

# WiMAX

Matthias Eckert  
Betreuer: Tobias Bandh  
Seminar Future Internet SS2010  
Lehrstuhl Netzarchitekturen und Netzdienste  
Fakultät für Informatik, Technische Universität München  
Email: eckertm@in.tum.de

## KURZFASSUNG

Immer mehr digitale Dienste, ob stationär oder mobil, erfordern heutzutage eine schnelle Datenverbindung. Besonders entlegene Regionen leiden unter einer Unterversorgung aufgrund des fehlenden Netzausbaus. Um diesen Teil der Bevölkerung mit Breitband-Internet zu versorgen und schnelle mobile Datenversorgung bieten zu können, werden Lösungsansätze gesucht. Als auf dem IEEE 802.16 Standard aufbauende Funktechnologie für breitbandige Datenübertragung über weite Distanzen stellt WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) eine scheinbar geeignete Lösung dar. In Konkurrenz zu anderen, teilweise ähnlichen Technologien, steht WiMAX vor Problemen, die in diesem Paper diskutiert werden sollen.

## Schlüsselworte

WiMAX, IEEE 802.16, Breitband-Internet, 4G, LTE

## 1. EINLEITUNG

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) ist ein auf dem IEEE 802.16 aufbauender Standard für schnelle Datenübertragungen über weite Strecken. Durch diese Eigenschaft ist der WiMAX Standard insbesondere für regionale Netzwerke angedacht. Dies hat auch die Bundesregierung erkannt und verspricht durch eine geeignete Technologie Mischung ein deutschlandweit, flächendeckendes Breitbandnetz für schnellen Internetzugang bis zum Ende des Jahres 2010 [3]. Eine Möglichkeit stellt hierbei die Verbreitung von Breitband-Internet mit Hilfe von Funktechnologien dar. Somit könnte in dieser Mischung auch WiMAX zum Einsatz kommen, mit dessen Hilfe regionale Netzwerke in schwach besiedelten Regionen errichtet werden sollen. Diese Netzwerke können Breitband-Internet sowohl in Regionen und Haushalte, die momentan vom Netz der Versorgungsgesellschaften nicht erfasst werden, als auch auf mobile Endgeräte bringen.

## 2. WiMAX

WiMAX basiert auf dem IEEE 802.16 [20], ein parallel zum IEEE 802.11 (Wireless LAN, Ethernet) entwickelter Standard, für drahtlose Metropolitan Area Networks (MAN). Es existieren mehrere Ausprägungen des IEEE 802.16 Standards. Tabelle 1 zeigt die aktuell bedeutsamsten Revisionen.

In diesem Paper sollen die beiden wichtigsten, fixed WiMAX und mobile WiMAX, betrachtet werden. Ursprünglich waren Frequenzbänder im Bereich zwischen 10 und 66 GHz für den IEEE 802.16 vorgesehen. Dieser Frequenzbereich eignet

Bezeichnung	Definition
IEEE 802.16d-2004	fixed WiMAX
IEEE 802.16e-2005	mobile WiMAX
IEEE 802.16j-2009	Weiterentwicklung/Korrektur von mobile WiMAX

Tabelle 1: IEEE 802.16 Standards

sich besonders für Richtfunk. Da Richtfunk jedoch einen direkten Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger – die sogenannte Line of Sight (LoS) – voraussetzt, wurde das Frequenzspektrum des Standards mit der Revision d auf 2 bis 11 GHz verschoben. Hiervon sind für WiMAX vor allem drei Frequenzbereiche vorgesehen: 2,5 GHz, 3,5 GHz und 5,8 GHz. In diesem Frequenzbereich bietet WiMAX eine theoretische Übertragungreichweite von 50 Kilometern.

Frequenzbereich	Untergrenze	Obergrenze
2,5 GHz	2500 MHz	2690 MHz
3,5 GHz	3400 MHz	3600 MHz
5,8 GHz	5725 MHz	5850 MHz

Tabelle 2: vorgesehene Frequenzbereiche

## 3. IEEE 802.16

Standardisiert wurde der IEEE 802.16 im Dezember 2001. Als Standard für drahtlose MAN umfasste er ein Frequenzband von 10 bis 66 GHz mit Bandbreiten von 20, 25 und 28 MHz. Zwar ist eine Reichweite von bis zu 75 Kilometern gegeben, jedoch setzt der Standard eine direkte Sichtverbindung zwischen der Basisstation und der Empfangsantenne voraus. Dies wiederum hat eine komplexe Installation fest installierter Außenantennen in ausreichender Höhe zur Folge. Die maximale Datenrate liegt bei etwa 134 MBit/s [7].

### 3.1 IEEE 802.16d – fixed WiMAX

Im Januar 2003 und Juli 2004 wurden die Revisionen a und d vom IEEE verabschiedet. Die beiden Standards wurden letztendlich unter dem Synonym IEEE 802.16e-2004 vereint. Die Revision d spezifiziert heute den eigentlichen fixed WiMAX Standard. Ein möglicher Bereich für die Frequenzbänder wurde auf 2 GHz erweitert und gleichzeitig auf 11 GHz nach oben begrenzt. Die Bandbreite wurde als frei skalierbar im einem Bereich zwischen 1,5 und 20 MHz festgelegt. Für einen 20 MHz-Kanal liegt die maximale Datenrate für diesen Standard bei 75 MBit/s. Diese Entscheidung

senkte die Reichweite auf fünf, beispielsweise für WiMAX Router mit integrierter Antenne, bzw. 15 Kilometer für Anlagen mit fest installierter Außenantenne. Laborwerte attestieren weiterhin sogar eine theoretische Reichweite von 50 Kilometern [7].

### 3.2 IEEE 802.16e – mobile WiMAX

Die beiden Adjektive "fixed" (IEEE 802.16d) und "mobile" (IEEE 802.16e) wurden mit Einführung der Revision e im Dezember 2005 geprägt. 802.16-2005 wird daher auch als Synonym für die Revision e verwendet. In der neuen Revision wurden die Frequenzbänder in Frequenzbereiche zwischen 0,7 und 6 GHz verschoben, was eine typische Reichweite von 1,5 Kilometer zur Folge hatte. Allerdings ermöglicht es dieser Standard erstmalig einen Funkzellenwechsel im laufenden Betrieb vorzunehmen und somit dem Empfänger Mobilität zu bieten. Generell wurde bei diesem Standard besonderer Wert auf Mobilität gelegt. So wurde die Revision e auch mit dem Hauptaugenmerk auf Ressourcen schonende Verfahren entwickelt. Dem neuen Standard war es auch zu verdanken, dass der Zwang einer Sichtverbindung nun entfiel. Die neue Möglichkeit einer non-line-of-sight (NLOS) brachte jedoch anderweitige Probleme hervor, auf die in Abschnitt 4 weiter eingegangen wird. Die maximale Datenrate liegt bei 15 MBit/s [7].

## 4. MODULATIONSVERFAHREN

Durch die fehlende Richtcharakteristik der Antennen, in mobilen Endgeräten und den Wegfall der LOS sinkt die Chance auf eine ideale Empfangsqualität des Signals. So können Mehrfachreflexionen des Signals und der Umgang mit diesen problematisch sein. Auch der Aufenthalt innerhalb geschlossener Räume stellt die Technologie vor Probleme. Abhilfe schafft hierbei der Einsatz der, je nach Situation, geeigneten Modulationsverfahren.

Laut [19] gilt: Die Modulation beschreibt die Veränderung von Signalparametern eines Trägersignals in Abhängigkeit von einem modulierenden Signal. Hierbei werden die Signale miteinander multipliziert, d.h. moduliert. Auf der Seite des Senders befindet sich ein Modulator welcher die Nachricht auf das Trägersignal prägt, bevor die Nachricht über einen Kanal versendet und empfangsseitig durch einen Demodulator wieder zurückgewonnen wird. Der WiMAX-Standard nutzt für sich die im Folgenden erklärten digitalen Modulationsverfahren.

### 4.1 QPSK

Mit QPSK (quadrature phase shift keying) bezeichnet man ein Modulationsverfahren, mit dessen Hilfe zwei Bits auf ein Symbol codiert werden können. Ein Symbol bezeichnet dabei einen Übertragungsschritt. Dieses Verfahren wird bereits in anderen Mobilkommunikation-Standards, wie Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) verwendet. Hierbei erfolgt eine Unterteilung des Signals in vier Phasenlagen zu 45, 135, 225 und 315 Grad. Jede Phasenlage repräsentiert dabei einen Zustand. Mit vier verschiedenen Zuständen erlaubt die Quadratur-Phasenumtastung – so der deutsche Begriff – zwei Bits pro Symbol zu übermitteln. QPSK ist dem binary phase shift keying (BPSK) entsprungen. BPSK stellt die niedrigste Form der Modulationsverfahren dar. Das Verfahren überträgt pro Symbol genau ein Bit. BSPK kommt auch bei WiMAX regelmäßig

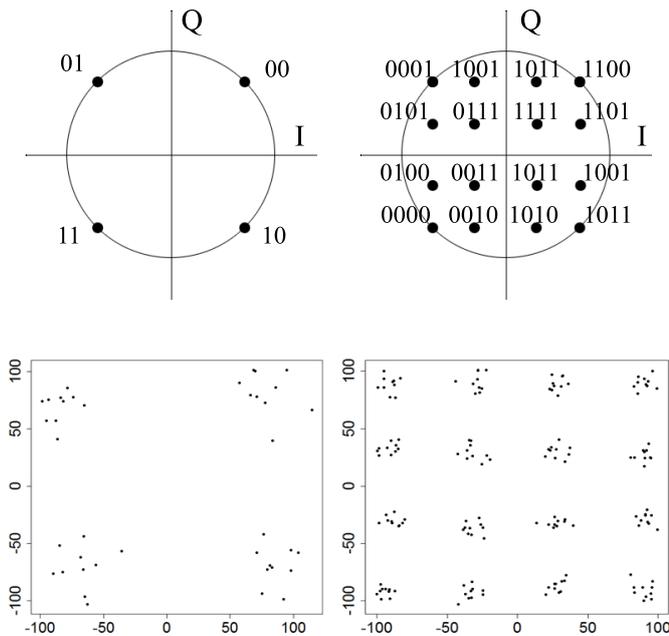
zum Einsatz. Aufgrund der geringen Datenübermittlung pro Symbol, ist BSPK das robusteste Modulationsverfahren. Es wird somit stets zu Beginn einer Übertragung eingesetzt um den Teilnehmern das nachfolgend eingesetzte Verfahren mitzuteilen. Anschließend wird die bestmögliche Modulationsstufe zur eigentlichen Übertragung verwendet, um die zur Verfügung stehende Bandbreite optimal auszunutzen [11, 17].

### 4.2 QAM

Ein weiteres von WiMAX genutztes Verfahren ist die Quadraturamplitudenmodulation (QAM). Es stellt eine Erweiterung von QPSK dar. Dieses Modulationsverfahren ermöglicht jedoch eine nochmals erhöhte Übertragungsdichte, da es zwei Trägerfrequenzen simuliert. Diese beiden Trägerfrequenzen werden erzeugt indem die ursprüngliche Trägerfrequenz zusätzlich um 90 Grad – entspricht 1/4 der Wellenlänge – phasenverschoben wird. Die beiden Trägersignale werden mit zwei oder mehreren unterschiedlichen Signalen amplitudenmoduliert und anschließend zusammengeführt, indem sie addiert werden. Auch dieses Verfahren findet in bereits eingesetzten Standards, wie High Speed Packet Access (HSPA) Verwendung. WiMAX nutzt sowohl QAM16 als auch QAM64, wobei die Zahl die größtmögliche Anzahl der einnehmbaren Zustände angibt. Mit Erhöhung der Modulationstufe lässt sich zwar die Datenrate bei gegebener Bandbreite steigern, jedoch geht dies zu Lasten der Robustheit gegenüber Interferenzen. Sollte eine höhere Modulation vorgenommen werden, so müssen auch geeignete Übertragungsbedingungen gegeben sein, da die Dekodierung bei Interferenzen sonst ungleich schwieriger wird. Wie Abbildung 1 zeigt stellen Ungenauigkeiten bei der Übertragung, bei höheren Modulationsstufen ein Problem dar. Bei zu großer Streuung lässt sich das Signal nicht mehr genau einer Bit-Gruppe zu ordnen. WiMAX ist daher in der Lage, in Abhängigkeit von der Signalqualität, zwischen den verschiedenen Verfahren zu wechseln [12, 15].

## 5. OFDM/OFDMA

Das von WiMAX genutzte Verfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) findet hauptsächlich in Hochgeschwindigkeits-Mobilfunknetzen Verwendung, so beispielsweise auch in LTE (siehe: Abschnitt 9.3). OFDM bezeichnet ein Zugangsverfahren, welches die Übertragung eines breitbandigen Signals auf mehrere schmalbandige orthogonale Signale gleichzeitig ermöglicht. Diese schmalbandigeren Signale werden als Subträger bezeichnet. Einzelne oder mehrere dieser Subträger können unterschiedlichen Nutzern zugewiesen werden, um somit eine optimale Ausnutzung der Bandbreite zu erreichen [10]. Die Breite eines jeden Subträgers ist festgesetzt. Für mobile WiMAX liegt diese bei 10,94 kHz. Die genaue Anzahl der verwendeten Subträger ist jedoch abhängig von der verfügbaren Bandbreite. Steht mehr Bandbreite zur Verfügung, so werden mehr Subträger eingesetzt [18]. Dies gilt jedoch nur für mobile WiMAX. Der große Unterschied zwischen fixed und mobile WiMAX liegt in der Tatsache, dass fixed WiMAX unabhängig von der Bandbreite stets 256 Subträger verwendet. Aus diesem Grund wird dem OFDM-Verfahren im Zusammenhang mit mobile WiMAX gerne auch das Präfix "Scalable" vorgeschoben [9]. OFDM besitzt zusätzlich die Eigenschaft sehr robust gegenüber Signalverfälschungen zu sein. Interessant wird diese Eigenschaft für den Downlink



**Abbildung 1: QPSK/QAM16 mit zugehörigen Messergebnissen**

im Bandbreitenbereich über 5 MHz. Verfälschungen können empfangsseitig zwar auch eigenständig bereinigt werden, jedoch ist die hierfür benötigte Rechenkapazität unverhältnismäßig groß.

In der Praxis findet selten die Kommunikation zwischen einer Basisstation und lediglich einem Empfänger statt. Meist sind an der Kommunikation mehrere Empfänger beteiligt. OFDM ist in der Lage auch mehrere Empfänger, so etwa die verschiedenen Mobiltelefone in einer Funkzelle, parallel zu bedienen bzw. von ihnen zu empfangen. Dies bezeichnet man als Nutzermultiplexing. Hierbei findet eine zeitlich festgelegte Übertragung auf unterschiedlichen Frequenzen, durch verschiedene mobile Endgeräte an die Basisstation statt.

In Richtung des Uplink wird OFDM daher gerne der Namen Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (OFDMA) gegeben. Kritisch für OFDMA ist die unterschiedliche Entfernung zwischen den verschiedenen Mobilfunkgeräten und der Basisstation. Größere Entfernungen bedeuten größere Zeitabstände zwischen dem Absenden und Empfangen eines Signals. OFDMA ist allerdings auf das nahezu zeitgleiche Eintreffen der verschiedenen Subträger angewiesen. Die Basisstation terminiert, je nach Entfernung der Sender, den Versand daher zeitversetzt. Ein permanenter Zeitabgleich zwischen Basisstation und den mobilen Endgeräten ist daher unerlässlich. Alle Sender werden so gesteuert, dass alle ankommenden Signale innerhalb eines Sicherheitsintervalls (guard interval) liegen. Diesen aktiven Prozess der Abstimmung durch die Basisstation nennt man transmit-timing-control[15].

## 6. MIMO

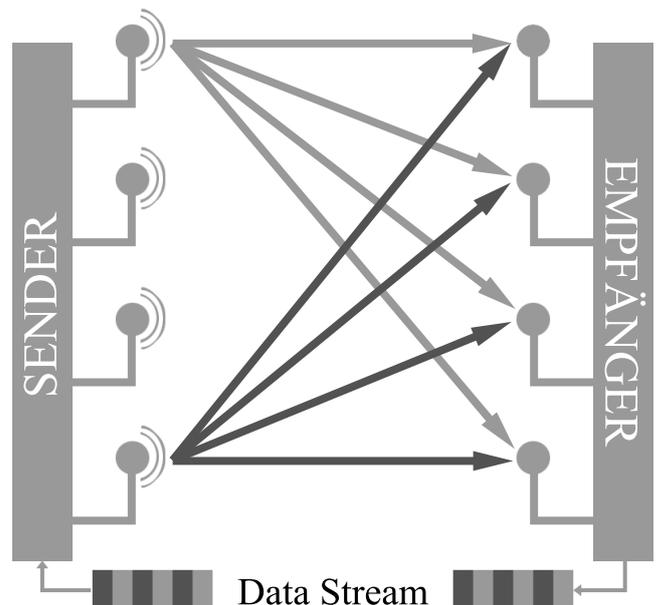
Um die, teilweise komplexen, Modulationsverfahren optimal zu unterstützen ist ein möglichst guter Empfang der

gesendeten Signale notwendig. Diese Unterstützung leistet MIMO. Multiple Input Multiple Output (MIMO) bezeichnet ein Mehrfach-Antennen-System. Dabei werden sender- wie empfangerseitig mehrere Antennen, mit dem Ziel ein qualitativ möglichst hochwertiges Empfangssignal zu erzielen, eingesetzt. Die entsprechende Anzahl an Antennen sollte jedoch auf beiden Seiten gleich sein. Entsprechend heißen die Verfahren 2 x 2 MIMO oder 4 x 4 MIMO. Die verschiedenen Antennen müssen mindestens den Abstand einer halben Wellenlänge der Trägerfrequenz zueinander besitzen. Diese Eigenschaft garantiert unterschiedliche Verbreitungswellen des Signals. Systeme in welchen MIMO zum Einsatz kommt, werden in mehrfacher Weise befähigt.

Zum einen lässt sich hierdurch die Versorgungsqualität steigern. MIMO Systeme haben die Auswahl zwischen mehreren Antennen, an welchen das Signal eingeht und können so je das qualitativ hochwertigste verwenden. Interferenzen werden durch das multiple Signal gesenkt und somit können beispielsweise der Zellenradius erweitert oder das Modulationsverfahren angehoben werden.

Zum anderen sind MIMO Systeme durch den Besitz mehrerer Antennen in der Lage parallel zu senden und zu empfangen. Alternativ lässt sich auch ein Verfahren namens "Spatial Multiplexing" nutzen. Mit Spatial Multiplexing werden mehrere Datenströme zeitgleich versandt. Sie benutzen dabei den selben Kanal (Frequenz), werden aber über unterschiedliche Antennen verbreitet. Der Empfänger kann dadurch räumliche Informationen gewinnen und besitzt zudem die Möglichkeit Mehrfachreflexionen kompensieren zu können. Der Nachteil der fehlenden Sichtverbindung wird hierbei aufgehoben. Auftretende Mehrfachreflexion innerhalb von Gebäuden können somit genutzt werden.

Positiv wirkt sich dies auf die Übertragungsrate aus, welche in Abhängigkeit der Anzahl verwendeten Send- und Empfangsantenne – unter optimalen Bedingungen – verdoppelt werden kann [16, 18].



**Abbildung 2: 4x4 MIMO mit Spatial Multiplexing**

## 7. DUPLEXING

Unter dem Begriff Duplexing, auch Multiplexverfahren genannt, vereint man Verfahren zur Regelung des Verhaltens des Up- und Downlinks drahtloser Zwei-Wege-Kommunikation. Die zwei Verfahren, die es hier zu nennen gilt, sind: Frequency Division Duplex (FDD) – hierbei ist wiederum zwischen full duplex FDD und half duplex FDD zu unterscheiden – und Time Division Duplex (TDD). Relevant für die Unterscheidung der beiden Verfahren ist vor allem das Frequenzspektrum auf dem sie arbeiten. Sowohl full duplex FDD, als auch half duplex FDD arbeiten auf einem "gepaarten Spektrum". Beide Verfahren nutzen somit zwei separate Frequenzbereiche für Down- und Uplink. Während jedoch full duplex FDD parallel auf beiden Frequenzen arbeitet, teilt half duplex FDD den beiden Signalen nicht überlappende Zeit-Slots zu, in welchen gesendet bzw. empfangen wird.

Ebenso wie half duplex FDD, teilt TDD für den Up- und Downlink verschiedene Zeit-Slots zu, innerhalb welcher gesendet bzw. empfangen wird. Der Unterschied liegt darin, dass TDD einen gemeinsamen Frequenzbereich für Up- wie Downlink nutzt. TDD verwendet somit ein "ungepaartes Spektrum". Problematisch ist hierbei die Tatsache, dass die Höchstgeschwindigkeit für Up- und Downlink im Gegensatz zu FDD nie gleichzeitig erreicht werden kann [15].

Die WiMAX Spezifikation [20] sieht den Einsatz beider Duplexing-Verfahren vor. Es hat sich jedoch in der Praxis gezeigt, dass TDD deutlich populärer unter den Providern ist [13].

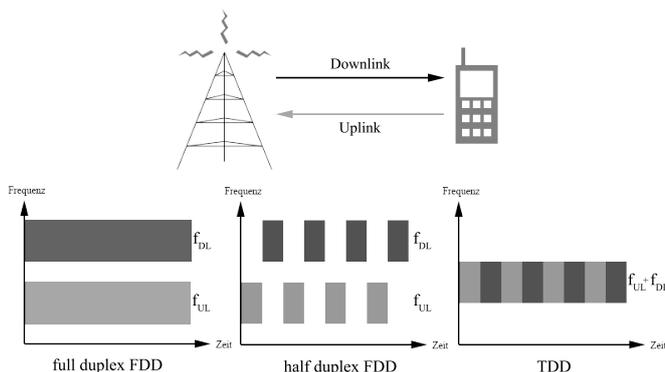


Abbildung 3: frequency- and time-division duplex

## 8. FREQUENZBEREICHE

Einen Vorteil seiner Technik trägt WiMAX bereits im Namen: Worldwide. Durch die Nutzung der Frequenzbereiche zwischen 2 und 11 GHz ist WiMAX prinzipiell weltweit nutzbar. Problematisch ist jedoch die eventuell vorhandene staatliche Regulierung und ein damit verbundenes Frequenz-Zuteilungsverfahren in den unterschiedlichen Regionen der Welt.

In Deutschland wurden die Frequenzen im Bereich zwischen 3,4 GHz und 3,6 GHz aufgrund des zunächst starken Interesses mit zehnmonatiger Verspätung im Dezember 2006 durch die Bundesnetzagentur für 56 Millionen Euro versteigert [4]. Dies stellt jedoch nur einen Bruchteil der Summe, die durch die Vergabe der UMTS-Lizenzen im Jahre 2000 erzielt wurde, dar. Mit der Ersteigerung der neuen Frequenzen gingen die drei Lizenznehmer [7] die Verpflichtung

Region	Frequenzbereiche
Europa	3,5 GHz / 5,8 GHz
Russland	3,5 GHz / 5,8 GHz
Mittlere Osten	3,5 GHz / 5,8 GHz
Afrika	3,5 GHz / 5,8 GHz
Asien/Pazifik	2,3 GHz / 2,5 GHz / 3,3 GHz / 3,5 GHz / 5,8 GHz
Kanada	2,3 GHz / 2,5 GHz / 3,5 GHz / 5,8 GHz
USA	2,5 GHz / 5,8 GHz
Mittel-/Südamerika	2,5 GHz / 3,5 GHz / 5,8 GHz

Tabelle 3: Verfügbare Frequenzbereiche

Quelle: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0904211.htm>

ein, bis Ende 2009 15 Prozent, bis Ende 2011 25 Prozent und bis 2014 sogar 75 Prozent der deutschen Haushalte mit Breitband-Internet zu versorgen [3, 4]. Der deutsche Frequenzbereich, für ein in der Zukunft mögliches Deployment von fixed WiMAX sollte damit festgelegt sein. Im Dezember 2009 kündigte die Bundesnetzagentur an, neben anderen, zusätzlich die Frequenzen im Bereich zwischen 790 MHz und 862 MHz versteigern zu wollen. Im Volksmund als "Digitale Dividende" bezeichnet, wurden diese Frequenzen im Zuge der Umstellung von analogem auf digitales Fernsehen wieder frei. Sie gelten als besonders geeignet für Übertragungen über weite Distanzen. Dies spiegelt auch die Tatsache wider, dass vor Ende der Auktion bereits im April 2010 abzusehen war, dass diese Frequenzbereiche den größten Teil der Auktionserlösen ausmachen werden. Die Bundesregierung erhofft sich durch die Versteigerung "die Versorgung der Bevölkerung mit breitbandigen Internetanschlüssen, insbesondere in ländlichen Gebieten" [5] beschleunigen zu können. Hierbei wird der Konflikt zwischen fixed und mobile WiMAX ersichtlich. War zunächst ausschließlich fixed WiMAX für die Versorgung dieser ländlichen Gebiete angedacht, so dringt die Revision e des WiMAX Standards nun auch in dieses Einsatzgebiet vor.

## 9. DIE PRAXIS

Ursprünglich trat WiMAX an den Start um entlegene Regionen mit Breitband-Internetanschlüssen zu versorgen. Die Überbrückung "der letzten Meile" – in Deutschland ein Monopol der Deutschen Telekom, welches den Anschluss von Verbrauchern an das Festnetz bezeichnet – war dabei das ausgegebene Ziel. Einen Vorteil stellt hierbei die Möglichkeit, WiMAX Sendeantennen (Basisstationen) als Kette zu installieren und somit mehrere Kilometer überbrücken zu können, dar. Somit kann der typische Zellenradius, der normalerweise nur einige Kilometer beträgt, um ein Vielfaches vergrößert werden. Eine verhältnismäßig starke Lobby treibt ihre Forschung und damit verbundene Entwicklungen immer weiter voran. Intel beispielsweise produziert bereits Chipsätze für mobile Endgeräte und ermöglicht somit bereits Internet der vierten Generation (4G). Wohingegen bei dem großen Konkurrenz-Standard Long-Term-Evolution (LTE) erst zwischen 2010 und 2012 mit einer kommerziellen Nutzung zu rechnen ist [18]. Tatsächlich wurden mit Beginn des Jahres 2010 erste LTE-fähige Geräte auf den Markt

gebracht. Einige Jahre nach den ersten WiMAX-fähigen Endgeräten. Trotz des zeitlichen Vorsprungs und der starken Lobby hinter WiMAX, steht die Technologie in der Praxis vor einigen Problemen.

## 9.1 Ein Standard der mit sich selbst konkurriert

Zwar waren die beiden Standards IEEE 802.16d und IEEE 802.16e zunächst für unterschiedliche Szenarien gedacht, jedoch zeigt sich vermehrt ein nachvollziehbares Interesse die beiden Standards vereinen zu wollen. Dies gestaltet sich jedoch problematisch. Während bei mobile WiMAX die Subträgeranzahl mit der zur Verfügung stehenden Bandbreite variiert, nutzt fixed WiMAX stets 256 Subträger. Aufgrund der unterschiedlichen Zugangsverfahren derer sich die beiden Standards bedienen, sowie dem Zwang einer Sichtverbindung in der Revision d des WiMAX Standards, ist eine Kompatibilität von fixed und mobile WiMAX somit leider nicht gegeben. Auch der Handover einer Verbindung, eines sich bewegenden mobilen Endgerätes, zwischen zwei Funkzellen wird vom IEEE 802.16d Standard nicht unterstützt [18]. Für Provider fällt die Entscheidung zugunsten eines Standards schwer. Sie möchten möglichst beide Vorteile aus der Technologie mitnehmen: die Möglichkeit ihren Kunden WiMAX als DSL-Ersatz anbieten zu können, bei gleichzeitiger Bedienung des Marktes für mobile Endgeräte. Potenzielle Anbieter von WiMAX werden jedoch gezwungen, sich für einen Standard entscheiden zu müssen bzw. beide parallel anbieten zu müssen. Dies stellt leider einen großen Nachteil der Technologie dar.

## 9.2 WiMAX als Ersatztechnologie

Durch den mittlerweile bereits weit voran geschrittenen Ausbau Netzes der Deutschen Telekom, welcher auch weiterhin stark voran getrieben wird [2], ist diese in der Lage mehr und mehr Haushalte mit DSL zu versorgen. Es existieren momentan nur wenige kommerziell genutzte WiMAX Netze in Deutschland. Diese werden größtenteils zusätzlich auch weiterhin zu Testzwecken genutzt. Durch die mittlerweile sehr ausgedehnte Time-to-Market stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit von WiMAX als Ersatztechnologie somit immer mehr. Erschwerend für Lizenznehmer kommt die in Abschnitt 8 genannte Lizenzverpflichtung hinzu. Die Regierung wünscht sich möglichst viele regionale Haushalte an das Breitband-Internet anschließen zu können und legt daher den Fokus auf dünn-besiedelte Gebiete. Für WiMAX-Anbieter stellt dies ein Problem dar. Eine priorisierte Anbindung von kleinen Gemeinden bedeutet für sie in erster Linie, eine geringe Zahl an Kunden. Somit stellt sich für viele Unternehmen die Frage der Rentabilität eines solchen Projekts.

Gerade auch aufgrund der Tatsache, dass unter den Anbietern große Unklarheiten bezüglich der von ihnen zu praktizierenden Geschäftsmodelle herrscht. Nach dem sich einstellenden Misserfolg der WLAN-HotSpots herrscht große Verunsicherung. Der umständliche Anmeldeprozess und der damit verbundene Umstand sich mit einer Kennung nicht in beliebigen Netzwerken anmelden zu können, wurden von vielen potentiellen Kunden abgelehnt. Ein ähnliches Problem könnte WiMAX drohen.

## 9.3 LTE

Natürlich steht der WiMAX-Standard nicht alleine auf dem Spielfeld des Breitband-Internets per Funk. Neben ihm existiert ein weiterer Standard, der die selben Ziele wie auch WiMAX verfolgt: LTE – kurz für Long Term Evolution. LTE ist ein von dem 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [1] voran getriebener Standard. Das 3GPP ist auch für die Standardisierung und Weiterentwicklung von GSM und seiner Nachfolgetechnologien verantwortlich. LTE wurde im Dezember 2008 festgesetzt [8].

LTE weist viele Gemeinsamkeiten mit WiMAX auf. So ist LTE ein Standard, der ebenfalls die Eigenschaft einer hohen Spitzen-Datenrate von bis zu 108 MBit/s bietet. Die hierfür verwendeten Zugangsverfahren OFDM und OFDMA (siehe Abschnitt 5) finden sich in beiden Standards wieder. Weiter verwenden beide Standards die Modulationsverfahren QPSK und QAM. Mit 1.4 bis 20 MHz weist LTE annähernd genau den gleichen Bandbreitenbereich wie WiMAX auf. Diese Ähnlichkeit besitzen auch die Frequenzbreiten der Subträger die bei WiMAX mit 10.94kHz und bei LTE mit 15 kHz angegeben werden [8].

Es existieren jedoch auch Unterschiede. So sieht beispielsweise LTE, aufgrund der begrenzten Antennengröße mobiler Geräte, für den Uplink kein MIMO-Verfahren vor. Während der Standard von WiMAX jedoch eine vereinfachte Form, die Single-User-MIMO (SU-MIMO) Technik spezifiziert, unterstützt LTE hingegen theoretisch die Weiterentwicklung Multi-User-MIMO (MU-MIMO), welche in der Lage ist, den oben genannten Nachteil auszugleichen. Der wichtigste Unterschied ist die unterschiedliche Verwendung von Multiplexverfahren. WiMAX unterstützt zwar sowohl FDD als auch TDD, jedoch findet in der Praxis bei WiMAX-Providern fast ausschließlich TDD Verwendung [6]. LTE hingegen bedient sich FDD.

Trotz der teilweise existierenden Überschneidungen in einigen Bereichen, reichen die Unterschiede der beiden Standards um WiMAX und LTE nicht zu einem gemeinsamen Standard vereinen zu können.

Da LTE ein Standard der 3GPP ist, besitzt er WiMAX gegenüber einen entscheidenden Vorteil: Als Standard, der einer Release-Reihe von Standards aufbauend auf GSM entspringt, ist LTE rückwärtskompatibel zu bereits implementierten Standards, wie z.B. HSPA. LTE sieht sowohl die Möglichkeit eines Deployments als Stand-Alone-Lösung vor, als auch – und dies ist mit Sicherheit für viele Anbieter die interessanter Variante – als in den GSM Standard integrierte Lösung. Ein Fallback auf HSPA oder geringer in "LTE-Funklöchern" stellt somit kein Problem dar. WiMAX sieht eine solche Möglichkeit aktuell nicht vor.

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Als neuer Standard mit hoher Datentransferrate, sowie einer hohen Reichweite sollte WiMAX ideal für heutige Anforderungen gewappnet sein. Nicht nur die Möglichkeit der Überbrückung "der letzten Meile" die WiMAX bietet, sondern auch ein großes Forum mit aktuell mehr als 360 Mitgliedern (Stand: April 2010) [14] stellen einen großen Vorteil des Standards dar. Die anfängliche Idee zwei verwandte Standards für zwei unterschiedliche Einsatzszenarien zu entwickeln, entpuppt sich jedoch mittlerweile als eine Art Blockade für den weltweit kommerziellen Einsatz von WiMAX. Die bereits existierenden Lösungen des IEEE 802.15d Standards ermöglichen mobilen Endgeräten keine Nutzung der vorhan-

	LTE	802.16d	802.16e
Zugangsverf. (UL)	OFDM	OFDM	OFDM
Zugangsverf. (DL)	OFDMA	OFDMA	SOFDMA
Sichtverbindung	NLoS	LoS	NLoS
Bandbreite (in MHz)	1,4, 3, 5, 10, 15, 20	1,5 - 20	1,5 - 20
Subträgerbreite	15 kHz	10,94 kHz	10,94 kHz
Subträgeranzahl	variabel	256	variabel
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Duplexing	FDD	TDD, FDD	TDD, FDD

**Tabelle 4: Vergleich WiMAX - LTE**

denen Netze. Gerade Nutzer mobiler Endgeräte stellen für Provider jedoch ein weiter wachsendes Geschäftsfeld dar. Unterschiedlich verfügbare bzw. genutzte Frequenzbereiche und damit verbundene fehlende internationale Kooperation zur Durchsetzung eines Standards, sind ein weiterer Grund für die Behinderung des WiMAX Standards. Eine fehlende internationale Marschrichtung der nationalen als auch internationalen Konkurrenz macht die Entscheidung zugunsten WiMAX für potentielle Provider um ein Vielfaches schwieriger. Nur wenn sie sicher sein können, dass die Konkurrenz auf die selbe Technologie setzt, rentieren sich Investitionen. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass eine zu geringe Marktdurchdringung des Standards Verbraucher verunsichern oder gar verschrecken könnte. Andererseits könnte die Refinanzierung der Investitionen der Provider gefährdet sein, sollten ihre Kunden nicht die Möglichkeit besitzen auch im Ausland mobile Datenübertragung per WiMAX nutzen zu können. Da Roaming-Gebühren eine wichtige Einnahmequelle für Mobilfunk-Provider darstellen, sind diese Einnahmen für die Refinanzierung unerlässlich. Selbiges gilt auch für Produzenten von WiMAX-Hardware für Endgeräte, wie Intel. Diese sind bereits in der Lage WiMAX-fähige Hardware zu produzieren und wären somit theoretisch ebenso in der Lage die Nachfrage nach WiMAX künstlich zu steigern indem entsprechende Hardware verbaut wird. Das Risiko, herauszufinden ob Kunden bereit sind einen Mehrpreis für bislang "unnütze" Bauteile zu zahlen, wollen sie jedoch nicht tragen. Den, durch eine früherer Festsetzung des Standards gegebenen zeitlichen Vorsprung gegenüber LTE, scheint WiMAX nicht optimal zu nutzen. Zwar gibt es im Gegensatz zu LTE bereits funktionstüchtige, kommerziell genutzte Netze, so beispielsweise Teile des Netzes des Mobilfunkanbieters Sprint in den USA [18], jedoch scheint sich aufgrund der Tatsache, dass LTE in einem früheren Teststadium bereits ähnlich gute bzw. bessere Ergebnisse im Bereich der Übertragungsgeschwindigkeiten erzielen konnte, der Markt in Richtung LTE zu kippen. Die Eigenschaft der Rückwärtskompatibilität von LTE tut ihr übriges. Seit jedoch der Netzwerkausrüster Cisco im März 2010 bekannt gab, sich aus der Entwicklung von WiMAX-Basisstationen zurückzuziehen, scheint die Entscheidung zugunsten LTE's gefallen zu sein. Wie bei jedem Kampf zweier zukunftssträchtiger Standards, ist es eher unwahrscheinlich, dass beide in Koexistenz überleben werden. Eine Niederlage des WiMAX Standards ist nicht ausgeschlossen und wird durch neueste Entscheidungen des Marktes immer wahrscheinlicher.

## 11. LITERATUR

- [1] About 3GPP. <http://www.3gpp.org/About-3GPP>.
- [2] Breitband DSL: Telekom investiert 10 Milliarden Euro. <http://www.areamobile.de/news/14623-breitband-dsl-telekom-investiert-10-milliarden-euro>.
- [3] Cebit: Deutschland setzt auf Breitband. <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2009/03/2009-03-02-bk-cebit-eroeffnung.html>.
- [4] Drei neue bundesweite Breitband-Dienstleister. <http://bwa-versteigerung.bundesnetzagentur.de/images/pressemitteilungen/06-12-15>
- [5] Eckpunkte der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn für die Vergabe von Frequenzen im Bereich von 790 MHz bis 862 MHz für den drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten. <http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/15746.pdf>.
- [6] FDD/TDD: WiMAX and LTE Crossing Paths? <http://www.wimax.com/commentary/blog/blog-2009/october-2009/fdd-tdd-wimax-and-lte-crossing-paths-1015>.
- [7] IEEE 802.16 / WiMAX. <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0904211.htm>.
- [8] LTE. <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [9] OFDM Parameters in WiMAX (Cont). <http://www.wimax.com>.
- [10] OFDMA (orthogonal frequency division multiplexing access). <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/orthogonal-frequency-division-multiplexing-access-OFDMA.html>.
- [11] Quadratur-Phasenumtastung. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Quadratur-Phasenumtastung-QPSK-quadrature-phase-shift-keying.html>.
- [12] Quadraturamplitudenmodulation. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Quadraturamplitudenmodulation-QAM-quadrature-amplitude-modulation.html>.
- [13] What is IEEE 802.16d? <http://www.wimax.com/education/faq/faq44>.
- [14] WiMAX Forum - Member Roster. <http://www.wimaxforum.org/about/member-roster>.
- [15] E. Dahlmann, S. Parkvall, J. Sköld, and P. Beming. *3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd., Burlington, USA, 2008.
- [16] M. Riegel, D. Kroeselberg, and A. Chindapol. *Deploying Mobile WiMAX*. Wiley, Chichester, UK, 2009.
- [17] P. D.-I. D. Rudolph. Digitale und Analoge Modulationsverfahren. Technical report, Technische Fachhochschule Berlin, 2005/2006.
- [18] M. Sauter. *Beyond 3G - Bringing networks, terminals and the web together*. Wiley, Chichester, UK, 2009.
- [19] K. Steudler. Übertragungstechnik - Modulation. Technical report, Hochschule für Technik und Architektur Bern, 2003.
- [20] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*, May 2009.