

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Bestimmung der Exposition durch WiMAX – Vorhaben 3606S04515

Auftragnehmer:

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

** EM-Institut GmbH, Regensburg

Band 1: Bestandsaufnahme zum Stand der Technik

Christian Bornkessel *

Markus Schubert *

Matthias Wuschek **

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

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

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

BfS-RESFOR-10/09-Bd.1

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2009042313

Salzgitter, Mai 2009

Bestimmung der Exposition durch WiMAX

Abschlussbericht

erstellt für das
Bundesamt für Strahlenschutz

Projektleitung beim Auftragnehmer

Dr. Christian Bornkessel
Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik (IMST) GmbH
Abteilung Prüfzentrum
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2
47475 Kamp-Lintfort
Tel: 02842/981-383
Fax: 02842/981-399
E-Mail: bornkessel(a)imst.de

Prof. Dr. Matthias Wuschek
EM-Institut GmbH
Carlstraße 5
93049 Regensburg
Tel.: 0941/298365-0
Fax: 0941/298365-2
E-Mail: matthias.wuschek(a)em-institut.de

Autoren

Dr. Christian Bornkessel, IMST GmbH
Markus Schubert, IMST GmbH
Prof. Dr. Matthias Wuschek, EM-Institut GmbH

Projektleitung beim Auftraggeber

Dirk Geschwentner
Bundesamt für Strahlenschutz
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim
Tel: 01888/333-2148
Fax: 01888/333-2305
E-Mail: DGeschwentner(a)bfs.de

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Kurzzusammenfassung

Ziel vorliegenden Forschungsvorhabens war es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln und damit die Immissionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder in der Umgebung von WiMAX-Sendeanlagen und den dazugehörigen Geräten zu ermitteln.

Bezüglich *Expositionsmessungen an WiMAX-Sendeanlagen* können zum Nachweis der *Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV* die Methoden spektrale Messung, Erfassung im Zeitbereich und Kanalleistungsmessung eingesetzt werden, wenn die relevanten Einstellparameter am Spektrumanalysator geeignet gewählt sind. Vor der eigentlichen Expositionsmessung sollte dabei im Rahmen einer Vorhermessung im Zeitbereich die genaue Signalstruktur des WiMAX-Signals bestimmt werden. Örtliche und zeitliche Durchschnittswerte können durch diskrete Messung an einzelnen Punkten oder permanente Messung 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. Für Langzeitmessungen wurde ein neues Verfahren entwickelt, das auf der Verwendung einer extrem langen Sweepzeit basiert.

Mittels „Schwenkmethode“ sowie Hochrechnung auf den maximalen Betriebszustand wurden spektrale Messungen der elektromagnetischen Felder in der Umgebung von WiMAX-Anlagen in insgesamt elf unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Die Messungen wurden bei verschiedenen Abständen, Sichtbedingungen, Orientierungen und Höhenunterschieden zu den Antennen durchgeführt und gestatten durch diese Systematik in gewissen Grenzen eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Szenarien.

Die Messungen ergaben sehr unterschiedliche Immissionswerte. Maximal wurden 0,84 V/m elektrische Feldstärke bzw. etwa 1,9 mW/m² Leistungsflussdichte (entspricht ca. 1,4 Prozent vom Feldstärkegrenzwert) gemessen; der kleinste Messwert betrug 0,002 V/m bzw. 0,01 µW/m² (entsprechend 0,003 Prozent vom Feldstärkegrenzwert). Der überwiegende Teil der Messwerte lag unterhalb von 0,02 V/m bzw. 1,1 µW/m² (entsprechend ca. 0,03 % vom Feldstärkegrenzwert). Raum- und zeitgemittelte Immissionen sind leistungsflussdichtebezogen um den Faktor 6 bis 11 kleiner als die oben genannten Werte.

Der Abstand ist im direkten Umfeld der Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) als Schätzer für die Immission wenig geeignet. Sichtbedingungen sowie die Lage des Messpunktes zur vertikalen Hauptstrahlrichtung der Antenne haben hingegen einen deutlichen Einfluss auf die Exposition. Mit einem Unterschiedsfaktor von mehr als 25 dB sehr deutlich ausgeprägt ist der Einfluss des Frequenzbandes auf die Immissionen. Die Ursache ist in den höheren Sendeleistungen der lizenzierten Anlagen (3,4-3,6 GHz) im Gegensatz zu lizenzfreien Anlagen (5,15-5,775 GHz) begründet.

Parallel zu WiMAX-Immissionen wurden in vier der elf Szenarien auch die UMTS-Immissionen an den Messpunkten mit erfasst. Insgesamt dominieren an etwa 85 % der Messpunkte die durch UMTS-Systeme hervorgerufenen Immissionen. Im Mittel lagen die UMTS-Immissionen etwa 13 dB über den WiMAX-Werten. Ein Grund für die größere Immission durch UMTS-Systeme liegt in der höheren installierten Sendeleistung. Aber auch andere Faktoren, wie die Antennencharakteristik oder die Orientierung der Messpunkte zur Hauptstrahlrichtung der Antenne, haben offensichtlich einen Einfluss.

Mit Langzeitmessungen konnten Auslastungsschwankungen dokumentiert werden, die zum Teil deutlich von den bei Mobilfunk-Basisstationen bekannten Verläufen abweichen und das private Internet-Nutzungsverhalten widerspiegeln.

Indoor-Endgeräte erzeugen in typischen Nutzungsszenarien eine deutlich höhere Exposition beim Nutzer als WiMAX-Basisstationen. SAR-Messungen unter maximalen Betriebsbedingungen zeigen bei Abständen zur Antenne im Zentimeterbereich Expositionen im Bereich von einigen Prozent der Basisgrenzwerte; bei (unter Normalbedingungen unrealistischem) direktem Kontakt zur Antenne kann es zu Überschreitungen der Basisgrenzwerte kommen. Bei höchster Sendeleistungsstufe wurden mittels Zeitbereichsmessverfahren in 50 cm Abstand noch elektrische Feldstärken bis 10,1 V/m (17 % des Feldstärke-Referenzwertes) gemessen, die aber sehr schnell mit der Entfernung abnehmen. Im Gegensatz dazu ist die Exposition bei den gemessenen Outdoor Units vernachlässigbar klein. Im realen Betrieb sind die auftretenden Immissionen durch den betriebsabhängigen Duty Cycle und die Leistungsregelung entsprechend kleiner.

Bezüglich Berechnungsverfahren wurden mehrere kommerziell verfügbare Programmpakete getestet. Einflüsse von Montageumgebung, Downtilt und Frequenz auf die Abstrahlcharakteristik werden durch ein synthetisiertes Diagramm berücksichtigt. Zur Einbeziehung der Gelände- und Gebäudedaten in die Programme wurden geeignete Techniken entwickelt.

In LOS-Szenarien prognostizierten alle Programme die Exposition zuverlässig. In NLOS-Szenarien überschätzen Freiraummodelle die gemessene Exposition teilweise deutlich, so dass hier die Einbeziehung von Gebäuden bzw. Wänden in die Simulation zwingend erforderlich ist.

Eine qualitative Betrachtung der Immissionsverteilung von WLAN-, UMTS- und WiMAX-Endgeräten unter der theoretischen Annahme einer Vollauslastung hat gezeigt, dass die Immissionsverteilung von WLAN und UMTS vergleichbar ist und in der gleichen Größenordnung liegt. Demgegenüber ist die Immission durch das WiMAX-Endgerät in dessen unmittelbarer Umgebung aufgrund der höheren Sendeleistung und höheren Antennengewinns größer, wird aber mit zunehmender Anzahl von Hindernissen aufgrund der frequenzbedingten höheren Transmissionsdämpfung geringer als die der anderen Systeme.

Ein Vergleich der auf 1 MBit/s normierten Immission unter der Annahme der theoretisch maximal zur Verfügung stehenden Datenrate hat gezeigt, dass die Feldstärke in Bezug auf 1 MBit/s bei UMTS aufgrund der kleineren Maximaldatenrate deutlich größer ist als bei den beiden anderen Technologien. Die normierte Immissionsverteilung von WLAN und WiMAX ist dagegen vergleichsweise ähnlich und liegt in der gleichen Größenordnung.

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

Abstract

The aim of the research project was to develop measurement and calculation methods and to apply them to determine the RF electromagnetic fields around WiMAX stations and terminal equipment.

Concerning exposure measurements at WiMAX stations to *prove compliance with exposure limits*, spectral, time domain and channel power methods can be used, if the relevant spectrum analyzer settings are chosen correctly. Here it is recommended to determine the signal structure of the WiMAX signal first in time domain by a pre-measurement. *Space and time averaged exposures* can be determined by discrete measurements at fixed points or by permanent measurements with slow movement of the antenna with afterwards averaging. In contrast to the compliance measurements, here a measurement of all three spatial components of the electric field strength (isotropic measurement) is necessary. For long term measurements a new methodology has been developed, which is based on an extremely long sweep time.

Using the spectral measurement technique with “sweeping method” and extrapolation on maximal operational state, the RF electromagnetic fields around WiMAX stations were measured in 11 different scenarios. The measurements were carried out at different distances, sight condition, orientations and height differences to the antennas and allow therefore to a certain extent exposure predictions at similar scenarios.

By the measurements different exposures were found: The highest value was found to be 0.84 V/m electric field strength and 1.9 mW/m² power density (corresponding to 1.4 % of the field strength limit). The smallest value was about 0.002 V/m and 0.01 μW/m² (corresponding to 0.003 %). The majority of the measurement results was below 0.02 V/m and 1.1 μW/m² (corresponding to 0.03 %). Time and space averaged power densities are a factor of about 6 to 11 smaller than the exposures given above.

The distance in the direct vicinity of the station (up to several 100 meters, depending on antenna height and downtilt) is not suited as a measure for quantifying WiMAX exposures. Sight conditions and orientation of the measurement point to the vertical main beam direction, however, have a large influence on the exposure. Also the frequency band is important for the exposure: License free stations (5.15-5.775 GHz) generate on average 25 dB lower exposures than stations in the licensed band (3.4-3.6 GHz), which is due to the different transmit power.

Parallel to the WiMAX exposure also UMTS exposure was measured in 4 of the 11 scenarios. Overall, at 85 % of the measurement points UMTS exposure dominates; on average the UMTS exposure was about 13 dB higher than the WiMAX exposure, which is due to the higher installed transmit power. Obviously also other factors like antenna characteristic or the orientation of the measurement points to the antenna's main lobe have an influence.

Long term measurements document traffic load variations, which differs in part significantly from the characteristics known from mobile phone base stations and reflect the private internet consumer behavior.

WiMAX indoor terminal equipment in typical user scenarios induces a significantly higher exposure at the user than the fixed WiMAX base stations. SAR measurements at maximal

operation conditions show exposures in the range of several percent of the basic restrictions at some centimeter distance to the antenna. At direct contact to the antenna (which is certainly unrealistic under normal conditions) the SAR basic restrictions may be exceeded. In 50 cm distance field strengths of about 10.1 V/m were measured with time domain methods; the exposure declined rapidly with increasing distance. In contrast the exposure at the here investigated outdoor user equipment was negligible. Under real operating conditions the exposure is smaller than given above due to operation mode dependent duty cycle and power control.

Concerning numerical exposure prediction of WiMAX stations, several commercially available tools were tested. The influence of antenna mounting, downtilt and frequency on the radiation pattern was accounted for with a synthetic radiation pattern. Also techniques to include topography and buildings in the simulation have been developed.

In LOS scenarios all programs predict the exposure accurately. In NLOS scenarios, however, simple free space models overestimate the measured exposure in part considerably; therefore the inclusion of buildings and walls into the simulation is urgent necessary.

A qualitative comparison of the exposure distribution of WLAN, WiMAX and UMTS terminal equipment under maximal operational conditions show a comparable behavior of WLAN and UMTS. In contrast, the exposure to WiMAX indoor terminal equipment is higher in it's direct vicinity due to higher transmit power and antenna gain. With increasing number of obstacles like walls, however, the exposure becomes lower compared to the other systems due to the frequency dependent higher transmission attenuation.

A comparison of the exposure normalized to 1 MBit/s at maximal uplink data rate shows higher field strengths of UMTS compared to both other technologies because of it's considerable smaller maximal data rate. The normalized exposure of WLAN and WiMAX shows a comparable behaviour: Whereas the normalized WiMAX exposure is slightly higher in comparison with WLAN in the direct vicinity of the terminal equipment, the situation changes with increased number of obstacles.

This statement, however, must not be regarded as generally admitted with regard to the individual exposure situation, because due to the variety of terminal equipment types (outdoor units, table equipment, close to body equipment) and possible practical scenarios simplifications were made in the comparisons. Therefore, in reality different exposure relations may occur depending on the situation.

Zusammenfassung

Ziel vorliegenden Forschungsvorhabens war es, Mess- und Berechnungsverfahren zu entwickeln bzw. bestehende Verfahren zu modifizieren und damit die Immissionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder in der Umgebung von WiMAX-Sendeanlagen und den dazugehörigen Geräten zu ermitteln bzw. die tatsächliche Exposition von Personen im Umfeld dieser Anlagen abzuschätzen.

Da ähnlich wie beim Mobilfunk zumindest teilweise eine flächendeckende Versorgung über Basisstationen vergleichbarer Abstrahlcharakteristik und Sendeleistung realisiert wird, ist es sinnvoll und notwendig, möglichst frühzeitig eine belastbare Datenbasis für die durch WiMAX verursachte Exposition der Bevölkerung zu schaffen. Dabei sind sowohl die Beiträge der Basisstationen, aber auch der Endgeräte von Interesse. Die Ergebnisse werden mit theoretisch und messtechnisch ermittelten Daten bezüglich der konkurrierenden Funkdienste (WLAN und UMTS) verglichen und auf Basis einschlägiger Normen und Richtlinien bewertet.

Bezüglich *Expositionsmessungen an Basisstationen* können zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte die Methoden spektrale Messung, Erfassung im Zeitbereich und Kanalleistungsmessung eingesetzt werden, wenn die relevanten 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. Labormessungen 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.

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

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

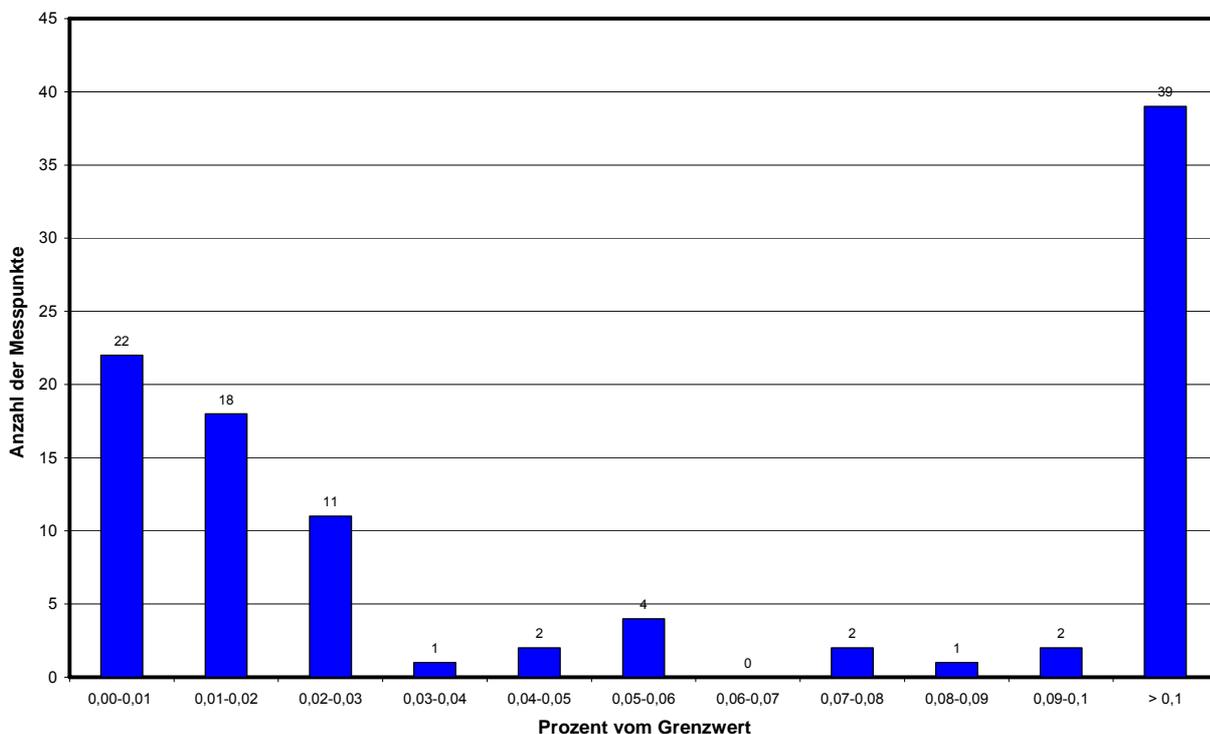


Bild 1: Verteilung der Messergebnisse; Feldstärke in Prozent des Grenzwertes der 26. BImSchV

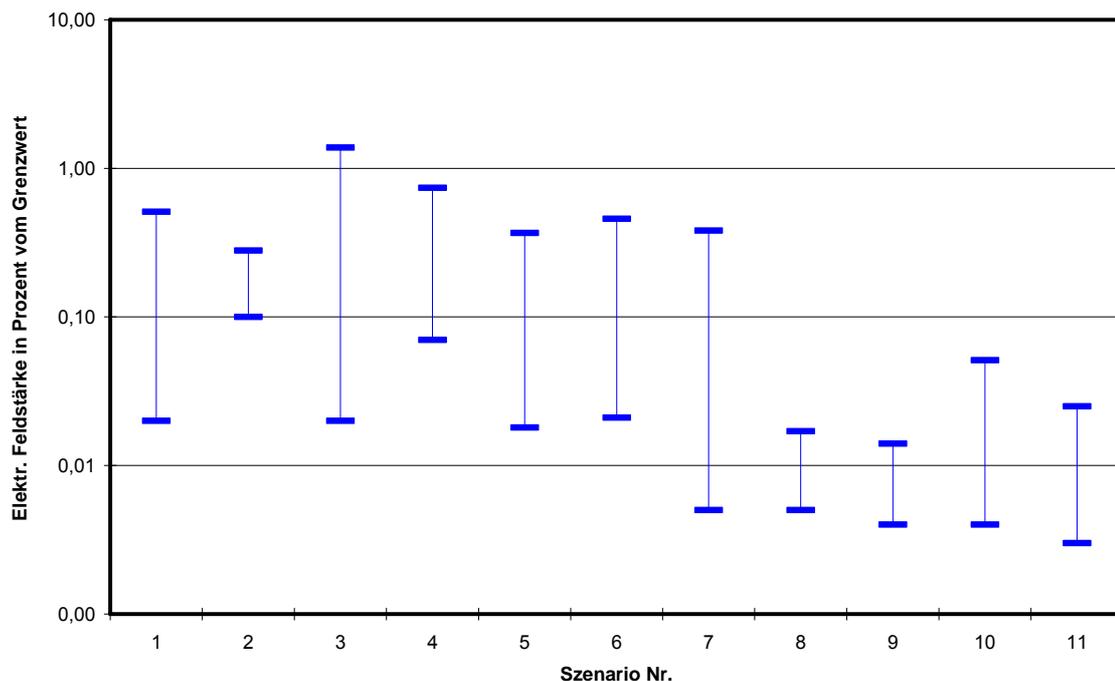


Bild 2: Spannwerte der an den elf untersuchten Szenarien gemessenen Expositionswerte (Elektrische Feldstärke in Prozent vom Grenzwert der 26. BImSchV)

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

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

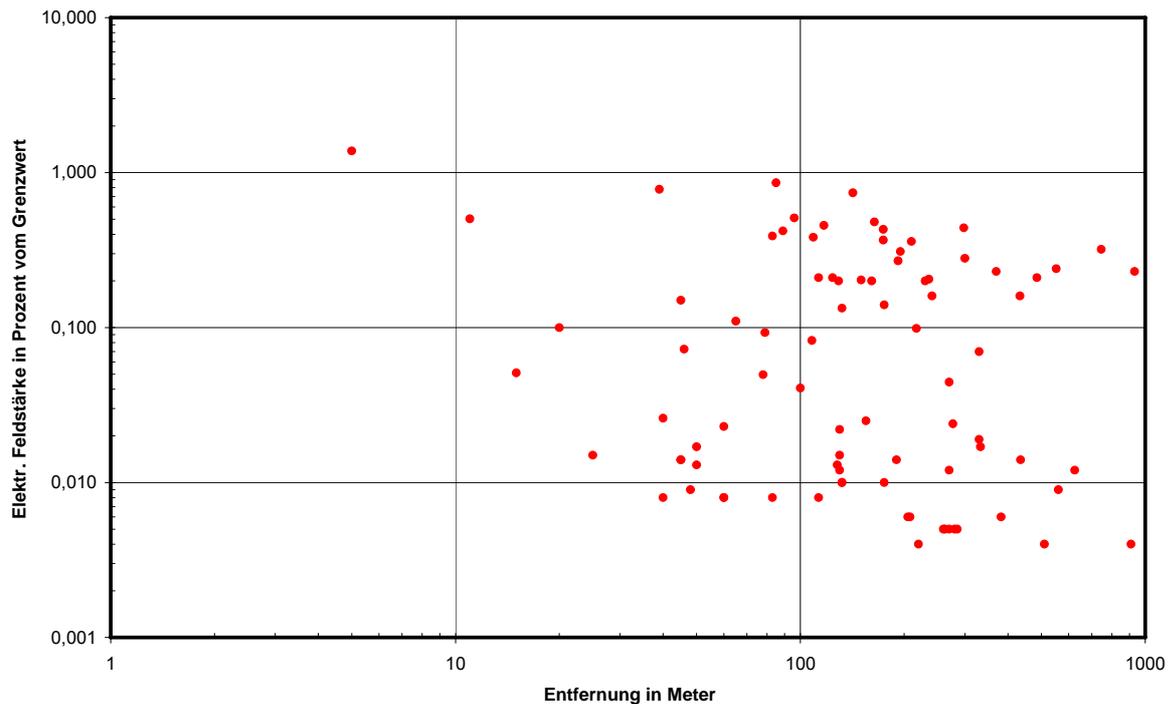


Bild 3: Immission in Abhängigkeit des lateralen Abstands für die 86 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur WiMAX-Antenne

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

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

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

Parallel zu den WiMAX-Immissionen wurden in vier der elf Szenarien auch die UMTS-Immissionen an den Messpunkten mit erfasst. Für die Messungen wurden speziell solche Standorte ausgewählt, bei denen neben einem WiMAX-System (lizenziertes Frequenzband) auch ein UMTS-System installiert bzw. in unmittelbarer Nähe vorhanden war. Über alle Messpunkte gesehen ergibt sich eine sehr deutliche Dominanz der UMTS-Immissionen im Vergleich zu WiMAX. Es dominieren an etwa 85 % der Messpunkte die durch UMTS-Systeme hervorgerufenen Immissionen. Im Mittel lagen die UMTS-Immissionen etwa 13 dB über den WiMAX-Werten. Ein Grund für die größere Immission durch UMTS-Systeme liegt in

der höheren installierten Sendeleistung. Aber auch andere Faktoren, wie die Antennencharakteristik oder die Orientierung der Messpunkte zur Hauptstrahlrichtung der Antenne, haben offensichtlich einen Einfluss.

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

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

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

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

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

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

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

Bezüglich der *Eingabeparameter* kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Kompensation der Abhängigkeit von Frequenz, Downtilt und Montageumgebung am besten mit einer *Synthese eines Antennendiagramms* erfolgt. Da das Simulationsgebiet nicht nur die direkte Senderumgebung, sondern eine gesamte Versorgungszelle umfasst, muss der *Geländeverlauf* auf jeden Fall in der Berechnung berücksichtigt werden. Außerdem wurden Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, auch die Vielzahl von *Gebäuden* in den betrachteten Softwarepaketen berücksichtigen zu können.

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

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

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

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

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

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

Summary

The aim of the research project was to develop measurement and calculation methods as well as to modify existing ones. These methods were applied to determine the RF electromagnetic fields around WiMAX stations and terminal equipment.

Because similar to the mobile phone network the coverage is realized by base stations with comparable radiation pattern and transmit power at least partially, it is regarded to be reasonable and necessary to generate an data base concerning general public exposure to the WiMAX technique at an early stage. Here, the exposure to WiMAX base stations as well as to terminal equipment are of interest. The results are compared with theoretically and practically determined data of competing radio services (WLAN and UMTS) and evaluated with regard to relevant exposure standards.

Concerning exposure measurements *at WiMAX stations to prove compliance with exposure limits*, spectral, time domain and channel power methods can be used, if the relevant spectrum analyzer settings are chosen correctly. The main advantage of spectral measurements is the simultaneous assessment of more than one signal, whereas the measurement in time domain allows for the most accurate analysis of the complicated time structure of the WiMAX signal, permitting the best possible extrapolation to maximal operational state of the station. The channel power method is advantageous for WiMAX signals having a band width significantly higher than the maximal RBW of the spectrum analyzer. For point raster measurements all three methods have no additional limitations. However, the use of the time domain measurement for determining the maximal field value with the “sweeping method” is limited, because by the “max hold” function of the analyzer the single frames overlap arbitrarily. So, the time structure of the signal cannot be resolved accurately, which makes an assessment of the downlink subframe power difficult. Therefore it is recommended to determine the signal structure of the WiMAX signal in time domain by a pre-measurement.

Space and time averaged exposures can be determined by discrete measurements at fixed points or by permanent measurements with slow movement of the antenna with afterwards averaging. In contrast to the compliance measurements, here isotropic field probes have to be used. Measurements under laboratory conditions show, that available, but only up to 3 GHz specified isotropic probes can be used at least for 3.5 GHz with limitations, but are not applicable for 5 GHz WiMAX.

For long term measurements a new methodology has been developed, which is based on an extremely long sweep time. This methodology can also be applied for assessment of space and time averaged exposures in connection with a spatial movement of the measurement antenna.

The RF electromagnetic fields around WiMAX stations were measured in 11 different scenarios. The scenarios contain high and low mounted installations in urban and rural environment at licensed (3.4-3.6 GHz) and unlicensed (5.15-5.775 GHz) frequency bands in FDD and TDD mode. The measurements were carried out at different distances, sight conditions, orientations and height differences to the antennas and allow therefore to a certain extent exposure predictions at similar scenarios.

As measurement method the spectral technique with “sweeping method” was used. Taking into account the time structure of the WiMAX signals (duty cycle), the measurement results were extrapolated, allowing an assessment of the exposure at maximal operational state of the station according to the demands of national exposure guidelines (26. BImSchV). The exposures assessed in such a way can be characterized as follows:

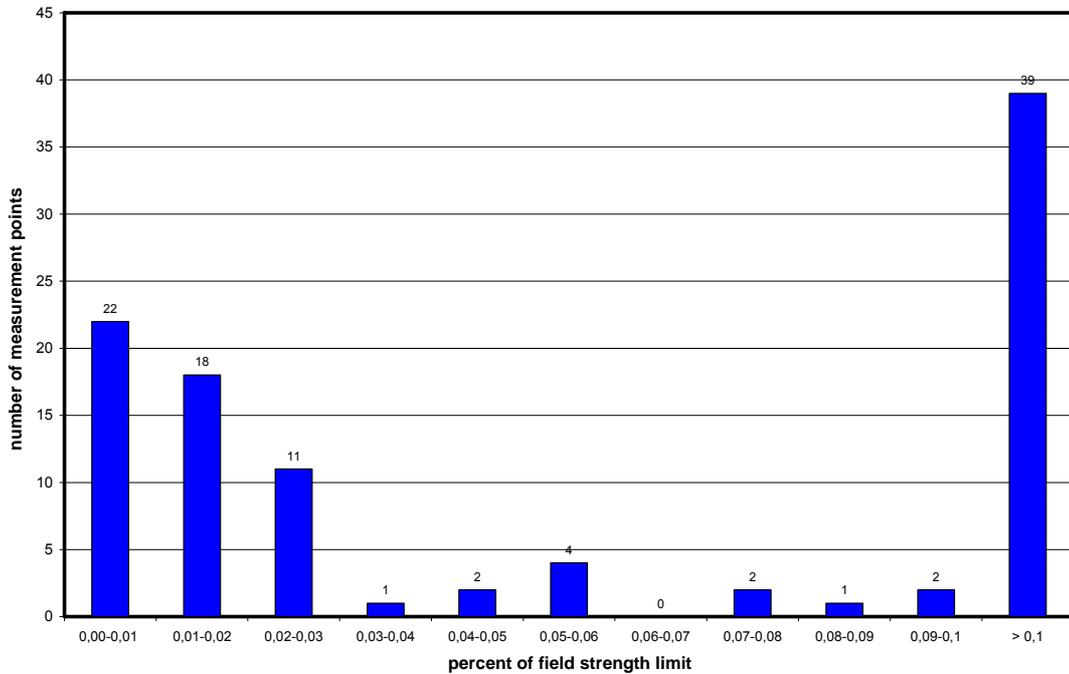


Fig. 1: Distribution of measurement results; electric field strength in percent of 26. BImSchV limit (equivalent to ICNIRP 98 reference level)

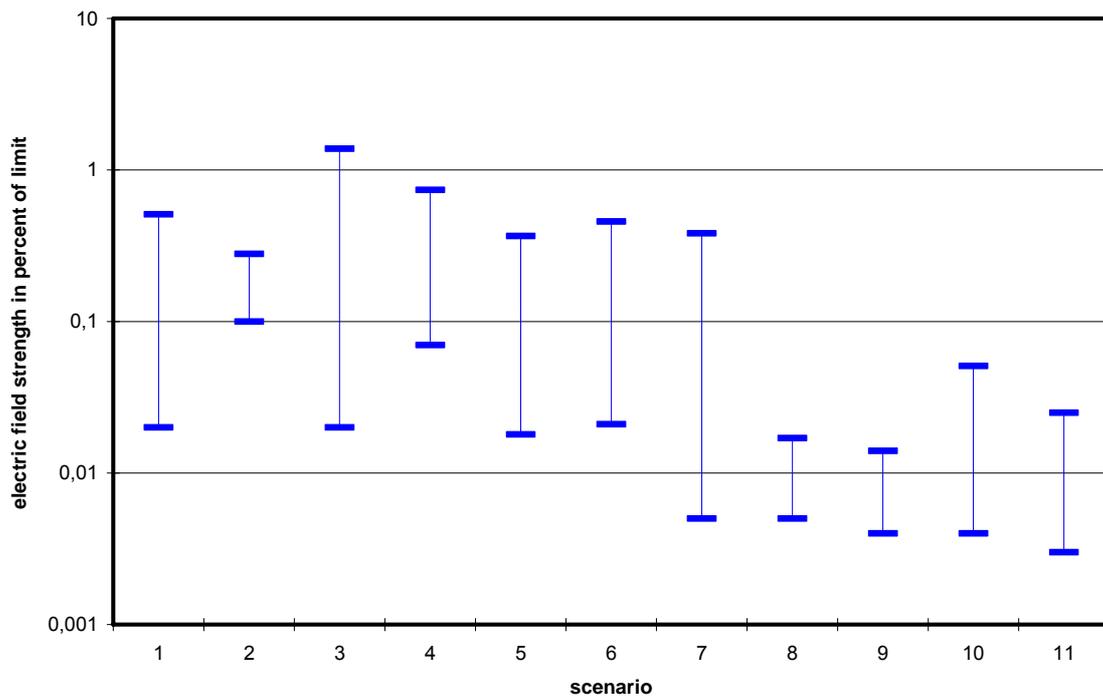


Fig. 2: Ranges of measured exposures at the 11 scenarios investigated (electric field strength in percent of 26. BImSchV limit, equivalent to ICNIRP 98 reference level)

In each scenario as well as between the scenarios different exposure have been found: The highest value was about 0.84 V/m electric field strength and 1.9 mW/m² power density (corresponding to 1.4 % of the field strength limit). The smallest value was about 0.002 V/m and 0.01 µW/m² (corresponding to 0.003 %). The majority of the measurement results was below 0.02 V/m and 1.1 µW/m² (corresponding to 0.03 %). The exposure range over all scenarios is very large with about 50 dB. Time and space averaged power densities are a factor of about 6 to 11 smaller than the exposures given above. It is, however, planned to increase the transmit power of some WiMAX stations especially in the dense urban areas in the future, to a level comparable to typical UMTS base stations. It is suggested to repeat exposure measurements exemplarily in these areas in a medium term.

Concerning factors which influence the exposure it has been found, that the distance in the direct vicinity of the station (up to several 100 meters, depending on antenna height and downtilt) is not suited as a measure for quantifying WiMAX exposures. The reason is, that in this distance range the exposure is strongly influenced by the side lobes and nulls of the vertical antenna diagram and therefore exhibits an irregular character.

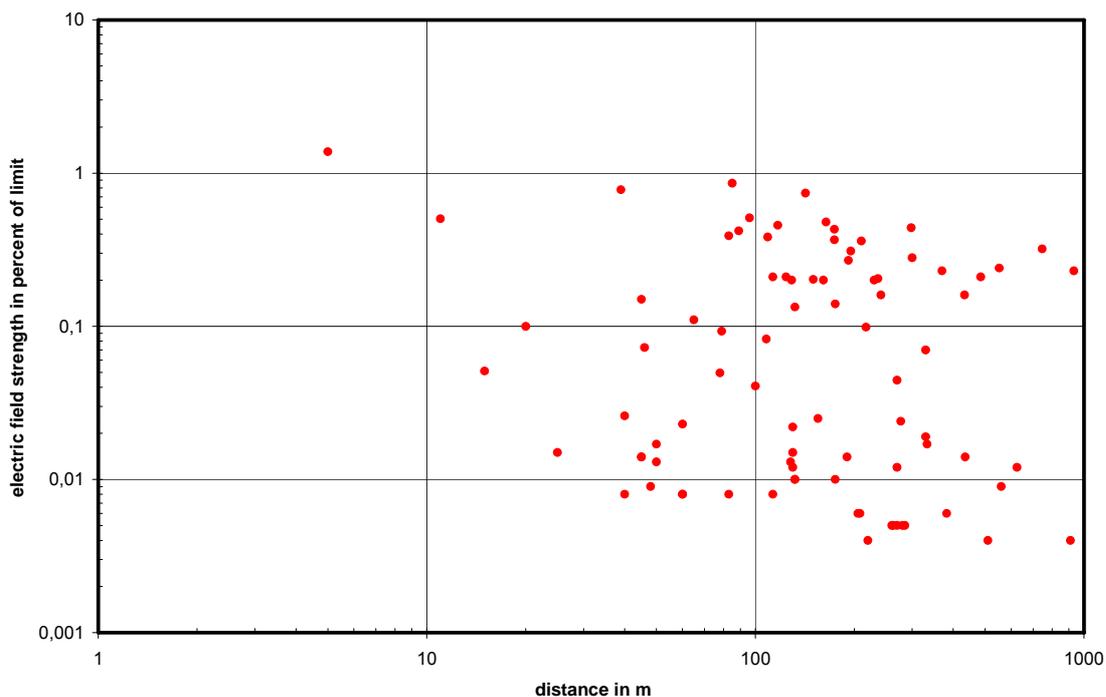


Fig. 3: Exposure against lateral distance for the 86 outdoor measurement points with line of sight condition to the antenna (electric field strength in percent of 26. BlmSchV limit, equivalent to ICNIRP 98 reference level)

Sight conditions, however, have a large influence on the exposure: Objects like buildings, but also trees and shrub between measurement point and WiMAX station have an attenuating influence, which can be found in the measurement results. The exposure reduction is dependent on the attenuation characteristics of the object, but also from the question, onto whether signals of the station may reach the measurement point also by reflections on nearby buildings or walls.

It was not possible to bring out the influence of the vertical angle very clearly in this project, because the number and distance classification of the points was too small. However at least a trend towards slightly higher exposure at points with small vertical angle can be shown.

The influence of the frequency band to the average exposure to a WiMAX station was found to be very clearly: License free stations (5.15-5.775 GHz) generate on average 25 dB lower exposures than stations in the licensed band (3.4-3.6 GHz), which is due to the different transmit power.

Parallel to the WiMAX exposure also the UMTS exposure was measured in 4 out of 11 scenarios. For the measurements especially those sites were chosen, where additionally to a WiMAX system (licensed frequency band) also a UMTS system was installed or was at least available in the near vicinity. Overall a clear dominance of the UMTS exposure in comparison to WiMAX exposure has been found: At 85 % of the measurement points the UMTS exposure was higher than the WiMAX exposure. On average the UMTS exposure was about 13 dB above the WiMAX values. One reason for that is the higher installed transmit power of UMTS stations. Obviously also other factors like antenna characteristic or the orientation of the measurement points to the antenna's main lobe have an influence.

Three long term measurements over at least 24 hours document the time behavior of the exposure. For all three investigated stations different characteristics were found. At the first station significant traffic variations can be seen, which are higher in the evening hours than during daytime. During night, however, the measured fields reach a minimum value, which is caused by the signaling of the station. At the second station no traffic variations could be measured, which is certainly due to the fact, that this station is not already used by a noteworthy number of customers. At a third station significant variations were present again, whereas a daily cycle could not clearly be detected. In a detailed measurement over two hours the effect of terminal equipment log in into the network on the exposure of the base station was documented.

Two dimensional scan measurements for characterization of the small scale spatial variations in the surrounding of a real WiMAX station showed against expectations no significant reduction of the "fast fading" amplitude in comparison to GSM base stations despite the larger spectral bandwidth of WiMAX signals. The variation amplitude at the scenario with "Non Line Of Sight" conditions was with typically 10 dB higher than at the "Line Of Sight" scenario (typically 4 dB). This has the consequence, that at WiMAX exposure measurements the maximum search in the measurement volume has to be performed as carefully as with GSM and UMTS exposure measurements.

Exposure measurements at terminal equipment can be divided into field strength measurements and SAR measurements. For field strength measurements (at distances to the terminal equipment of at least one wave length) in principle all measurement methods for base station exposure measurements (i.e. spectral, channel power and time domain measurement) as well as broad band methods are possible. Their application differs concerning the duplex mode used and is moreover at TDD dependent on the question, whether the exposure of the terminal equipment or of the base station is dominating. SAR measurements are applicable for near to body or body contact applications. Suitable phantoms and tissue simulating liquids are defined in appropriate standards. Probes with adequate sensitivity as

well as base station simulators for defined controlling of the terminal equipment are available from the manufacturer's side.

Measurements at terminal equipment were performed as field strength measurements under laboratory conditions as well as under real, everyday life conditions and as SAR measurements. Measurements under laboratory conditions were done at maximal, constant transmit power. It was found, that WiMAX indoor terminal equipment in typical user scenarios induces a significantly higher exposure at the user than the fixed WiMAX base stations. At the devices under investigation a maximal field strength of 10.1 V/m was measured (17 % of the field strength reference level) in 50 cm distance, which declined rapidly with distance and reached maximal 1.3 V/m (2 % of the reference level) in 5 m distance. In contrast the exposure at the here investigated outdoor user equipment was negligible, because the high directivity antenna is outdoor and not directed to the user. Under real operating conditions the exposure is smaller than under maximal conditions due to operation mode dependent duty cycle and power control. Whereas during standby operation even immediately at the device no noteworthy, time averaged exposure was found, during an upload up to 9 % of the exposure at maximal operation conditions was measured in a real scenario. Here it was also demonstrated, that the exposure to outdoor units is maximal in the range of one-tenth of a percent. SAR measurements at an indoor table unit under maximal operation conditions have shown a strong exposure dependence on the orientation of and distance from the device. Whereas at distances from the antenna in the centimeter range only percentages of the basic restrictions were found, an exceeding of the basic restrictions at permanent direct contact with the antenna is possible. A direct contact to the antenna, however, is certainly unrealistic under normal conditions.

Concerning *calculation methods* commercially available software packages were used in this study to investigate, if they are suited for the determination of the general public exposure in the vicinity of WiMAX base stations as well as terminal equipment. The term "vicinity" covers the whole cell size excluding the horizontal safety distance (ca. 1-2 m).

The calculated results were compared to corresponding measurements in a variety of configurations found in practice. In this context indoor and outdoor scenarios, different sight conditions and variable distances to the transmitter were considered.

Concerning *input parameters*, the exposure dependency on downtilt angle, frequency and influence of the installation vicinity is taken into account by a synthesized antenna radiation pattern. Due to the fact, that not only the direct vicinity of the WiMAX station has to be considered, but rather the whole coverage area, the terrain height has to be used in a calculation too. Furthermore methods have been developed to integrate a huge amount of buildings into the used software packages in a more or less automatically manner.

Overall it was shown, that in scenarios with Line Of Sight conditions to the WiMAX station all programs gave a good exposure forecast for the majority of the investigated areas by taking the measurement uncertainty into account. Nevertheless the following aspects have to be kept in mind in this context: If for example trees are in the line of sight which are neglected during the simulation, the programs overestimate the field strength compared to the meas-

urement. A comparison of the measurement results with the output of the calculation method “Free Space plus 3 dB” has shown, that even this simple method fits well in scenarios with Line Of Sight situations to the WiMAX station antenna.

In contrast to that the method “Free Space plus 3 dB” does not fit in situations Non Line Of Sight conditions with regard to the WiMAX station. In the considered configurations significant overestimations has been found partly. The consideration of buildings and wall in indoor scenarios is therefore mandatory necessary.

A qualitative comparison of the exposure distribution of WLAN, WiMAX and UMTS terminal equipment under maximal operational conditions in a house and bureau scenario show a comparable behavior of WLAN and UMTS. In contrast, the exposure to WiMAX indoor terminal equipment is higher in it's direct vicinity due to higher transmit power and antenna gain. With increasing number of obstacles like walls, however, the exposure becomes lower compared to the other systems due to the frequency dependent higher transmission attenuation.

A comparison of the exposure normalized to 1 MBit/s at maximal uplink data rate shows higher field strengths of UMTS compared to both other technologies because of it's considerable smaller maximal data rate. The normalized exposure of WLAN and WiMAX shows a comparable behaviour: Whereas the normalized WiMAX exposure is slightly higher in comparison with WLAN in the direct vicinity of the terminal equipment, the situation changes with increased number of obstacles.

Because of the variety of terminal equipment types (outdoor units, table equipment, close to body equipment) and possible practical scenarios this statement, however, must not be regarded as generally admitted with regard to the individual exposure situation due to the simplifications made in the comparison. Therefore, in reality different exposure relations may occur depending on the situation.

Einleitung

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, IEEE 802.16) wird als ein wichtiger kommender Standard für regionale Funknetze angesehen. Als „großer Bruder“ von Wireless LAN soll eine breitbandige Datenübertragung bis zu Distanzen von etwa 50 km und mit Übertragungsgeschwindigkeiten von maximal 70 MBit/s ermöglicht werden. In Labortests wurden bereits bis 108 MBit/s bei 28 MHz Bandbreite erreicht. Diese Parameter übertreffen aktuelle WLAN-Techniken. Grundgedanke ist der Ersatz von breitbandigen Kabelnetzen, wie etwa DSL, durch eine Funkübertragung. Insbesondere in ländlichen Gebieten, in denen aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen keine Versorgung mit kabelgebundenem DSL realisiert oder geplant ist, wird WiMAX als kostengünstige Alternative zur Überbrückung der so genannten „letzten Meile“ zum Kunden propagiert. Darüber hinaus ist WiMAX (u.a. wegen OPAL-Anschlüssen der Telekom) aber auch für die Versorgung von Großstädten interessant, wie erste Netze in Leipzig, Dresden, Berlin-Pankow oder Heidelberg zeigen.

Ende 2006 wurde in Deutschland seitens der Bundesnetzagentur (BNetzA) ein Versteigerungsverfahren zur Vergabe der Frequenzen im Bereich 3,4 GHz bis 3,6 GHz abgeschlossen. Dabei haben fünf Unternehmen deutschlandweite bzw. regionale Zuschläge für die zur Verfügung stehenden Frequenzpakete zum Aufbau von WiMAX-Netzen erhalten. Die Firmen sind derzeit in der Phase des Aufbaus der Netze entsprechend der in den Vergaberichtlinien definierten Versorgungsquoten.

Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Da ähnlich wie beim Mobilfunk zumindest teilweise eine flächendeckende Versorgung über Basisstationen vergleichbarer Abstrahlcharakteristik und Sendeleistung realisiert wird, ist es sinnvoll und notwendig, möglichst frühzeitig eine belastbare Datenbasis für die durch WiMAX verursachte Exposition der Bevölkerung zu schaffen bzw. geeignete Verfahren zur Erhebung der Exposition zu entwickeln. Dabei sind sowohl die Beiträge der Basisstationen, als auch der Endgeräte zu analysieren. Es interessieren gleichermaßen maximal mögliche wie auch durchschnittlich zu erwartende Immissionen in unterschiedlichen, praxisrelevanten Szenarien. Die Ergebnisse werden mit theoretisch und messtechnisch ermittelten Daten bezüglich der konkurrierenden Funkdienste (WLAN und UMTS) verglichen und auf Basis einschlägiger Normen und Richtlinien bewertet.

Gliederung des Berichtes

Vorliegender Abschlussbericht ist entsprechend der zeitlichen bzw. inhaltlichen Bearbeitung des Gesamtvorhabens in drei Berichtsteile gegliedert:

Im ersten Berichtsteil „Bestandsaufnahme zum Stand der Technik“ werden die im folgenden beschriebenen Punkte bearbeitet:

Da es innerhalb des Standards IEEE 802.16 „Wireless MAN“ eine Fülle von verabschiedeten und geplanten Standards, Vorstandards und Vorschlägen gibt, erfolgt zunächst eine Darstellung und Zusammenfassung des aktuellen Standes der Standardisierung von IEEE 802.16

mit allen derzeit bekannten und geplanten Varianten (z.B. a, d, e, bzw. fixed, mobile, pre-WiMAX-Lösungen usw.). Der Schwerpunkt der Literaturrecherche liegt auf der Zusammenfassung der für den Strahlenschutz relevanten Informationen unter Berücksichtigung von für die Exposition relevanten Parametern wie Sendefrequenzen, Sendeleistungen (Antenneneingangleistungen und EIRP), Betriebsarten, Modulationen, Kanalzugriffsverfahren, Reichweiten usw.

Daran anschließend wird der Ablauf und derzeitige Stand des Vergabeverfahrens für die WiMAX-Frequenzen 3400-3600 MHz der Bundesnetzagentur in Deutschland beschrieben.

Im zweiten Berichtsteil „Entwicklung geeigneter Verfahren“ werden Mess- und Berechnungsverfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert, die im Arbeitspaket 3 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 Verfahrens 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).

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

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

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

Weitere Messungen charakterisieren sowohl den zeitlichen Verlauf der Immission über einen Zeitraum von 24 Stunden, als auch die kleinskalige örtliche Schwankungsbreite in Innenräumen. Hierbei wird überprüft, ob die theoretisch zu erwartende Abschwächung des „Fast Fadings“ durch den Breitbandcharakter von WiMAX-Signalen bei einer Maximalwertsuche im Messvolumen zu einer Vereinfachung des Schwenkvorganges führt. Außerdem werden exemplarisch örtlich und zeitlich gemittelte Immissionen den örtlich maximierten und auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen gegenüber gestellt und Unterschiedsfaktoren ermittelt.

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

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

Teilbericht I

Bestandsaufnahme zum Stand der Technik

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 25 |
| 2 | Übertragungstechnik des WiMAX-Standards | 25 |
| 2.1 | Einleitung | 25 |
| 2.2 | Zielsetzung von WiMAX | 25 |
| 2.3 | WiMAX-Standardisierung | 27 |
| 2.3.1 | <i>IEEE 802.16</i> | 28 |
| 2.3.2 | <i>IEEE 802.16a</i> | 29 |
| 2.3.3 | <i>IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004)</i> | 32 |
| 2.3.4 | <i>IEEE 802.16e (IEEE 802.16e-2005)</i> | 32 |
| 2.4 | WiMAX-Anwendungen..... | 33 |
| 2.4.1 | <i>Backhaul-Anwendungen</i> | 33 |
| 2.4.2 | <i>Last Mile BWA</i> | 34 |
| 2.4.3 | <i>Mobiler BWA</i> | 35 |
| 2.5 | WiMAX-Signalparameter | 36 |
| 2.5.1 | <i>Frequenzbereiche</i> | 36 |
| 2.5.2 | <i>Wichtige Signalparameter</i> | 37 |
| 2.5.3 | <i>Zeitstruktur von WiMAX-Signalen</i> | 38 |
| 3 | Stand des Lizenzierungsverfahrens in Deutschland | 40 |
| | Literaturverzeichnis zu Teil I..... | 45 |
| | Abkürzungsverzeichnis zu Teil I..... | 47 |

1 Einleitung

Im ersten Berichtsteil des Untersuchungsvorhabens werden im Sinne einer *Bestandsaufnahme* die im folgenden beschriebenen Punkte bearbeitet.

Da es innerhalb des Standards IEEE 802.16 „Wireless MAN“ eine Fülle von verabschiedeten und geplanten Standards, Vorstandards und Vorschlägen gibt, erfolgt zunächst eine Darstellung und Zusammenfassung des aktuellen Standes der Standardisierung von IEEE 802.16 mit allen derzeit bekannten und geplanten Varianten (z.B. a, d, e, bzw. fixed, mobile, pre-WiMAX-Lösungen usw.). Der Schwerpunkt der Literaturrecherche liegt auf der Zusammenfassung der für den Strahlenschutz relevanten Informationen unter Berücksichtigung von für die Exposition relevanten Parametern wie Sendefrequenzen, Sendeleistungen (Antenneneingangleistungen und EIRP), Betriebsarten, Modulationen, Kanalzugriffsverfahren, Reichweiten usw.

Daran anschließend wird der Ablauf und derzeitige Stand des Vergabeverfahrens für die WiMAX-Frequenzen 3400-3600 MHz der Bundesnetzagentur in Deutschland beschrieben.

2 Übertragungstechnik des WiMAX-Standards

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel soll kurz in den WiMAX-Standard IEEE 802.16 eingeführt und die historische Entwicklung der Standardisierung dargestellt werden. Außerdem werden mögliche Anwendungsbereiche von WiMAX vorgestellt. Weiterhin erfolgt eine erste Auflistung wichtiger Parameter von WiMAX-Signalen, insbesondere der Parameter, die vermutlich für die korrekte Immissionserfassung bzw. -bewertung von Bedeutung sind. Im Rahmen dieses Abschnittes ist nicht beabsichtigt, eingehend und detailliert auf die Struktur von WiMAX-Protokollen einzugehen, da dies für die Immissionsmesstechnik nur von untergeordneter Bedeutung ist. Eine sehr ausführliche und aktuelle deutsche Darstellung der WiMAX-Technologie findet sich beispielsweise in [MAU 07], in englischer Sprache existieren ebenfalls Einführungen in WiMAX, beispielsweise [HAR 06].

2.2 Zielsetzung von WiMAX

Die Sicherstellung eines breitbandigen Kommunikationszugangs für den einzelnen Bürger gewinnt in der modernen Kommunikationsgesellschaft mehr und mehr an Bedeutung. Dieser breitbandige „Last Mile Access“, also die Anbindung des Kundenstandortes an die nächste Vermittlungsstelle des Netzbetreibers, wird in Deutschland und auch in den meisten anderen Industrieländern derzeit meist leitungsgeführt mittels DSL-Technologien realisiert. An dieser Stelle macht sich vielfach noch heute die Monopolstellung der ehemaligen (bzw. immer noch) staatlichen Fernmeldegesellschaften bemerkbar: Die Nutzung eines Breitbandzugangs wird oft an andere Dienste, wie Telefon oder TV (bei Nutzung der von Kabel-TV-Firmen angebotenen Breitbanddienste) gebunden, was die Kosten für den Zugang erhöht. Zusätzlich bleiben Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte aufgrund der geringen Wirtschaftlichkeit vermutlich noch viele Jahre von der leitungsgeführten Breitbandversorgung ausgeschlossen, da sich die Investition in die kabelgebundene DSL-Technologie für den

Betreiber dort derzeit nicht als wirtschaftlich darstellt. Diese Situation trifft natürlich insbesondere auch für alle dünn besiedelten, wirtschaftlich wenig entwickelten Regionen zu.

Aus diesen Gründen wurde bereits in den 90er Jahren die Einführung drahtloser Techniken für den „Last Mile Access“ diskutiert. Aufgrund der sehr komplexen Eigenschaften des Funkkanals galt es allerdings lange Jahre als unmöglich, mittels Funktechnik hohe Datenraten zuverlässig und flächendeckend zur Verfügung stellen zu können. Insbesondere ein mobiler Breitbandzugang galt als nicht realisierbar.

Aufgrund bahnbrechender Fortschritte bei den Hochfrequenz-, Modulations- und Codiertechnologien, der digitalen Signalverarbeitung und der dazu notwendigen Leistungsfähigkeit von Prozessoren ist man heute in der Lage, über Drahtlosnetze qualitativ hochwertig und breitbandig Daten zu übertragen. Bereits vor der Jahrtausendwende wurden erste Drahtlosnetze für den „Last Mile Access“ entwickelt und installiert (WLL-Netze), denen jedoch der kommerzielle Erfolg noch weitgehend verwehrt blieb. Einer der Hauptgründe für das Scheitern dieser Netze lag in der fehlenden internationalen Standardisierung.

Zur Schaffung eines global standardisierten Drahtlossystems für den breitbandigen „Last Mile Access“ schloss sich im Sommer 1999 die IEEE-Arbeitsgruppe 802.16 zusammen. Die wesentlichen ursprünglich zugrunde gelegten Ziele der Standardisierung lassen sich wie folgt zusammenfassen [MAU 07]:

- Globaler Standard für die Luftschnittstelle eines drahtlosen, breitbandigen „Metropolitan Area Network (MAN)“.
- Übernahme der allgemeinen Prinzipien und Vorgehensweisen, die für den durchdringenden Erfolg des IEEE-802.11-Standards im „Local Area Network (LAN)“-Bereich verantwortlich sind.
- Reichweite im Bereich mehrerer Kilometer.
- Kapazität und Durchsatz sollen mindestens so hoch sein, wie mit drahtgebundenen Last-Mile-Access-Technologien.
- Einfache und schnelle Netzwerkinstallation (z.B. auch für temporäre Netze).
- Einfache Erweiterbarkeit des Netzes im Fall steigender Nachfrage.
- Breites Angebot an Diensten für Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Anwendungen.
- Realisierung verschiedenster Netzwerk-Topologien (z.B. Point-to-Point, Point-to-Multipoint).
- Flexibilität bezüglich der benutzbaren Trägerfrequenzen und der Kanalbandbreite.
- Der IEEE-802.16-Standard umfasst nur die Schichten (Layer) 1 und 2 des OSI-Modells (Physical und Data Link Layer) und soll von einer breiten Palette höherer Protokolle (z.B. Ethernet, ATM) benutzt werden können.
- Flexible und dynamische Anpassung von Codierung und Modulation an die aktuellen Ausbreitungsbedingungen im Funkkanal.

- Unterstützung leistungsstarker Multi-Antennen-Techniken (z.B. Beamforming, MIMO) für optimale HF-Übertragung.
- Flexible, bedarfsabhängige Aufteilung der Übertragungskapazität in Up- und Downlink.

Die aus diesen Zielvorgaben entstandenen Standards lassen den Herstellern ungemein viele Freiheiten bei der technischen Realisierung der Komponenten, was allerdings die große Gefahr in sich birgt, dass einzelne Produkte oder Komponenten verschiedener Hersteller zwar dem Standard entsprechen, jedoch nicht mehr kompatibel zu einander sind, was negative Auswirkungen auf die Durchsetzung am Markt haben kann. Die Gegensätzlichkeit zwischen Flexibilität und Kompatibilität soll durch die Definition von „Profilen“ gelöst werden. Ein Profil definiert eindeutig eine konkrete Systemkonfiguration innerhalb der weiten Grenzen des Standards, und stellt damit eine Art Untermenge bzw. Einschränkung des Standards dar. Alle Produkte, die ein bestimmtes Profil implementieren, müssen zu einander kompatibel sein. Für 802.16 obliegt die Definition von Profilen dem „WiMAX-Forum“, ein Zusammenschluss von über 400 Mitgliedsfirmen aus dem IT- und Telekommunikationssektor. Das WiMAX-Forum schreibt für Produkte, die nach einem konkreten Profil arbeiten, einen bestimmten Zertifizierungsprozess vor der Markteinführung vor, durch den die Kompatibilität und Standardkonformität nachgewiesen werden soll.

Im Dezember 2001 wurde die erste Version des IEEE 802.16 verabschiedet. Seit 2004 sind entsprechende Netzwerkkomponenten verfügbar, auch erste Pilotnetze sind in Betrieb. Netze, die aus nicht zertifizierten Komponenten aufgebaut sind, werden meist als „pre-WiMAX-Netze“ bezeichnet.

2.3 WiMAX-Standardisierung

Der ursprünglich anvisierte breitbandige Internetanschluss stellt heute nur einen Anwendungsfall der WiMAX-Technologie dar. Genauso sind klassische Richtfunkanwendungen wie auch zellulare Netze für mobile Endgeräte realisierbar, die durch verschiedene Standardversionen definiert werden. Der Standard 802.16 gehört zur Familie der 802-Standards, wie beispielsweise auch das Ethernet (802.3), der Token Ring (802.5) und das WLAN (802.11). Die wichtigsten Schritte der historischen Entwicklung der wesentlichen Mitglieder der 802.16-Standardfamilie sind in folgender Grafik dargestellt [MAU07], [RUS 06]:

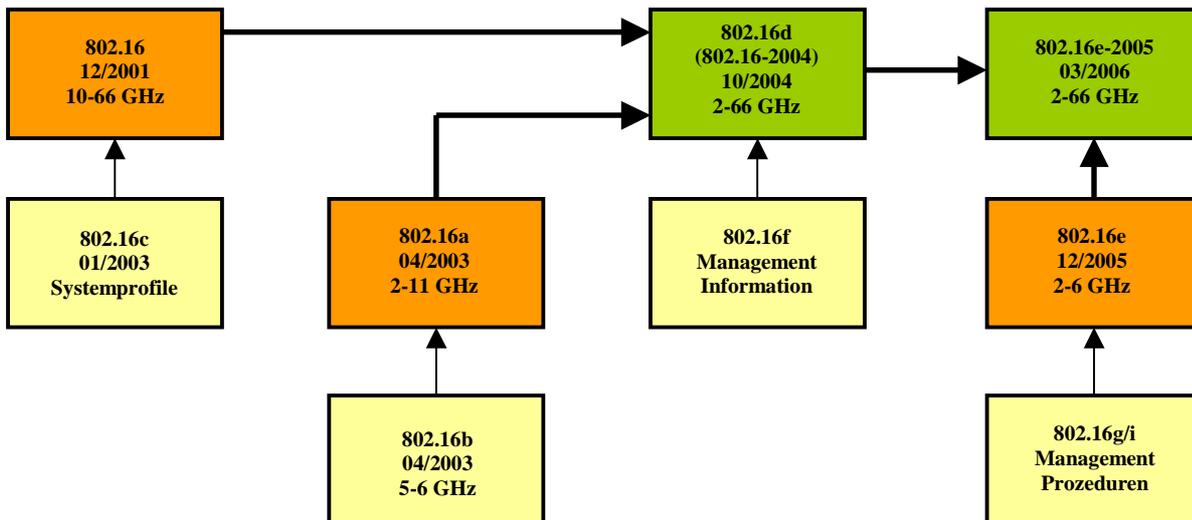


Bild 2.1 Entwicklung der 802.16-Standardisierung

2.3.1 IEEE 802.16

Die erste Version des Standards vom Dezember 2001 definierte die Übertragung auf der Luftschnittstelle vornehmlich für Outdoor-Verbindungen mit direkter Sichtverbindung (LOS = Line of Sight) zwischen ortsfesten Empfängern und Sendern. Die Kommunikation erfolgt zwischen Basisstationen (BS), die gegebenenfalls mit einem Netzwerk des Betreibers verbunden sind, und den Subscriber-Stationen (SS) mit fester Außenantenne, an die das lokale Netz des Kunden angeschlossen werden kann. Dieser Standard wurde weniger für den „Last Mile Access“ entwickelt, sondern vielmehr für typische Point-to-Point-(PTP)-Richtfunkanwendungen.

Die möglichen Trägerfrequenzen für die Verbindungen können in einem sehr weiten Frequenzbereich zwischen 10 und 66 GHz liegen. Als mögliche Übertragungsbandbreiten sind 20, 25 und 28 MHz vorgesehen, die übertragbare Datenrate liegt zwischen 32 und 134 Mbit/s. Diese Datenrate muss allerdings auf alle angeschlossenen SS in geeigneter Weise aufgeteilt werden („gemeinsame Datenrate“). Als maximale Reichweite werden bei günstigen Bedingungen Entfernungen von bis zu 100 km angegeben.

Zur Informationsübertragung wird eine Einträger- (Single Carrier-) Modulation verwendet („Wireless MAN-SC“), bei der je nach herrschender Verbindungsqualität zur SS unterschiedlich robuste Codier- und Modulationsverfahren verwendet werden (4-PSK, 16-QAM, 64-QAM). Dies bedeutet, dass für Subscriber-Stationen, die sich relativ nahe an der Basisstation befinden, ein vergleichsweise unrobustes Signalprofil verwendet werden kann, das dafür eine hohe Nutzdatenrate ermöglicht (z.B. 64-QAM + wenig Fehlerschutz). Bei Nutzern, die weit von der BS entfernt sind, wird hingegen ein robustes Profil mit entsprechend niedrigerer Nutzdatenrate verwendet (z.B. 4-PSK + viel Fehlerschutz).

Die Trennung von Up- und Downlink kann sowohl durch Zeitduplex (Time Division Duplex, TDD) oder Frequenzduplex (Frequency Division Duplex, FDD) realisiert werden. TDD bedeutet, dass die beiden Übertragungsrichtungen die selbe Trägerfrequenz nutzen, wobei Up- und Downlink durch ein festgelegtes Zeitschema getrennt werden, während bei FDD

Basisstation und Subscriber-Station gleichzeitig senden und empfangen können, da Up- und Downlink auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen abgewickelt werden.

Zur Konkretisierung von Systemprofilen für den 802.16-Betrieb dient der Standard 802.16c vom Januar 2003. Hier sind beispielsweise konkrete Trägerfrequenzen oder Kanalabstände definiert.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass mit dem Standard 802.16 hochratige Datenübertragungssysteme definiert wurden, die allerdings Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantennen sowie eine aufwändige, präzise Antennenmontage und -ausrichtung voraussetzen. Eine Übertragung bei nicht vorhandener Sichtverbindung bzw. die Anbindung beweglicher Teilnehmer ist nicht möglich.

2.3.2 IEEE 802.16a

Der Übergang zu Systemen, die auch Teilnehmer ohne direkte Sichtverbindung (No Line Of Sight, NLOS) versorgen können, ergab sich mit dem Standard 802.16a, der im April 2003 veröffentlicht wurde. Er beschreibt Übertragungsverfahren bei Frequenzen zwischen 2 und 11 GHz und damit einen Frequenzbereich, bei denen NLOS-Verbindungen noch sinnvoll realisierbar sind, da hier Dämpfungen und Abschattungen noch nicht so stark ausgeprägt sind wie im Zentimeterwellenbereich. Der Standard 802.16a richtet sich vornehmlich an die Übertragung bei Point-to-Multipoint-(PMP)-Systemen.

Die Trennung von Up- und Downlink kann sowohl durch Zeitduplex (Time Division Duplex, TDD) oder Frequenzduplex (Frequency Division Duplex, FDD) realisiert werden. Jedoch sollte, falls das System in einem lizenzfreien Band betrieben wird, immer TDD benutzt werden.

Mögliche Übertragungsbandbreiten liegen im Bereich zwischen 1,75 und 20 MHz, bei einer maximal erreichbaren gemeinsamen Datenrate von etwa 75 Mbit/s. Als maximal erzielbare Reichweite wird im NLOS-Betrieb eine Entfernung von etwa 5 km angegeben.

Zusätzlich zu den bereits von 802.16 bekannten Modulationsverfahren werden nun bei der Einträgermodulation auch 2-PSK, gespreizte 2-PSK (Spreizfaktor zwischen 2 und 16) sowie 256-QAM definiert.

Neben dieser, dem WirelessMAN-SC-Verfahren ähnlichen Einträgermodulation („Wireless-MAN-SCa“), führt der Standard auch Mehrträger- (OFDM-) Modulationsverfahren mit 256 Unterträgern ein, die sich deutlich robuster bei Mehrwegeausbreitungsszenarien verhalten, als eine Einträgermodulation (WirelessMAN-OFDM). Moduliert werden die Einzelträger mit 2-PSK, 4-PSK, 16-QAM oder 64-QAM. Der große Vorteil der Mehrträger- bezüglich einer Einträgermodulation besteht darin, dass der hochratige Datenfluss auf eine große Anzahl von n Einzelträgern aufgeteilt wird, so dass sich die Datenrate für jeden Einzelträger um den Faktor n verringert, bzw. die Symboldauer um den Faktor n vergrößert. Bei Mehrwegeausbreitungsszenarien sind die dort üblicherweise auftretenden Laufzeitdifferenzen dann nicht mehr in der Lage, Verzögerungen von einer Symboldauer oder mehr zu erzeugen, so dass Intersymbolinterferenzen sowie die daraus resultierenden Störungen im Empfänger minimiert werden. OFDM wird heute bei vielen modernen Übertragungsverfahren angewendet, bei-

spielsweise bei WLAN (802.11g/h), aber auch bei Rundfunkdiensten, wie DAB oder DVB-T. In [BOR 06] ist beispielsweise die OFDM-Übertragung für DVB-T näher erläutert.

Die OFDM-Übertragung bietet noch einen weiteren Vorteil: Soll mehr als eine SS mit Daten versorgt werden, so ist dies im Downlink nur im TDMA-Verfahren möglich (d.h. die einzelnen Teilnehmer werden, wie in Bild 2.2 dargestellt, nacheinander jeweils mit der vollen Bandbreite aller Subträger mit Daten versorgt).

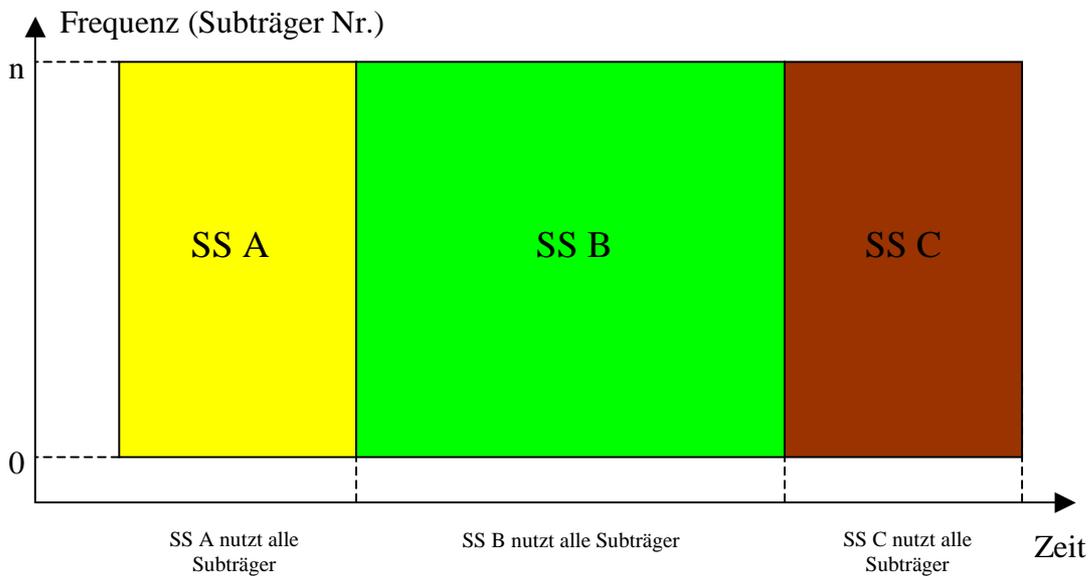


Bild 2.2 OFDM-Übertragung ohne Subkanalbildung (Downlink)

Im Uplink hingegen besteht zusätzlich die Möglichkeit der Subkanalbildung („Subchannelization“) durch Zusammenfassung benachbarter Subträger. Dies bedeutet, dass je nach Situation nicht alle OFDM-Träger einer Subscriber Station zugeordnet werden, sondern mehrere Stationen gleichzeitig je einem Teil aller Subträger nutzen (siehe Bild 2.3). Der Standard sieht hier eine Aufteilung aller OFDM-Träger auf bis zu 16 Subkanäle vor, wobei einer Subscriber Station 1, 2, 4, 8 oder alle 16 Subkanäle zugeordnet werden können.

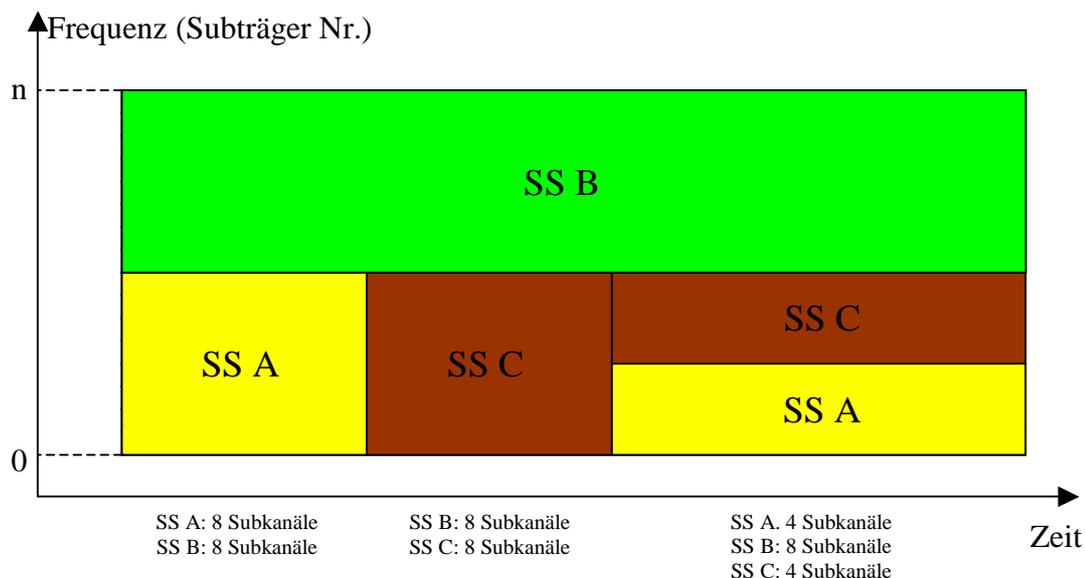


Bild 2.3 OFDM-Übertragung mit 16 Subkanälen (optional im Uplink)

Der Vorteil der Subkanalbildung liegt darin begründet, dass die Signalerzeugung der einzelnen Subscriber-Stationen bandbreitenoptimiert durchgeführt wird, d.h. das Empfangssignal der Basisstation besitzt nur die für die Übertragung der gewünschten Datenrate notwendige Bandbreite. Eine Verringerung der Subkanäle um den Faktor 2 ergibt beispielsweise einen um 3 dB besseren Störabstand im Empfangssignal der BS, da die thermische Rauschleistung bandbreitenproportional um 3 dB abgenommen hat. Dies bedeutet eine entsprechend günstigere Bitfehlerrate, bzw. eine Zunahme der Systemreichweite im Uplink.

Eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit der OFDM-Übertragung bietet der Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Dieser ist ebenfalls in 802.16a als „WirelessMAN-OFDMA“ standardisiert. Hierbei wird die Aufteilung der einzelnen Träger auf Subkanäle sowohl für den Up- als auch den Downlink zwingend vorgeschrieben. Die zur Verfügung stehenden Subträger werden sowohl zeitlich als auch zahlenmäßig dynamisch den einzelnen Teilnehmern zugeordnet, wobei die Subträger eines Teilnehmers nicht mehr zwingend benachbart sein müssen. Aufgrund der Tatsache, dass in (mobilen) Funkkanälen die Eigenschaften der Funkstrecke sehr stark orts-, zeit- und frequenzabhängig variieren, können mit WirelessMAN-OFDMA die Subträger adaptiv vergeben werden, so dass die Teilnehmer immer möglichst mit den Frequenzbändern bedient werden, auf denen aktuell gute Ausbreitungsbedingungen herrschen, bzw. bei schlechten Verhältnissen einem Teilnehmer mehr Bandbreite (d.h. höhere Trägeranzahl) zur Verfügung gestellt wird, auf der die Übertragung dann mit geringerer Nettodatenrate pro Träger (also mit erhöhtem Fehlerschutz) stattfindet, so dass schließlich die gleiche Übertragungsqualität sichergestellt ist. Letztlich kann mit OFDMA der Gesamtdatendurchsatz pro Funkzelle nochmals optimiert werden. IEEE 802.16a definiert ein OFDMA-Verfahren mit 2048 Subträgern.

Auch Multi-Antennentechniken, wie „Space-Time-Coding“ (STC) und adaptive Antennensysteme (AAS) werden zur Verbesserung der Übertragungsqualität optional spezifiziert. Neue, robustere Codierverfahren (z.B. trelliscodierte Modulation, TCM) werden ebenfalls verwendet.

Systeme gemäß 802.16a können sowohl in lizenzierten als auch in lizenzfreien Bändern eingesetzt werden. Allerdings benötigt der Betrieb in lizenzfreien Bändern (5 - 6 GHz) noch einige zusätzliche Mechanismen, um die Interferenzgefahr mit anderen Systemen zu verringern. Diese Verfahren zur Sicherstellung der Koexistenz mit anderen Systemen wurden in der Standarderweiterung 802.16b definiert. Zu diesen spezifizierten Mechanismen gehören beispielsweise eine erweiterte Leistungsmessung und -kontrolle, sowie die „Dynamic Frequency selection“ (DFS), mit deren Hilfe erkannt werden soll, wenn in einem Kanal bereits andere Systeme arbeiten und daraufhin automatisch noch möglichst ungenutzte Kanäle ausgesucht werden. Im Standard wird dann von „WirelessHUMAN“ (Wireless High Speed Unlicensed Metropolitan Area Network) gesprochen. Die 802.16b-Aktivitäten flossen in den 802.16a-Standard ein und wurden zusammen mit diesem veröffentlicht.

2.3.3 IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004)

Alle bis dahin vorhandenen Standardversionen wurden zusammengefasst, überarbeitet und sind unter dem Namen „802.16-2004-Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access“ veröffentlicht [IEEE 04]. Dieser etwa 900 Seiten umfassende Standard stellt die Basis für alle ortsfesten WiMAX-Anwendungen (sowohl im Richtfunk- als auch im PMP-Bereich) dar. Ortsfest schließt allerdings den „nomadischen“ bzw. den „portablen“ Zugriff nicht aus: Beim „nomadischen Zugriff“ kann die Subscriber Station bewegt werden, allerdings nicht während einer bestehenden Verbindung. „Portabler Zugriff“ hingegen bedeutet, dass die Subscriber Station während der bestehenden Verbindung mit geringer Geschwindigkeit bewegt werden darf. Bei einem eventuellen Wechsel der zuständigen Basisstation bleibt die Session erhalten, jedoch wird während des Zellwechsels die Verbindungsqualität stark eingeschränkt.

Die Interoperabilität zwischen 802.16-2004-Produkten verschiedener Hersteller im Netzwerk wird durch die Standarderweiterung 802.16f gewährleistet.

2.3.4 IEEE 802.16e (IEEE 802.16e-2005)

Mobile WiMAX-Anwendungen werden mit dem Standard 802.16e möglich. Diese umfassende Erweiterung des 802.16-2004-Standards ermöglicht eine mobile Kommunikation mit Subscriber Stationen bis zu einer Geschwindigkeit von 125 km/h. Dafür ist nötig, Mechanismen zur Mobilitätsunterstützung, die aus anderen zellularen Netzen (z.B. GSM oder UMTS) bekannt sind, im Standard zu integrieren. Dazu gehören beispielsweise Handover-Algorithmen und dynamische Leistungsregelung für die Subscriber Station, sowie Mechanismen zur Energieeinsparung („Sleep Mode“, „Idle Mode“), um die Akkulaufzeit mobiler Endgeräte zu erhöhen.

Auch das OFDMA-Verfahren muss an die besonders große Zeitvarianz von mobilen Verbindungen angepasst werden. Man arbeitet hier mit einem skalierbarem OFDMA (S-OFDMA), bei dem die Zahl der Träger nicht mehr konstant ist, sondern an die gewählte Signalbandbreite angepasst wird. Es ergeben sich dann Subträgeranzahlen von 128, 256, 512, 1024 oder 2048. Damit erreicht man, dass trotz variabler Signalbandbreite immer ein konstanter

Subträgerabstand von etwa 10 kHz vorhanden ist, der sich in umfangreichen Untersuchungen als optimal bei mobiler Übertragung erwiesen hat.

Als Modulationsverfahren für die Subträger ist in 802.16e 4-PSK, 16-QAM oder 64-QAM vorgesehen.

Mögliche Trägerfrequenzen liegen wieder im Bereich zwischen 2 und 6 GHz. Abhängig von der flexibel wählbaren Signalbandbreite (zwischen 1,75 und 20 MHz) und angepasst an die aktuell herrschenden Ausbreitungsbedingungen des Funkkanals sind Datenraten in der Größenordnung von über 10 Mbit/s denkbar. Die Trennung von Up- und Downlink kann sowohl durch Zeitduplex (Time Division Duplex, TDD) oder Frequenzduplex (Frequency Division Duplex, FDD) realisiert werden.

Die Standarderweiterung 802.16e wurde im Dezember 2005 fertig gestellt und zusammen mit einigen Korrekturen des Fixed-Standards 802.16-2004 als 802.16e-2005 im März 2006 veröffentlicht [IEEE 06].

Die Vielzahl neuer Management- und Kontrollprozeduren, die sich bei Mobile WiMAX über die Grenzen einzelner Basisstationen hinweg erstrecken, werden in den Standarderweiterungen 802.16g und 802.16i näher spezifiziert.

2.4 WiMAX-Anwendungen

Je nach Bevölkerungsdichte, -verteilung und -struktur bietet IEEE 802.16 interessante Einsatzmöglichkeiten, teilweise als Konkurrenz zu bereits vorhandenen Technologien (z.B. in Städten und Ballungszentren), als auch als einzige wirtschaftliche Alternative z.B. bei der Realisierung eines Breitbandzugangs in dünn besiedelten ländlichen Regionen. Die wichtigsten Anwendungsszenarien von IEEE 802.16 werden im folgenden dargestellt.

2.4.1 Backhaul-Anwendungen

In seiner ersten Version standardisierte IEEE 802.16 insbesondere klassische Richtfunkanwendungen mit direkter Sichtverbindung zwischen genau einer Basisstation und einer Subscriber Station, wobei hier besonders hohe Datenraten und große Reichweiten erzielbar sind. Derartige Verbindungen zwischen dem Access-Netzwerk und der dazugehörigen Backbone-Infrastruktur werden „Backhaul-Verbindungen“ genannt. Anwendung finden diese Richtfunkverbindungen (in Deutschland meist im Frequenzbereich zwischen 23 und 38 GHz) beispielsweise bei der Anbindung von klassischen GSM- oder UMTS-Basisstationen, WLAN-Hotspots oder natürlich auch WiMAX-Basisstationen. Zusätzlich sind auch breitbandige Richtfunkverbindungen für Einzelkunden z.B. im Rahmen einer Vernetzung von einzelnen Firmenstandorten denkbar.

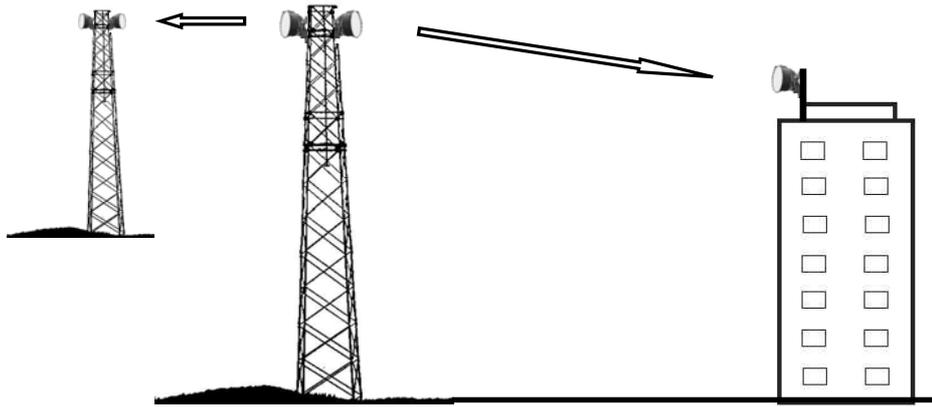


Bild 2.4 IEEE 802-16 für Punkt-zu-Punkt-Richtfunkanwendungen

2.4.2 Last Mile BWA

Im Unterschied zu IEEE 802.11 handelt es sich bei IEEE 802.16 um einen Standard, der von Beginn an darauf ausgelegt wurde, einen Breitbandzugang für typische Last-Mile-Anwendungen bieten zu können. Dies bedingt einerseits eine entsprechende Performance in Bezug auf Datendurchsatz und Reichweite, andererseits auch ein Angebot an unterschiedlichen Diensten mit garantierter Dienstgüte. 802.16 unterstützt heute Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen sowohl unter LOS- als auch unter NLOS-Bedingungen. Damit entsteht eine Alternative zu traditionellen DSL-, Kabel- oder Mietleitungen, insbesondere in Regionen, die bisher nur über wenig kabelgebundene Breitbandangebote verfügen. Der ortsfeste Breitbandzugang (BWA = Broadband Wireless Access) wird für IEEE 802.16-2004 in folgende Szenarien unterteilt:

- „Fixed Wireless Access“, bei der die Subscriber Station (auch „Customer Premises Equipment“, CPE genannt) über eine fest installierte Außenantenne Kontakt zur Basisstation aufnimmt. Die Inhouse-Verteilung der Signale erfolgt von der SS entweder über ein drahtgebundenes Netzwerk oder WLAN (802.11). Ähnlich wie man dies von DSL/WLAN Routern her kennt, sind dafür Kombigeräte mit 802.16 und 802.11 vorgesehen.
- „Nomadischer BWA“, bei dem die Teilnehmerstation nicht mehr über eine separate Außenantenne, sondern eine integrierte Antenne verfügt. Denkbar sind hier beispielsweise PCMCIA-Karten für Notebook-Computer, mit denen es möglich wird, an verschiedenen Punkten innerhalb des Versorgungsbereichs einer Basisstation die Verbindung aufzubauen. Allerdings ist im Vergleich zum Fixed Access mit einer verminderten Reichweite insbesondere innerhalb von Gebäuden zu rechnen.

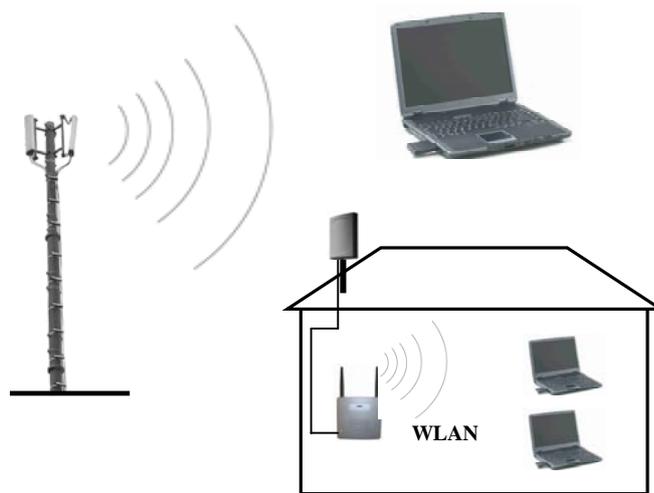


Bild 2.5 IEEE 802-16 für Last-Mile-BWA

2.4.3 Mobiler BWA

Mit der Standarderweiterung IEEE 802.16e-2005 wird der Übergang vom ortsfesten oder nomadischen BWA hin zum Breitbandzugang für mobile Endgeräte vollzogen. Damit wird auch für Teilnehmer, die sich mit (moderater) Geschwindigkeit bewegen, eine kontinuierliche Netzwerkverbindung ermöglicht. Voraussetzung dafür ist natürlich eine entsprechende Netzabdeckung, wie sie von heutigen GSM- oder UMTS-Mobilfunksystemen her bekannt ist.

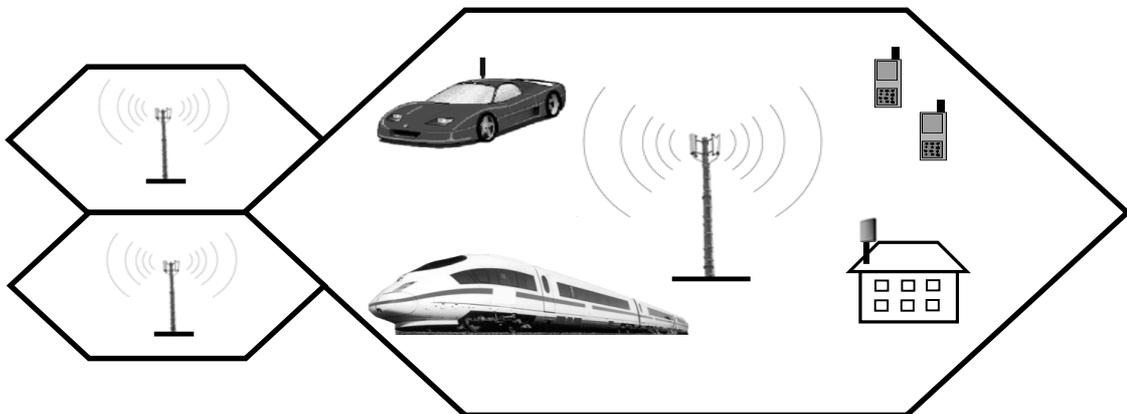


Bild 2.6 IEEE 802-16 für mobilen BWA

2.5 WiMAX-Signalparameter

2.5.1 Frequenzbereiche

Um die Chancen für den Erfolg der WiMAX-Technologie im Bereich des BWA zu vergrößern, ist man bestrebt, die weltweite Frequenzvergabe derart zu harmonisieren, dass global einheitliche Bänder für den WiMAX-Betrieb verfügbar gemacht werden. Prinzipiell bieten sich dazu die folgenden Bänder an [MAU 07]:

- **2,4-GHz-Band (lizenzfrei):** Dieses lizenzfreie Band zwischen 2,4 und 2,483 GHz wird schon intensiv von 802.11b/g und Bluetooth benutzt. Aufgrund der zu erwartenden Interferenzen und der stark begrenzten maximalen Sendeleistung von 0,1 Watt kommt es für den WiMAX-Betrieb eher nicht in Frage.
- **2,5-GHz-Band (lizenzpflichtig):** Dieses Band erstreckt sich von 2,495 bis 2,6 GHz. Es wurde in Nordamerika, Mexiko, Brasilien und einigen südostasiatischen Staaten für BWA-Netze wie WiMAX frei gemacht. In Europa steht dieses Band jedoch nicht zur Verfügung.
- **3,5-GHz-Band (lizenzpflichtig):** Das 3,5-GHz-Band umfasst im Kern Frequenzen zwischen 3,4 und 3,6 GHz. Dieses Band ist global am weitesten für drahtlose Breitbandübertragung verfügbar, nicht jedoch in den USA. Dort wurde allerdings inzwischen ein Bereich von 3,65 bis 3,7 GHz frei gemacht. In wenigen Regionen sind auch Frequenzen zwischen 3,3 und 3,4 GHz für BWA verfügbar. Allerdings dürfen die Frequenzen im 3,5-GHz-Bereich derzeit in den meisten Regionen nur für den ortsgebundenen Zugriff benutzt werden. Jedoch bemühen sich derzeit die Regulierungsbehörden, die Frequenzen zunächst für den portablen und schließlich auch für den mobilen Zugriff verfügbar zu machen. In Europa waren die Frequenzen im 3,5-GHz-Band ursprünglich den WLL-Systemen zugewiesen und wurden diesen aufgrund der ausbleibenden Bedeutung wieder entzogen. Die ersten zertifizierten WiMAX-Produkte sind für den Frequenzbereich zwischen 3,4 und 3,6 GHz ausgelegt. Näheres zur Vergabe dieses Frequenzbandes für BWA in Deutschland findet sich in Kapitel 3 vorliegenden Berichtes.
- **5-GHz-Band (lizenzfrei):** Der 5-GHz-Bereich erstreckt sich von 5,15 bis 5,875 GHz. Er kann zumindest teilweise in nahezu allen Ländern lizenz- und kostenfrei benutzt werden. Der untere Bereich zwischen 5,15 und 5,25 GHz steht vornehmlich IEE 802.11a zur Verfügung. Für den lizenzfreien WiMAX-Betrieb sind die Frequenzen oberhalb 5,25 GHz von Interesse. Im oberen Bereich zwischen 5,725 und 5,85 GHz ist eine höhere maximale Sendeleistung (bis 4 Watt) erlaubt, was den WiMAX-Netzen, die deutlich höhere Reichweiten als WLAN erzielen sollten, entgegenkommt. Das erste für die Zertifizierung definierte WiMAX-Profil für den lizenzfreien Betrieb bezieht sich auf den Frequenzbereich zwischen 5,725 und 5,85 GHz. In Europa laufen derzeit Bemühungen, diesen Frequenzbereich für BWA harmonisiert bereitzustellen. Im Rahmen von Allgemeinverfügungen sind von der Bundesnetzagentur für Deutschland die Frequenzbereiche 5,15-5,35 GHz (maximale EIRP 200 mW), 5,47-5,725 GHz (maximale EIRP 1 W) und 5,755-5,775 GHz (maximale EIRP 4 W) freigegeben worden.

2.5.2 Wichtige Signalparameter

In folgender Tabelle sind die wesentlichen Signalparameter und Leistungsmerkmale der drei vorgestellten WiMAX-Technologien (LOS-fixed; LOS/NLOS-fixed sowie LOS/NLOS-mobile) zusammengestellt. Insbesondere die Charakteristika, die später für die korrekte messtechnische Immissionserfassung von Bedeutung sind (z.B. Frequenzbereich, Signalbandbreite, Modulationsverfahren, Duplexart) sind aufgeführt.

| Parameter, Eigenschaft | Richtfunk | Fixed WiMAX | Mobile WiMAX |
|-------------------------|-----------------------|--|---|
| Standard | 802.16-2004 | 802.16-2004 | 802.16e-2005 |
| Szenario | LOS (fixed) | LOS/NLOS (fixed, nomadisch, portabel) | LOS/NLOS (mobil) |
| Frequenzbereich | 10 - 66 GHz | 2 - 11 GHz | 2 - 6 GHz |
| mögl. Signalbandbreiten | 20/25/28 MHz | In 250-kHz-Stufen skalierbar von 1,5 bis 20 MHz | 1,75/3,5/5/7/10/20 MHz |
| Max. Datenrate | 134 Mbit/s bei 28 MHz | 75 Mbit/s bei 20 MHz | 15 Mbit/s bei 5 MHz |
| Modulationsart | Einträgermodulation | Ein- oder Mehrträgermodulation (OFDM oder OFDMA mit 256 Trägern) | Mehrträgermodulation (SOFDMA mit bis zu 2048 Trägern) |
| Bezeichnung | WirelessMAN-SC | WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA | WirelessMAN-SOFDMA |
| Modulationsverfahren | 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM | 2-PSK, 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM | 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM |
| Duplexverfahren | FDD oder TDD | FDD oder TDD | FDD oder TDD |
| Maximale Reichweite | ca. 100 km | ca. 50 km | ca. 5 km |
| Reichweite (typisch) | ca. 50 km | ca. 15 km (mit Outdoorantenne) ca. 5 km (mit Indoorantenne) | ca. 1,5 km |

Tab. 2.1 WiMAX-Technologien: Wichtige Kennwerte im Vergleich

In lizenzfreien Bändern ist als Duplexverfahren nur TDD zulässig.

Bezüglich maximaler Sendeleistungen macht der Standard keine Angaben. Allerdings werden in den WiMAX-Systemprofilen Leistungsklassen definiert. Für den derzeit wichtigsten Standard (WirelessMAN-OFDM) sind beispielsweise die Leistungsklassen nach Tabelle 2.2 festgelegt.

Für die lizenzierten Bänder werden maximale Sendeleistungen durch die Regulierungsbehörden im Rahmen des Vergabeverfahrens festgelegt, siehe Kapitel 3.

| Leistungsklasse | Max. Sendeleistung $P_{TX,max}$ |
|-----------------|---|
| ProfC3_0 | $P_{TX,max} < 14$ dBm |
| ProfC3_14 | $14 \text{ dBm} \leq P_{TX,max} < 17$ dBm |
| ProfC3_17 | $17 \text{ dBm} \leq P_{TX,max} < 20$ dBm |
| ProfC3_20 | $20 \text{ dBm} \leq P_{TX,max} < 23$ dBm |
| ProfC3_23 | $P_{TX,max} > 23$ dBm |

Tab. 2.2 Leistungsklassen für WirelessMAN-OFDM-Produkte

2.5.3 Zeitstruktur von WiMAX-Signalen

Im folgenden ist die Zeitstruktur des aktuell bedeutsamsten WiMAX-Signals (WirelessMAN-OFDM) dargestellt. Andere WiMAX-Signale sind in ihrem prinzipiellen Zeitverlauf ähnlich aufgebaut, Details wie beispielsweise absolute Zeiten können natürlich variieren.

Dabei ist hier die TDD-Zeitstruktur dargestellt, bei der ein Rahmen (Frame) in einen Downlink- und einen Uplinkteil untergliedert wird. Up- und Downlink werden somit nacheinander durchgeführt, wobei der Downlink zuerst stattfindet. Im FDD-Mode hingegen wird die Up- und Downlinkübertragung gleichzeitig auf unterschiedlichen Frequenzen vorgenommen.

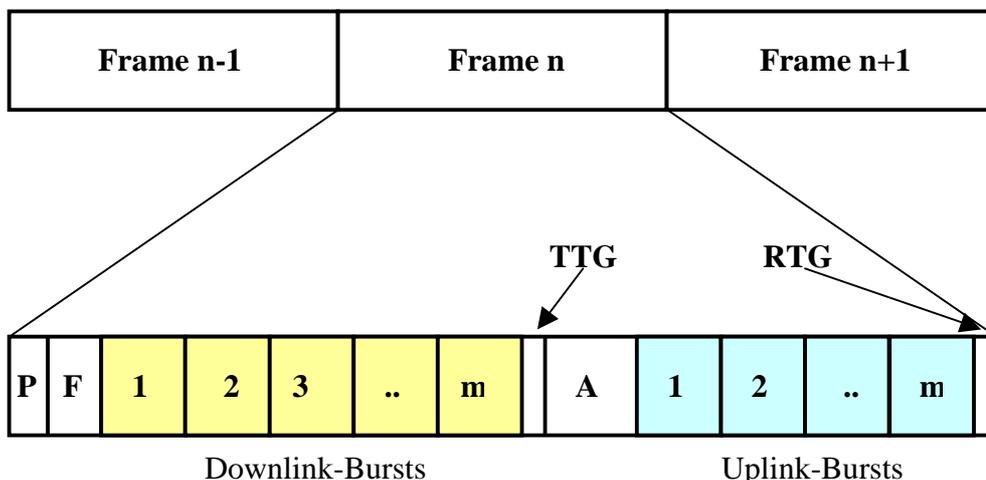


Bild 2.7 Prinzipielle Zeitstruktur von WirelessMAN-OFDM

Die Dauer eines Rahmens kann zwischen 2,5 und 20 ms betragen. Up- und Downlink-Bereiche werden im TDD-Mode durch das Transmit Time Gap (TTG) bzw. das Receive Time Gap (RTG) getrennt. Im FDD-Mode entfallen TTG und RTG. Die Dauer von TTG und RTG ist abhängig von der gewählten Übertragungsbandbreite und der zeitlichen Länge eines OFDM-Symbols [ANR 06].

Zu Beginn des Rahmens wird eine Präambel (P) gesendet, die zur Rahmen- und Phasensynchronisation der Subscriber Stationen dient. Zusätzlich wird in der Präambel ein Referenzsignal generiert, mit dem der Kanalverzerrter in den Empfängern der SS eingestellt wird.

Anschließend folgt der Frame Control Header (F), in dem Infos über den ersten nachfolgenden Downlink-Burst mitgeteilt werden. Unter anderem finden sich hier Angaben über den genauen Zeitpunkt des Beginns und das verwendete Burstprofil (z.B. Modulationsart). Im ersten Downlink-Burst werden dann ebenfalls Informationen über den genauen Beginn und die individuellen Profile aller nachfolgenden Down- bzw. Uplink-Bursts übermittelt. Anschließend folgen Downlink-Bursts, die Daten an die Subscriber Stationen übermitteln. Dabei werden die Bursts mit dem robustesten Profil (d.h. deren Adressaten befinden sich vermutlich sehr weit von der BS entfernt) zuerst gesendet, gefolgt von Bursts mit abnehmender Robustheit (d.h. Versorgung der Teilnehmer mit geringerer Entfernung zur BS). Durch diese Anordnung wird sichergestellt, dass die Phasensynchronisation auch für die weit entfernten Subscriber Stationen mit schlechter Empfangsqualität sichergestellt wird, da sie zuerst mit Daten über eine robuste Verbindung versorgt werden. Falls die Synchronisation in den nachfolgenden weniger robusten Bursts verloren geht, ist dies kein Problem mehr, da in diesen Bursts keine Information mehr für die weit entfernten Teilnehmer übertragen wird.

Um das Design der Sender und Empfänger zu vereinfachen, werden alle Symbole des Frame Control Header und der Downlink-Bursts mit gleicher mittlerer Leistung gesendet [ANR 06].

Nach dem Transmit Time Gap beginnt die Zeit für den Uplink. Dieser beginnt zunächst mit einem Zeitfenster (A), das von den Subscriber Stationen für den initialen Zugang ins System benutzt wird („initial ranging“), bzw. in dem die Teilnehmer auf Anfragen der Basisstation antworten („Request Contention“). Anschließend folgt der Zeitraum für die Uplink-Bursts. Der Rahmen wird durch das Receive Time Gate beendet.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass ein WiMAX-Signal aus einem periodisch permanent abgesendeten Signal plus bei Bedarf zusätzlich aktivierter Bursts besteht. Somit ergibt sich die Tatsache, dass die Größe der Exposition, verursacht durch Basisstationen abhängig von der momentanen Auslastung der Station schwankt. Die Situation ist also bei WiMAX vergleichbar zu WLAN-Systemen.

3 Stand des Lizenzierungsverfahrens in Deutschland

Von der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Bundesnetzagentur, BNetzA) wurde mit der Verfügung 95/2005 [BNetzA 05] am 21.12.2005 das Antragsverfahren für den „breitbandigen drahtlosen Netzzugang - Broadband Wireless Access“ (BWA) im Frequenzbereich 3400 bis 3600 MHz für Deutschland eröffnet. Diese Verfügung sah eine Vergabe von insgesamt 2x42 MHz, aufgeteilt in ein Unterband (3410 bis 3452 MHz) und ein Oberband (3510 bis 3552 MHz) vor. Der Rest des Frequenzbereiches konnte aufgrund von bestehenden Nutzungsrechten von WLL-Frequenzzuteilungen und bestehender Frequenzzuteilungen für Punkt-zu-Punkt-Richtfunk nicht zur Verfügung gestellt werden. Die Frequenzzuteilung für einen Versorgungsbereich konnte zunächst für Frequenzblöcke von maximal 14 MHz gepaart (aufgeteilt in 2x7 MHz gepaart) Frequenzbandbreite beantragt werden. Es erfolgte keine Beschränkung des Einsatzes auf bestimmte Technologien (Technologieneutralität).

Unter den Frequenznutzungsbedingungen der Verfügung wurden mit Verweis auf die CEPT/ERC Rec. (04)05 [CEPT 05] maximal zulässige äquivalente isotrope Strahlungsleistungen (EIRP) sowie maximale Ausgangsleistungen für Zentralstationen (Basisstationen) und Teilnehmerstationen (Endgeräte) wie folgt definiert: Für die Zentralstation waren maximal 23 dBW/MHz (EIRP) bzw. 5 dBW/MHz (Ausgangsleistung) und für die Teilnehmerstation maximal 20 dBW/MHz (EIRP) bzw. 2 dBW/MHz (Ausgangsleistung) erlaubt. Die Frequenzen sollen so genutzt werden, dass an der Grenze der Bundesrepublik Deutschland eine spektrale Leistungsdichte von $-122 \text{ dBW}/(\text{MHz m}^2)$ nicht überschritten wird.

Die Vergabe sollte auf der Grundlage eines Registrierungsverfahrens erfolgen. Die Zuteilung der Frequenzen wurde an eine Beantragung der standortbezogenen Parameter von entsprechenden Basisstationen und deren geplante Inbetriebnahme innerhalb einer Frist von 8 Monaten seitens des Antragstellers bzw. einer tatsächlichen Nutzung innerhalb eines Jahres gebunden. Mit diesem vergleichsweise unkomplizierten Registrierungsverfahren wollte die BNetzA allen Interessenten möglichst schnell den Zugang zum Spektrum öffnen.

Bis zum Ablauf der Antragsfrist am 28.02.2006 wurden insgesamt 1221 Anträge von 102 Antragstellern gestellt. Von diesen Anträgen waren allein neun auf bundesweite bzw. quasi bundesweite Frequenzzuteilungen gerichtet. Eine Vielzahl von Antragstellern hatte Anträge gestellt, die überregionale bis hin zu bundeslandbezogene aber auch lokale Gebiete umfassen. Nach Durchsicht und Prüfung der eingegangenen Anträge stellte die BNetzA fest, dass der geltend gemachte Frequenzbedarf den Umfang der verfügbaren Frequenzen im Frequenzbereich um 3,5 GHz um ein Vielfaches überstieg. Damit konnte das geplante vereinfachte Zuteilungsverfahren nicht durchgeführt werden.

Am 05.07.2006 hat die Bundesnetzagentur daraufhin neue Eckpunkte über die Vergabe der Frequenzen für BWA-Anwendungen veröffentlicht [BNetzA 06]. Zugleich wurden die betroffenen Kreise zur Kommentierung der Eckpunkte bis zum 04.08.2006 aufgerufen.

Als neues Vergabeverfahren wurde das Versteigerungsverfahren ausgewählt. Im Frequenzbereich 3400 bis 3600 MHz wurden maximal 2x84 MHz zur Nutzung freigegeben (Unterband 3410 bis 3494 MHz, Oberband 3510 bis 3594 MHz), wobei, wie bereits im Registrierungsverfahren, aufgrund bestehender Nutzungsrechte in einigen Regionen nur ein Teil dieses Spektrums zur Verfügung steht. Zur Versteigerung sollten drei Pakete wie folgt kommen:

- Paket A: 3 Blöcke á 7 MHz gepaart = 21 MHz gepaart
- Paket B: 3 Blöcke á 7 MHz gepaart = 21 MHz gepaart
- Paket C: bis zu 4 Blöcke á 7 MHz gepaart = bis zu 28 MHz gepaart

Zwischen den Frequenzpaketen A und B bzw. B und C wurden Schutzkanäle von 7 MHz eingerichtet und grundsätzlich nicht zugeteilt. Die Frequenzaufteilung ist in Bild 3.1 dargestellt [BNetzA 06].

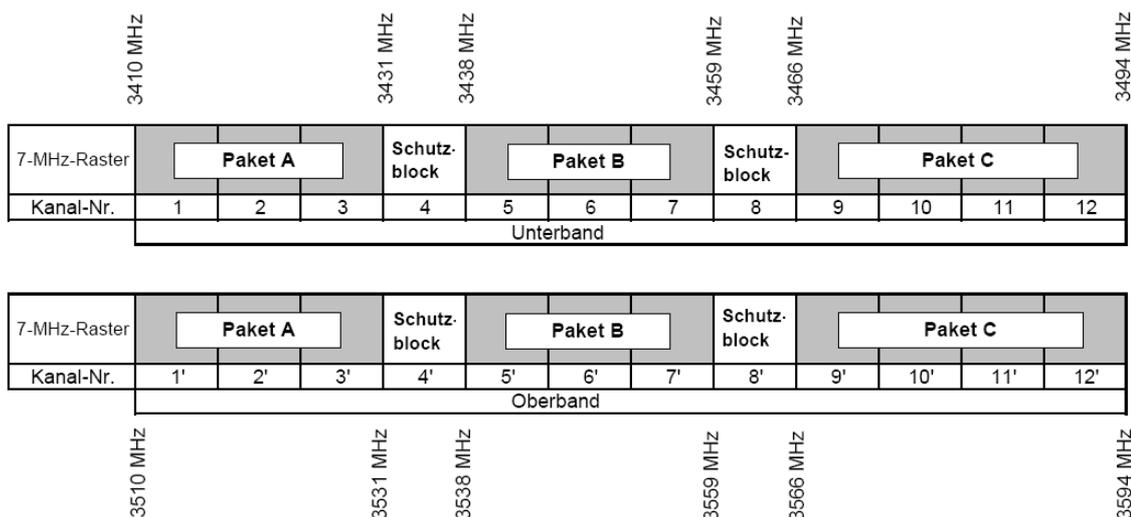


Bild 3.1 Frequenzaufteilung nach dem Eckpunktepapier vom 05.07.2006 [BNetzA 06]

Die Fläche der Bundesrepublik wurde in 16 Regionen aufgeteilt, für die die Antragsteller separat Lizenzen erwerben konnten. Aufgrund der bestehenden WLL-Zuteilungen konnte das Frequenzpaket C nicht flächendeckend bzw. nicht in vollem Umfang zur Verfügung gestellt werden. Zum Schutz dieser WLL-Zuteilungen wurden für die betroffenen BWA-Kanäle an den Grenzen der WLL-Versorgungsbereiche Grenzen für die maximale spektrale Leistungsflussdichte von $-122 \text{ dBW}/(\text{MHz m}^2)$ definiert. In Gegenrichtung müssen BWA-Zuteilungsinhaber eine Störleistungsflussdichte von $-122 \text{ dBW}/(\text{MHz m}^2)$ ausgehend von der Grenze des WLL-Versorgungsgebietes bis 15 km in die eigene Region hinein hinnehmen.

Angaben über maximal zulässige Sendeleistungen sind im Eckpunktepapier nicht enthalten.

Es wurde ebenfalls nach dem Grundsatz der Technologieneutralität verfahren; eine Beschränkung des Einsatzes auf bestimmte Techniken erfolgte nicht.

Mit der Frequenzzuteilung wurde die Auflage verbunden, innerhalb einer Region bis 31.12.2009 15 % der Gemeinden und bis 31.12.2011 25 % der Gemeinden zu versorgen (Versorgungsverpflichtung). Eine Gemeinde gilt als versorgt, wenn mindestens eine Basisstation zur Anbindung von Teilnehmern in Betrieb ist. Bei Gemeinden mit einer Fläche von bis zu 30 km² reicht es aus, wenn die Entfernung von der Gemeindegrenze bis zur nächsten in Betrieb befindlichen Basisstation zur Anbindung von Teilnehmern kleiner als 3 km ist.

Im Rahmen der Kommentierung des Eckpunktepapiers sind 51 Stellungnahmen eingegangen, die in einigen Punkten Änderungen der in [BNetzA 06] formulierten Eckpunkte zur Folge

hatten. Am 26.09.2006 hat die Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur eine Entscheidung über das Vergabeverfahren getroffen und veröffentlicht [BNetzA 06-2].

Als Vergabeverfahren wurde das Versteigerungsverfahren bestätigt. Der zur Verfügung gestellte Frequenzbereich blieb unverändert, wobei nunmehr auf die Schutzblöcke verzichtet wurde, wodurch sich im Unter- und Oberband je 14 MHz zusätzliche Frequenzressourcen ergaben. Zur Versteigerung wurden vier Pakete wie folgt freigegeben:

- Paket A: 3 Blöcke á 7 MHz gepaart = 21 MHz gepaart
- Paket B: 3 Blöcke á 7 MHz gepaart = 21 MHz gepaart
- Paket C: bis zu 3 Blöcke á 7 MHz gepaart = bis zu 21 MHz gepaart
- Paket D: bis zu 3 Blöcke á 7 MHz gepaart = bis zu 21 MHz gepaart

Die Blöcke C und D stehen aufgrund bestehender WLL-Lizenzen nicht in allen Regionen flächendeckend bzw. in vollem Umfang zur Verfügung. Die Frequenzaufteilung ist in Bild 3.2 dargestellt [BNetzA 06-2]. Bei Frequenzduplex (FDD) ist das Oberband für die Basisstation zugeordnet und das Unterband für das Endgerät. Zeitduplex ist ebenfalls möglich.

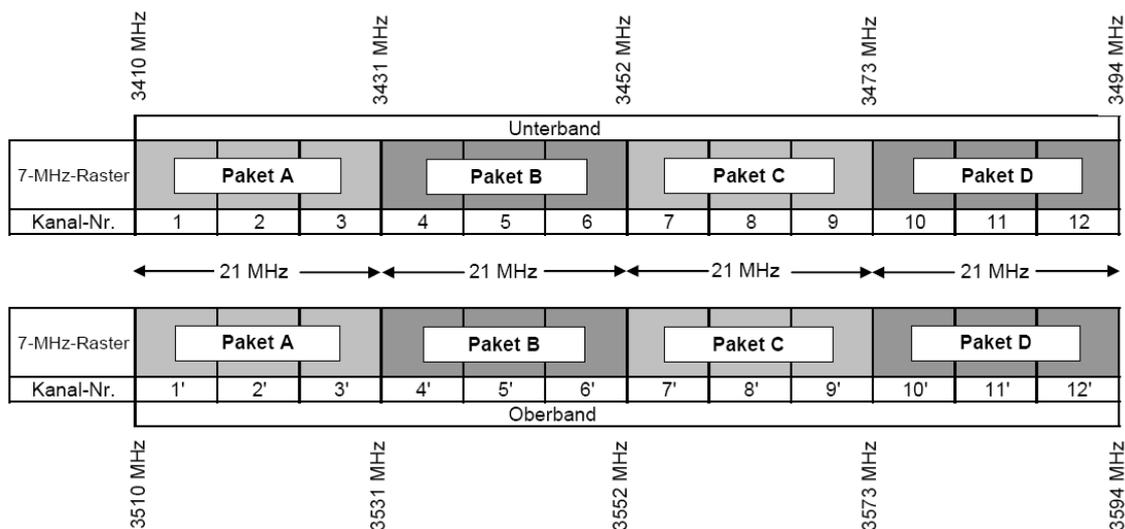


Bild 3.2 Frequenzaufteilung nach der Präsidentenkammerentscheidung vom 26.09.2006 [BNetzA 06-2]

Für die Technologieneutralität gilt das im Eckpunktepapier Gesagte. Es sei an dieser Stelle noch einmal deutlich gemacht, dass der „sachlich relevante Markt“, für den die zu vergebenen Frequenzen unter Beachtung des Frequenznutzungsplans verwendet werden dürfen, der Markt für den drahtlosen breitbandigen Netzzugang (BWA) ist. Der derzeitige Frequenznutzungsplan erlaubt in dem hier relevanten Frequenzbereich lediglich die Nutzung für den *festen* Funkdienst. Allerdings werden nomadische und portable Anwendungen ausdrücklich zugelassen, eine volle Mobilität der Nutzungen hingegen ist nicht zulässig. Da die BNetzA allerdings absieht, dass die Entwicklung in diesem Bereich auch auf mobile Nutzungen abzielt, ist vorgesehen, nach entsprechender Klärung der planungsrechtlichen Voraussetzungen (Frequenznutzungsplan) auch mobile Nutzungen zu ermöglichen.

Die Frequenzen sind so zu nutzen, dass an der Grenze der Bundesrepublik Deutschland eine spektrale Leistungsflussdichte von $-122 \text{ dBW}/(\text{MHz m}^2)$ nicht überschritten wird, sofern

es sich nicht um für jede Region definierte Vorzugsfrequenzen handelt. Bei Vorzugsfrequenzen muss dieser Wert erst in einer Entfernung von 15 km hinter der Grenze erreicht werden. Dieser Grenzwert für die spektrale Leistungsflussdichte gilt auch an der Grenze verschiedener Regionen, wobei die betroffenen Zuteilungsinhaber davon abweichende Regelungen treffen können. Angaben über maximal zulässige Sendeleistungen sind nicht enthalten. Die Frequenzzuteilungen werden bis zum 31.12.2021 befristet.

Die Fläche der Bundesrepublik wurde in nunmehr 28 Regionen aufgeteilt, für die die Antragsteller separat Lizenzen erwerben konnten (Bild 3.3, [BNetzA 06-2]).



Bild 3.3

BWA-Regionen nach der Präsidentenkammerentscheidung vom 26.09.2006
[BNetzA 06-2]

Der Versorgungsverpflichtung des Eckpunkteapiers [BNetzA 06] wurde beibehalten. Allerdings wurde die Definition der Versorgung geändert; bei Gemeinden von nunmehr bis zu 50 km² ist eine Basisstation ausreichend. Bei Gemeinden von mehr als 50 km² und mit mehr als 3000 Einwohnern sind mindestens 2 Basisstationen erforderlich, bei Gemeinden bis zu 30 km² muss die Entfernung von der Gemeindegrenze bis zur nächsten Basisstation weniger als 3 km betragen.

Nach Beendigung der Antragsfrist am 08.11.2006 wurde von der Bundesnetzagentur vom 12. bis 15.12.2006 das Versteigerungsverfahren durchgeführt. Es wurde ein Erlös von 56,066 Mio € erzielt.

Für eine Nutzung in allen 28 Regionen haben folgende drei Unternehmen den Zuschlag erhalten:

- Clearwire Europe S.á.r.L. (Luxemburg)
- Inquam Broadband GmbH (Köln)
- DBD Deutsche Breitband Dienste GmbH (Heidelberg)

Neben den drei bundesweit erfolgreichen Bietern haben zwei Unternehmen regionale Zuschläge erhalten:

- Televersa Online GmbH (Töging a. Inn) -
Regionen Oberpfalz (Region 25) und Niederbayern (Region 28)
- MGM Productions Group S.R.L. (Italien) - Oberbayern (Region 27)

Der Bieter EWE-Tel GmbH (Oldenburg) ist ausgeschieden.

Nicht vergeben wurde das Frequenzpaket D in 24 Regionen (Region 1-13, 15-24 und 26) und das Frequenzpaket C in der Region 14. Diese Frequenzpakete stehen damit in den genannten Regionen weiterhin (jedoch wegen vorhandenen WLL-Belegungen nicht flächendeckend und nicht in vollem Umfang) zur Verfügung.

Unter Berücksichtigung von Kommentaren auf einen öffentlich zur Anhörung gestellten Entwurf einer geplanten 2. BWA-Vergabeentscheidung hat die Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur am 23. Juni 2008 die Entscheidung über die Vergabe der noch verfügbaren Frequenzen im 3,5-GHz-Bereich für breitbandige drahtlose Netzzugänge getroffen [BNetzA 08]. Es ist ein 2-stufiges Vergabeverfahren vorgesehen. Die Frequenzen werden soweit wie möglich auf Antrag zugeteilt. Nur für den Fall, dass in einer oder mehreren Regionen mehr Anträge gestellt werden als Frequenzen verfügbar sind, wird der Zuteilung ein Versteigerungsverfahren vorangestellt werden. Die zu vergebenden Frequenzen (21 MHz, gepaart) stehen in 30 Regionen zur Verfügung.

Darüber hinaus soll für drahtlose breitbandige Netzzugänge in lokalen und kleineren Versorgungsgebieten die Zuteilung von Frequenzen im Bereich 3600 bis 3800 MHz ermöglicht werden. Das Frequenzzuteilungsverfahren und die Nutzungsbedingungen sind mit Mitteilung Nr. 628/2008 zur Anhörung gestellt worden [BNetzA 08-2].

Literaturverzeichnis zu Teil I

- [ANR 06] **Anritsu Corporation**, *Practical Tips on WiMAX Field Measurements*, Application Note, No. 11410-00404, Rev. A, 11/2006.
- [BNetzA 05] **Vfg. 95/2005**, *Bereitstellung von Frequenzen für Funkanwendungen im Rahmen des Broadband Wireless Access (BWA); Zuteilung von Frequenzen im Bereich 3400 - 3600 MHz für breitbandige drahtlose Verteilsysteme*, Amtsblatt der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Nr. 24/2005, Verfügung 95/2005, 21.12.2005.
- [BNetzA 06] **Mitteilung 252/2006**, *Entwurf zur Anhörung; Eckpunkte einer Entscheidung der Präsidentenkammer über die Anordnung und die Wahl des Vergabeverfahrens zur Vergabe von Frequenzen im Bereich 3,5 GHz für den breitbandigen drahtlosen Netzzugang - Broadband Wireless Access (BWA) sowie die Festlegungen und Regelungen für die Durchführung des Verfahrens*, Amtsblatt der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Nr. 13/2006, 05.07.2006.
- [BNetzA 06-2] **Allgemeinverfügung Nr. 42/2006 Aktenzeichen BK 1- 05/008**, *Entscheidung der Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen über die Anordnung und die Wahl des Vergabeverfahrens zur Vergabe von Frequenzen im Bereich 3,5 GHz für den breitbandigen drahtlosen Netzzugang (Broadband Wireless Access, BWA) sowie die Festlegungen und Regelungen für die Durchführung des Verfahrens vom 26.09.2006*, Amtsblatt der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Nr. 20/2006, 11.10.2006.
- [BNetzA 08] **Verfügung Nr. 49/2008 Aktenzeichen BK 1- 07/009**, *Entscheidung der Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen vom 23. Juni 2008 über das Verfahren zur Vergabe von Frequenzen für den breitbandigen drahtlosen Netzzugang (Broadband Wireless Access, BWA) in dem Frequenzbereich 3400 bis 3600 MHz*, Amtsblatt der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Nr. 49/2008.
- [BNetzA 08-2] **Mitteilung 628/2008**, *Entwurf Frequenzzuteilungsverfahren und Nutzungsbedingungen für Frequenzen im Bereich 3600 bis 3800 MHz zur Realisierung von breitbandigen drahtlosen Netzzugängen (Broadband Wireless Access, BWA); Anhörung*, Amtsblatt der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Nr. 21/2008, 05.11.2008.
- [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).

- [CEPT 05] **CEPT/ECC Recommendation (04)05**, *Guidelines for Accomodation and Assignment of Multipoint Fixed Wireless Systems in Frequency Bands 3.4-3.6 GHz and 3.6-3.8 GHz, Edition 160206.*
- [HAR 06] **L. Harte**, *Introduction to 802.16 WiMAX*, ALTHOS Publishing Inc., (2006).
- [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).
- [IEEE 06] **IEEE Std. 802.16e-2005 & 802.16/Corr.1**, *Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*, New York, (2006).
- [MAU 07] **J. Maucher, J. Furrer**, *WiMAX, Der IEEE-802.16-Standard: Technik, Anwendung, Potenzial*, Heise Zeitschriften Verlag GmbH, (2007).
- [RUS 06] **Rohde & Schwarz**, *WiMAX - General Information about the Standard 802.16*, Application Note, München, 06/2006.

Abkürzungsverzeichnis zu Teil I

| | |
|--------|--|
| ATM | Asynchronous Transfer Mode |
| AAS | Adaptive Antennensysteme |
| BS | Basisstation |
| BWA | Broadband Wireless Access (engl.) → Breitbandiger drahtloser Netzzugang |
| BNetzA | Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen |
| CEPT | European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (engl.) → Europäische Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation |
| CPE | Customer Premises Equipment (engl.) → Endgerät |
| DSL | Digital Subscriber Line (engl.) → Digitale Teilnehmerleitung |
| DVB-T | Digital Video Broadcasting – Terrestrial (engl.) → Digitales terrestrisches Fernsehen |
| 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.) |
| LAN | Local Area Network (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 |
| n-PSK | n-wertige Phasenumtastung |
| n-QAM | n-wertige Quadraturamplitudenmodulation |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing (engl.) → Orthogonales Frequenzmultiplex |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (engl.) → Orthogonaler Frequenzvielfachzugriff |
| OPAL | Optische Anschlussleitung |
| OSI | Open System Interconnection |
| PTP | Point-to-Point (engl.) |

| | |
|--------|---|
| PMP | Point-to-Multipoint (engl.) |
| RTG | Receive Time Gap (engl.) |
| SOFDMA | Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (engl.) → Skalierbarer orthogonaler Frequenzvielfachzugriff |
| SS | Subscriber Station (engl.) → Teilnehmerstation |
| STC | Space Time Coding |
| TCM | Trelliscodierte Modulation |
| TDD | Time Division Duplex (engl.) → Zeitduplex |
| TDMA | Time Division Multiple Access (engl.) → Zeitmultiplex |
| TTG | Transmit Time Gap (engl.) |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WLL | Wireless Local Loop (engl.) |

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz