner sind als die mit Freiraumausbreitung berechneten.

Bei der Immissionsberechnung von Endgeräten in Indoor-Umgebungen hat sich gezeigt, dass Differenzen in den Simulationsergebnissen in Unterschieden der Materialbehandlung in den einzelnen Programmen begründet sein können, da zum Teil die Abhängigkeit der Dämpfung von der Einfallsrichtung nicht berücksichtigt wird.

Dennoch scheinen zunächst alle Softwarepakete mit den oben angesprochenen Einschränkungen der Methode „Reine Freiraumausbreitung + 3 dB“ an dieser Stelle geeignet, die Immissionsverteilung von WiMAX-Sendeanlagen zu bestimmen, und werden somit in Teilbericht III für den Vergleich zwischen Berechnung und Messung an ausgewählten Szenarien herangezogen. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass Wireless Insite aufgrund des enormen Rechenaufwandes keine flächendeckende Immissionsverteilung im gesamten Versorgungsgebiet liefern kann.

Literaturverzeichnis zu Teil II

- [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 06] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek, 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).
- [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).
- [BUWAL 03] **Mobilfunk-Basisstationen (UMTS-FDD) - Messempfehlung, Entwurf vom 17.09.2003**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2003).
- [BUWAL 05] **Rundfunk- und Funkrufsendeanlagen - Vollzugsempfehlung zur NISV**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, (2005).
- [EN 50383] **EN 50383:2002**, *Basic Standard for the Calculation and Measurement of Electromagnetic Field Strength and SAR Related to Human Exposure From Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems (110 MHz - 40 GHz)*. CENELEC Standard, August 2002.
- [FUJ 04] **Fujitsu**, *RF Spectrum Utilization in WiMAX*, White Paper WiMAX Spectrum, Fujitsu Microelectronics America, Inc., (2004).
- [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).
- [IEC 62209-2] **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)*. Edition 1, Committee Draft, 2007.
- [IEEE 04] **IEEE Std. 802.16-2004**, *Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, New York, (2004).

- [MAU 07] **J. Maucher, J. Furrer**, *WiMAX, Der IEEE-802.16-Standard: Technik, Anwendung, Potenzial*, Heise Zeitschriften Verlag GmbH, (2007).
- [PAU 00] **P. Pauli, D. Moldan**, *Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen – Baustoffe und Abschirmmaterialien*, 05/2000.
- [RAU 00] **Chr. Rauscher**, *Grundlagen der Spektrumanalyse*, Rohde & Schwarz, München, (2000).
- [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).
- [SCHMI 06] **G. Schmid, P. Preiner, D. Lager, R. Überbacher, and 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 Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, ARC Seibersdorf research GmbH, Österreich (2006)

Abkürzungsverzeichnis zu Teil II

BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
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
MAN	Metropolitan Area Network (engl.)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (engl.)
nLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (engl.) → Orthogonales Frequenzmultiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (engl.) → Orthogonaler Frequenzvielfachzugriff
RBW	Resolution bandwidth (engl.) → Auflösebandbreite
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (engl.) → Skalierbarer orthogonaler Frequenzvielfachzugriff
SS	Subscriber Station (engl.) → Teilnehmerstation
STC	Space Time Coding
TDD	Time Division Duplex (engl.) → Zeitduplex
TDMA	Time Division Multiple Access (engl.) → Zeitmultiplex
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem
USGS	U.S. Geological Survey (engl.) → Geologische Überwachungsbehörde der USA
UTM	Universales Transversales Mercator System
VBW	Video bandwidth (engl.) → Videobandbreite
WLAN	Wireless Local Area Network (engl.)
WLL	Wireless Local Loop (engl.)

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole zu Teil II

c_0	Freiraum-Lichtgeschwindigkeit
f	Frequenz
h	Höhe
r	Abstand
t	Zeit
B	Bandbreite
E	Elektrische Feldstärke
I	Immission
K	Antennenfaktor
P	Leistung
R_{ss}	Empfängerempfindlichkeit
S	elektrische Leistungsflussdichte
SNR_{min}	minimales Signal- zu Rauschleistungsverhältnis
T	Zeitdauer
Z_{F0}	Freiraumwellenwiderstand