

Hybride Internetanbindung für unterversorgte Regionen mittels DVB-T-Vorwärts- und WLAN-Retourkanaltechnologie

Masterarbeit

von

Markus Lenzhofer

Institut für Breitbandkommunikation
Technische Universität Graz



Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Erich Leitgeb
Betreuer: Dipl.-Ing. Peter Schrotter / Dipl.-Ing. Peter Mandl

Graz, im Dezember 2009

Kurzfassung

In der heutigen Zeit gehört der Zugang zum Internet ebenso zum Grundbedürfnis des Menschen wie beispielsweise die klassische Telefonie. Da eine Versorgung über Breitbandanschlüsse wie Digital Subscriber Line (DSL), Kabel TV (DOCSIS) oder den Mobilfunkstandard Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) nicht überall verfügbar ist, bedarf es zusätzlicher Technologien, um eine Grundversorgung auch in so genannten unterversorgten Regionen zu ermöglichen.

Mit dem Digital Video Broadcasting - Terrestrial Standard (DVB-T) als Vorwärtskanaltechnologie existiert ein terrestrisches System, um neben Fernseh- und Radioinhalten auch einen Zugang zum Internet zu schaffen. Dabei kann ein DVB-T-Sender ein großes Versorgungsgebiet abdecken und der Empfang ist trotz leichter Abschattungen möglich. Für den Retourkanal steht mit Wireless Local Area Network (WLAN) eine günstige und mittlerweile weitverbreitete Technologie zur Verfügung, welche die Daten im lizenzfreien Band überträgt. Die Kombination beider Technologien stellt eine alternative Internetzugangsmethode dar, die breitbandige Internetanwendungen auch in ländlichen Regionen möglich macht.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde die an der TU Graz vorhandene DVB-T-Infrastruktur um die Möglichkeit erweitert, auch Internet Protocol (IP) basierte Dienste wie beispielsweise Hypertext Transfer Protocol (HTTP) oder E-Mail übertragen zu können. Um eine solche hybride Internetanbindung auf ihre praktische Eignung zu evaluieren, wurde außerdem ein Testaufbau bestehend aus DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal aufgebaut und Messungen der erzielbaren Verbindungsqualität für verschiedene Anwendungen durchgeführt. Durch die notwendige Einkapselung der IP-Datenpakete in einen MPEG-2-Transportstrom zur Aussendung über den DVB-T-Broadcastkanal entstehen zusätzliche Verzögerungen, die gerade bei latenzzeitkritischen Anwendungen wie Voice over IP (VoIP) problematisch sein können. Ziel der Messungen ist es, Aussagen über die Eignung der verwendeten Technologien für nicht-zeitkritische Anwendungen wie HTTP, aber auch für Echtzeitanwendungen wie VoIP zu treffen.

Abstract

Nowadays access to the Internet is as important as using the telephone. Broadband connection technologies like Digital Subscriber Line (DSL), Cable TV (DOCSIS) or Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) are not available everywhere. Thus alternative technologies are needed to enable broadband services also in rural areas.

The terrestrial Digital Video Broadcasting standard (DVB-T) not only allows the distribution of television and radio programs, but can also provide access to the Internet. With only one transmitter large areas can be served and reception is possible even if slight shadowing is present. Wireless Local Area Network (WLAN) which is a technology that is cheap and widespread by now, can act as the necessary return channel. Data are transmitted in license-free frequency bands. The combination of these two technologies is an alternative method to serve rural areas with broadband Internet access.

Within the scope of this master thesis the existing DVB-T infrastructure at Graz University of Technology was extended to allow for the provisioning of Internet Protocol (IP) based services like Hypertext Transfer Protocol (HTTP) or e-mail. To evaluate such a hybrid internet access network regarding the practical suitability, a test setup was established with DVB-T as the downlink and WLAN as the uplink technology. Furthermore, measurements were conducted to evaluate the link quality for different applications. In order to transmit the IP data packets over the DVB-T broadcast channel, it is necessary to encapsulate them into a MPEG-2 transport stream. This introduces additional delays that can lead to problems, especially when applications which are sensitive to latency, such as Voice over IP (VoIP), are considered. The results of the measurements should finally be used for the evaluation of the suitability of the proposed technologies for non-time-sensitive applications like HTTP, but also for time-sensitive applications like VoIP.

Danksagung

Zuerst möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr. Erich Leitgeb für die Begutachtung und Betreuung der vorliegenden Masterarbeit bedanken. Ohne seinen Einsatz wäre die Durchführung des praktischen Teils dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Weiters möchte ich mich bei meinen Mitbetreuern Dipl.-Ing. Peter Schrotter und Dipl.-Ing. Peter Mandl bedanken, die mir die Möglichkeit gaben, an einem interessanten und praxisnahen Thema arbeiten zu können. Ebenso bedanke ich mich bei Patrick Romano für die Einführung in das Studioequipment im SatNex-Labor. Bei Problemen mit dem DVB-T-Forschungssender stand er stets hilfsbereit zur Verfügung. Für eine gemeinsame und schöne Studienzeit danke ich meinem Freund Paul, der bei studienbezogenen Fragen aber auch sonst immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Großer persönlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir eine schöne und sorgenfreie Studienzeit ermöglicht haben. Auch meinen Geschwistern Andreas und Manuela danke ich für ihre Unterstützung.

Last but not least gebührt jedoch der größte Dank meiner Freundin Melanie, nicht nur für die ausgezeichnete Korrektur dieser Arbeit, sondern auch für ihre umfassende Unterstützung in guten und schlechten Zeiten während meines Studiums.

Graz, im Dezember 2009

Markus Lenzhofer

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

Markus Lenzhofer, Bakk. techn.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Motivation	3
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Gliederung	5
2 Grundlagen	7
2.1 Digital Video Broadcasting - Terrestrial	7
2.1.1 Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (COFDM)	8
2.1.2 Verfügbare Nutzdatenraten	8
2.1.3 Der MPEG-2-Transportstrom	9
2.1.4 IP über DVB	11
2.2 Wireless Local Area Network (WLAN)	13
2.2.1 WLAN-Standards	13
2.2.2 Topologie	16
2.2.3 Vergleich von 802.11g und 802.11a für Richtfunkstrecken	18
3 Versuchsaufbau im Labor	20
3.1 Grundsätzliche Funktionsweise	20
3.2 Genauere Beschreibung der Netzwerktopologie	21
3.3 Komponenten und deren Konfiguration	23
3.3.1 IP/DVB-Gateway	23
3.3.2 Retourkanal-Router	24
3.3.3 Internet-Gateway	25
3.3.4 DVB-T-Modulator	25
3.3.5 Client mit DVB-T-Set-Top-Box	25
3.4 Erster Funktionstest	27
3.5 Erweiterung des Retourkanals um WLAN	28
4 Messungen der erzielbaren Verbindungsqualität im Labor	31
4.1 Grundlegendes zu den Messungen	31
4.1.1 Messwerkzeug	31

4.1.2	Messparameter	32
4.2	Verzögerungszeit (Round Trip Time)	33
4.2.1	Messung der RTT für den hybriden Aufbau	33
4.2.2	Anteil der durch DVB-T verursachten zusätzlichen Verzögerung	34
4.3	Maximale Durchsatzraten	35
4.3.1	UDP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals	35
4.3.2	UDP-Durchsatz des WLAN-Retourkanals	36
4.3.3	TCP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals	36
4.3.4	TCP-Durchsatz des WLAN-Retourkanals	38
5	Messungen der erzielbaren Verbindungsqualität im Freifeld	40
5.1	Versuchsaufbau im Freifeld	40
5.1.1	Berechnung des Link Budgets für den WLAN-Retourkanal	41
5.1.2	Verwendete Strahlungsleistungen	43
5.1.3	Verzögerungszeit (Round Trip Time)	44
5.2	Eigenschaften des DVB-T-Vorwärtskanals	45
5.2.1	Jitter	45
5.2.2	Maximale Durchsatzraten	48
5.2.3	Zusammenfassung der erzielbaren Verbindungsqualität mit DVB-T	51
5.3	Eigenschaften des WLAN-Retourkanals	52
5.3.1	Jitter	52
5.3.2	Maximale Durchsatzraten	54
5.3.3	Zusammenfassung der erzielbaren Verbindungsqualität mit WLAN	56
5.4	Testen verschiedener Applikationen	57
5.4.1	Browsen im Web	57
5.4.2	File Transfer Protocol (FTP)	58
5.4.3	Video-Streaming	60
5.4.4	Virtual Private Network (VPN)	62
5.4.5	Voice over IP (VoIP)	63
6	Zusammenfassung und Ausblick	67
	Literaturverzeichnis	70
	Tabellenverzeichnis	73
	Abbildungsverzeichnis	74
A	Weitere Messergebnisse	76
A.1	Jittermesswerte für G.711 im DVB-T-Vorwärtskanal	76
A.2	Jittermesswerte für G.711 im WLAN-Retourkanal	78
A.3	TCP-Durchsatz einer WLAN-Richtfunkstrecke im 5-GHz-Frequenzbereich	79
B	Datenblätter	81

1 Einleitung

Das einleitende Kapitel beginnt mit einer kurzen Erläuterung der Motivation sowie der Zielsetzung der Masterarbeit. Dort findet sich auch ein Vorschlag für eine Architektur einer hybriden Internetanbindung. Das abschließende Unterkapitel zur Gliederung erlaubt einen Überblick über die Hauptinhalte der vorliegenden Masterarbeit.

1.1 Motivation

Die Versorgung ländlicher Regionen mit Breitbandinternetzugang ist immer noch eine Wunschvorstellung. Das Internet als Informationsquelle und Unterhaltungsmedium gewinnt jedoch immer mehr an Bedeutung und macht damit den Ausbau von Breitbandinternet auch in unterversorgten Gebieten notwendig.

Eine Versorgung über Digital Subscriber Line (DSL) ist aufgrund von Kabeldämpfungen, aber auch durch den teilweise sehr schlechten Zustand einiger Kupferkabelinstallationen nur auf wenige Kilometer Entfernung zur Ortsvermittlungsstelle beschränkt. Die für einen Breitbandinternetzugang benötigten Datenraten können oftmals nicht bereitgestellt werden. Der Ausbau durch Glasfaserkabel ist sehr kostenintensiv und bleibt wohl für schwer zugängliche und dünn besiedelte Regionen eine nicht realisierbare Breitbandinternetzugangsmöglichkeit.

Eine Alternative zu leitungsgebundenen Technologien zur Herstellung einer Internetanbindung stellen daher Funkssysteme dar. Mit DVB-T existiert eine bereits über mehrere Jahre erprobte Technologie, die es ermöglicht, neben Fernseh- und Radioinhalten auch einen Zugang zum Internet zu schaffen. Der DVB-T-Standard ermöglicht dabei Übertragungsraten von mehreren MBit/s. Besonders günstig erweisen sich die von DVB-T zur Übertragung genutzten Sendefrequenzen im lizenzierten UHF-Frequenzband. Diese relativ niedrigen Frequenzen verbunden mit den hohen Sendeleistungen ermöglichen die Versorgung großer Gebiete durch einen einzigen Sender. Funkssysteme im GHz-Frequenzbereich wie beispielsweise Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) (2,1 GHz) bieten im Vergleich dazu geringere Reichweiten, was eine Flächenversorgung nur mit mehreren Sendern und damit wesentlich höhere Kosten bedeutet. Die bessere Durchdringung der Signale von Gebäuden und damit die Möglichkeit des Indoor-Empfangs spricht für die Verwendung niedrigerer Frequenzen. Ein Empfang ist ebenso trotz leichter Abschattungen möglich. Weiters sind keine Störungen zu erwarten, da in einem exklusivem Band gesendet wird.

Protokolle wie Multi Protocol Encapsulation (MPE), welches bereits bei Internetzugängen über Satellit eingesetzt wird, oder dessen Nachfolgeprotokoll Ultralightweight Encapsulation (ULE) zur Einkapselung von Datenpaketen in einen MPEG-2-Transportstrom zur Aussendung über DVB-T machen die Verwendung dieser Technologie als alternative Internetzugangsmethode überhaupt erst möglich.

Da es sich bei DVB-T um eine Broadcast-Technologie handelt, bedarf es jedoch zusätzlich der Verwendung einer Retourkanaltechnologie, um ein bidirektionales Übertragungssystem zu erhalten, welches das Internet naturgemäß voraussetzt. Als eine mögliche Retourkanaltechnologie drängt sich mit WLAN ein System auf, dessen Verbreitung in den letzten Jahren rasant zugenommen hat. Zum Betrieb von WLAN im Outdoor-Bereich ist keine Sendelizenz notwendig, da in den lizenzfreien Bändern um 2,4 GHz bzw. 5 GHz gesendet wird. Trotz geringer Sendeleistungen sind mittlere Reichweiten auch ohne Richtantennen möglich. Zur Überbrückung größerer Entfernungen (mehrere Kilometer) eignet sich die Verwendung von 5-GHz-Komponenten in Verbindung mit stark bündelnden Richtfunkantennen besonders gut (unter anderem sind höhere Strahlungsleistungen erlaubt und es ergibt sich eine kleinere Fresnelzone gegenüber 2,4-GHz-Komponenten, siehe Kapitel 2.2.3). Günstige Preise für Komponenten, welche von zahlreichen Herstellern angeboten werden, machen den Einsatz von WLAN als Retourkanaltechnologie ebenso attraktiv.

1.2 Zielsetzung

Abbildung 1.1 zeigt einen Architekturvorschlag (vereinfacht für einen Benutzer) einer hybriden Internetanbindung mit DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal. In der Region auf Bezirksebene befindet sich das Kernelement mit Internetanbindung, Router, IP/DVB-Gateway, DVB-T-Sender und Sendeantenne. Die Benutzer benötigen zum Empfang der Daten im Vorwärtskanal (Downlink) einen PC oder Laptop mit entsprechendem DVB-T-Datenempfänger (USB-Stick oder externes Gerät). Die Anfragen der Benutzer werden über eine eingebaute WLAN-Karte oder einen WLAN-Access-Point im Retourkanal (Uplink) gesendet. Je nach Entfernung und Empfangsbedingungen kann die Strecke zum lokalen Relaisknoten (Gemeindeebene) ungerichtet erfolgen. Von dort aus werden die Datenpakete wieder über einen WLAN-Access-Point und eine Richtantenne (Parabolantenne) an den weiter entfernten Bezirksknoten zurückgesendet. Dieser leitet Anfragen ins Internet weiter und retourniert die Antworten mittels DVB-T wiederum an den anfragenden Benutzer. Das vorgeschlagene System kann von regionalen (Bezirksebene) und lokalen Betreibern (Gemeinden, IT-Betriebe) für die Endnutzer zur Verfügung gestellt werden.

Ziel der Masterarbeit ist es, eine hybride Internetanbindung mit DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal aufzubauen und anhand von Messungen Aussagen über die Eignung der Technologien für verschiedene Anwendungen zu treffen. Zunächst liefert ein Versuchsaufbau im Labor Referenzwerte für einen anschließenden Freifeldaufbau. Außerdem ermöglicht das Testen im Labor eventuelle Einschränkungen der verwendeten Kom-

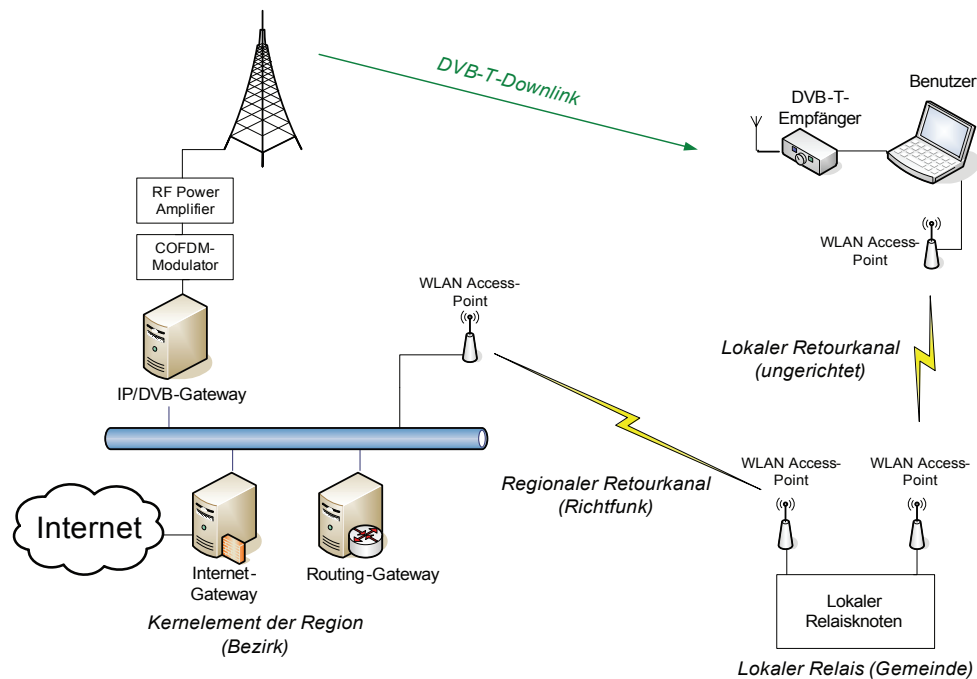


Abbildung 1.1: Architektur der hybriden Internetanbindung mit DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal

ponenten bereits im Vorfeld abzuschätzen. Der Aufbau erfolgt dabei in Anlehnung an die in Abbildung 1.1 gezeigte Architektur. Der Freifeldaufbau ermöglicht schließlich zwei Benutzern das Testen verschiedener Anwendungen unter realen Bedingungen.

1.3 Gliederung

Nach einer kurzen Einleitung werden in **Kapitel 2** jene Grundlagen zu den verwendeten Technologien behandelt, welche für den Aufbau des hybriden Systems sowie für die durchgeführten Messungen von Bedeutung sind.

In **Kapitel 3** wird zunächst der Versuchsaufbau im Labor sowie die Funktionsweise im Allgemeinen erläutert. Es folgt eine genauere Beschreibung der Netzwerktopologie und der dabei verwendeten Komponenten.

Kapitel 4 beschreibt Messungen zur Beurteilung der erzielbaren Verbindungsqualität im Labor. Diese Messungen dienen einerseits dazu, mögliche Fehler im Aufbau zu beheben und andererseits, um Beschränkungen der eingesetzten Komponenten bereits im Vorfeld zu detektieren. Ein erfolgreicher Aufbau im Labor sowie die Durchführung erster Tests sind ebenso wichtig für den anschließenden Freifeldaufbau.

Außerdem erfolgt in diesem Kapitel die Beschreibung des eingesetzten Messverfahrens sowie eine kurze Beschreibung der Parameter, welche messtechnisch relevant sind und erfasst werden.

Um Einflüsse sowie Verluste, welche unter realen Bedingungen auftreten, zu berücksichtigen, wurde ebenfalls ein realer Freifeldaufbau sowie Messungen im Freifeld durchgeführt. Die Beschreibung des Versuchsaufbaus im Freifeld, der Messungen und deren Ergebnisse erfolgt in **Kapitel 5**. Das Testen verschiedener Applikationen anhand des Freifeldaufbaus rundet dieses Kapitel ab.

Eine Diskussion der durch die Messungen erhaltenen Ergebnisse sowie ein Ausblick auf weitere Entwicklungen werden in **Kapitel 6** angeführt und bilden den Abschluss dieser Arbeit.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden jene Grundlagen, welche für das Verständnis der Funktionsweise der hybriden Internetanbindung notwendig sind, erläutert. Der erste Teil widmet sich dem terrestrischen Digital Video Broadcasting Standard (DVB-T). Der zweite Teil beschäftigt sich mit den wichtigsten Aspekten zu Wireless Local Area Network (WLAN).

2.1 Digital Video Broadcasting - Terrestrial

Digital Video Broadcasting (DVB) bezeichnet den Standard für die digitale Fernsehübertragung. Dabei stellt DVB-T die terrestrische (erdgebundene) Variante zur Verbreitung von Radio-, Fernseh- aber auch Dateninhalten dar. Mit Hilfe von Dach- bzw. Zimmerantennen können die ausgestrahlten digitalen Signale empfangen werden. Die zur Übertragung genutzten Frequenzen liegen im VHF-Bereich, hauptsächlich jedoch im UHF-Bereich mit Kanalbandbreiten von 6, 7 oder 8 MHz. Im VHF-Bereich stehen dem Rundfunk und Fernsehen die Frequenzen von 174 MHz bis 230 MHz (Kanäle 5 bis 12), im UHF-Bereich von 470 MHz bis 862 MHz (Kanäle 21 bis 69) zur Verfügung. Die Frequenzen zwischen 790 MHz und 862 MHz (Kanäle 61 bis 69) sollen bald versteigert werden. Unter anderem ist die Mobilfunkbranche an den frei werdenden Frequenzen interessiert [Dig09].

Als Modulationsart wird Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (COFDM) genutzt, ein Multiträgerverfahren, welches Störeinflüsse wie Mehrwegeempfang besonders gut kompensiert. Der große Vorteil der Übertragung digitaler Fernsehsignale mit den damit verbundenen digitalen Modulationsverfahren sowie Datenkompressionsverfahren besteht darin, den Übertragungskanal mehrfach auszunutzen. Im Falle von DVB-T mit MPEG-2 als Standard zur Datenreduktion bedeutet dies, dass nun anstelle von einem Fernsehprogramm je Kanal bei der Analogtechnik drei bis sechs SDTV-Signale (Standard Definition TV, herkömmliche digitale Fernsehsignale in Standardauflösung) ausgestrahlt werden können. Durch Verwendung des effizienteren MPEG-4-AVC-Codecs (H.264) als Quellcodierung lassen sich noch mehr Programme bei subjektiv gleichwertig empfundener Qualität unterbringen. Dies macht ebenso die Aussendung von HDTV-Signalen (High Definition TV, hochauflösendes Fernsehen) über DVB-T interessant [Wik09b].

2.1.1 Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (COFDM)

Der terrestrische Funkkanal hat im Gegensatz zu einem kabelgebundenen Übertragungskanal mit dem Problem des Mehrwegeempfangs zu kämpfen. An Hindernissen wie Gebäuden, Bäumen oder Bergen kommt es zu Reflexionen des gesendeten Signals. Dies hat zur Folge, dass diese zeitversetzt zum direkt empfangenen Signal (Line-of-Sight) am Empfänger ankommen und sich dort überlagern. Bei Verwendung von Gleichwellennetzen, bei denen mehrere Sender auf der gleichen Frequenz synchron senden, erreicht ebenso dieses Signal zeitversetzt den Empfänger. Dadurch entstehen Störungen, die ein korrektes Detektieren des Signalzustandes durch den Empfänger erschweren.

Diese Störeinflüsse durch Mehrwegeempfang können mit einem Multiträgerverfahren, das als Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (COFDM) bezeichnet wird, kompensiert werden, indem durch Parallelisieren des Datenstroms die Symboldauer wesentlich verlängert wird. COFDM erweitert das OFDM-Verfahren um eine Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction), das Grundprinzip ist jedoch dasselbe.

Bei diesem Verfahren wird die zu übertragene Information mit hoher Datenrate nicht auf einen Träger moduliert, sondern mehrere Teilströme werden für sich auf Unterträger mit geringerer Datenrate aufgeteilt. Dadurch werden die Daten parallel mit geringerer Datenrate anstatt seriell mit hoher Datenrate gesendet und sind dadurch unempfindlicher gegenüber frequenzselektiven Störungen. Diese Unterträger stehen orthogonal zu einander, um sich möglichst wenig gegenseitig zu beeinflussen. Ebenso wird dadurch eine bessere spektrale Effizienz erreicht, da sich die Spektren der einzelnen Träger etwas überlappen dürfen. Als Modulationsverfahren für diese einzelnen Subträger kann QPSK, 16-QAM oder 64-QAM verwendet werden. Die Verwendung von QPSK ermöglicht einen robusten Empfang bei geringeren Datenraten. Werden die einzelnen Subträger mit Hilfe von 16-QAM moduliert, so resultiert dies in höheren Datenraten, jedoch ist das Signal weniger robust gegenüber einem QPSK modulierten Signal. Das Modulationsverfahren 64-QAM bietet die höchstmöglichen Datenraten, setzt jedoch einen möglichst ungestörten Empfang voraus. Einen Vergleich der erreichbaren Datenraten zeigt Tabelle 2.1.

Durch die Verwendung eines Schutzintervalls (Guard Interval) wird eine weitestgehende Immunität gegenüber Intersymbol-Interferenz erreicht, welche aufgrund des vorhin genannten Mehrwegeempfangs entsteht. Dieses Schutzintervall bewirkt, dass der Signalzustand vom Empfänger nur dann ausgewertet wird, wenn dieser stabil ist. Je länger die Schutzzeit gewählt wird, desto unempfindlicher zeigt sich das System. Jedoch geht dies zulasten der erreichbaren Nutzdatenrate [Rei08].

2.1.2 Verfügbare Nutzdatenraten

Die mit DVB-T erreichbaren Nutzdatenraten hängen von der Wahl des Modulationsverfahrens, der Coderate sowie der Größe des Schutzintervalls (Guard Interval) ab, die im

Modulation	Coderate	Schutzintervall (Guard Interval)			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67

Tabelle 2.1: Nutzdatenraten in MBit/s für ein DVB-T-System mit 8 MHz breitem Kanal [Rei08]

DVB-T-Modulator konfiguriert werden können. Welche Datenraten sich dabei ergeben, ist Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Verwendung eines höherwertigen Modulationsverfahrens (z.B. 16-QAM statt QPSK) zur Datenratensteigerung ein größeres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) am Empfänger zur Dekodierung des Signals notwendig macht.

Je höher die Coderate gewählt wird, desto geringer wird der Anteil der für die Korrektur von Übertragungsfehlern benötigten redundanten Bits. Dadurch lässt sich ebenfalls eine Datenratensteigerung erzielen, gleichzeitig wird das Signal jedoch weniger robust gegenüber Übertragungsfehlern.

2.1.3 Der MPEG-2-Transportstrom

Ebenso wie bei den anderen DVB-Standards (DVB-S, DVB-C) werden bei DVB-T digitale Inhalte als MPEG-2-Transportstrom (MPEG-2-TS) übertragen. Da auf einem Kanal (entspricht einer Frequenz) in der Regel mehrere Video-, Audio- oder Datenströme gesendet werden, bezeichnet man diese oft als Multiplex.

Das MPEG-2 Signal kann neben Video- und Audiodateien ebenso allgemeine Daten wie Internetdaten beinhalten. Diese werden MPEG Elementarströme (ES) genannt. Die Elementarströme werden zur weiteren Verarbeitung in Pakete variabler Länge eingeteilt, welche als Packetized Elementary Stream (PES) bezeichnet werden. Ein PES-Paket besteht üblicherweise aus maximal 64 kByte Payload plus 6 Byte Header, kann aber bei Bedarf

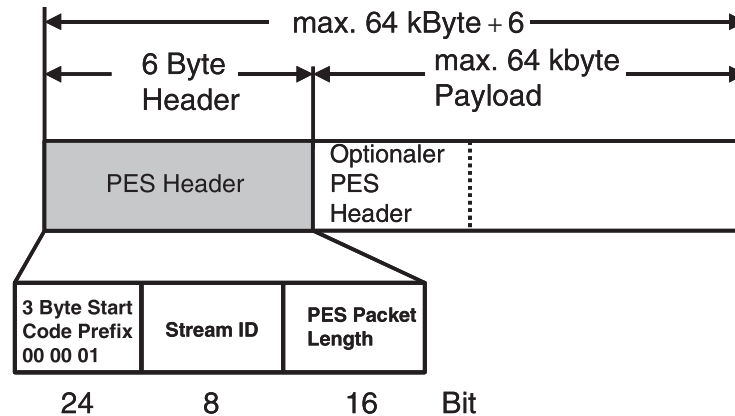


Abbildung 2.1: Aufbau eines PES-Paketes [Fis06]

auch größer sein. Abbildung 2.1 zeigt die Struktur eines PES-Paketes. Der Start Code Prefix (3 Byte) gibt den Start eines PES-Paketes an, die Stream ID (1 Byte) bestimmt die Art der in der Payload befindlichen Daten (Video-, Audio- oder Datenstrom), 2 Byte für die Paketlänge komplettieren den Header.

Diese PES-Pakete eignen sich aufgrund ihrer Größe nicht für die Übertragung über DVB und sind weiters ungeeignet für die Aussendung mehrerer Sendeinhalte (Programme) in einem Datensignal. Daher werden die PES-Pakete zu kleineren Paketen mit konstanter Länge weiterverarbeitet und man erhält 188 Byte lange Transportstrompakete. Dabei besteht ein Transportstrompaket aus einem 4 Byte langen Header und 184 Byte Payload, welches ebenso zusätzliche Steuerinformationen enthält.

Der 4 Byte große Header beinhaltet einen 13 Bit langen Packet Identifier (PID), welcher den Inhalt des aktuellen Transportstrompakets identifiziert. Zusammen mit den zusätzlichen Steuerinformationen in Form von Listen kann herausgefunden werden um welchen Teil des ursprünglichen Elementarstroms es sich handelt. Zur Synchronisierung auf den MPEG-2-Transportstrom dient weiters ein Sync Byte im Header, welches sich konstant alle 188 Byte wiederfindet. Die Struktur eines MPEG-2-TS-Paketes ist in Abbildung 2.2 skizziert.

Alle Transportstrompakete eines Programms (kann aus mehreren Video- und Audio-Signalen bestehen) werden gemultiplext, das heißt ineinander verschachtelt und man erhält den Program Stream (PS). Anschließend werden alle gemultiplexten Datenströme aller Programme nochmals gemultiplext und man erhält als Gesamtdatenstrom den sogenannten MPEG-2-TS (Transport Stream). Dieser kann nun über Satellit, Kabel oder auf terrestrischem Wege übertragen werden. Dazu wird außerdem jedem 188 Byte langen Paket ein 16 Byte Fehlerschutz (Reed-Solomon codiert) hinzugefügt, um bei der Übertragung auftretende Fehler korrigieren zu können.

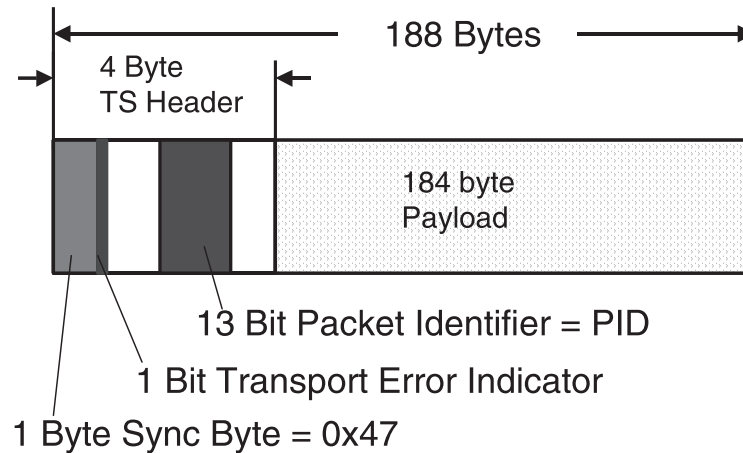


Abbildung 2.2: Struktur eines MPEG-2-TS-Paketes [Fis06]

Für eine genauere Beschreibung des Aufbaus eines MPEG-2-Transportstrompakets sei auf [Fis06] verwiesen.

2.1.4 IP über DVB

Durch Nutzung des MPEG-2-Transportstroms ist es möglich, neben Video- und Audioinhalten beliebige Daten über DVB-Netze zu übertragen. Diese Daten können programmbezogene Datendienste wie beispielsweise Teletext, aber auch von im Multiplex vorhandenen Programmen völlig unabhängige Datendienste sein. Dazu gehören MHP-Anwendungen, elektronische Programmzeitschriften (EPG) oder eben Internetdaten. Der ETSI-Standard EN 301 192 definiert die Methoden Data Piping, Data Streaming, Data Carousel und Multiprotocol Encapsulation (MPE) um Daten über DVB-Netze zu übertragen [Rei08].

Da in der vorliegenden Masterarbeit letztere Methode zum Einsatz kommt, soll im folgenden die Multiprotocol Encapsulation (MPE) näher beleuchtet werden. Es folgt die Beschreibung der Ultralightweight Encapsulation (ULE), welche das Nachfolprotokoll von MPE darstellt.

Multiprotocol Encapsulation (MPE)

MPE stellt einen Mechanismus bereit, Pakete verschiedenster Kommunikationsprotokolle in einen MPEG-2-Transportstrom zu verpacken und damit über DVB-Netze zu transportieren. Dabei wurde MPE speziell für die Übertragung von Internet-Protokoll-Paketen (IP-Paketen) optimiert. Durch Verwendung des LLC/SNAP-Verfahrens (Logical Link Control/SubNetwork Attachment Point) können außerdem zukünftige Netzwerkprotokolle inkludiert werden. Um IP-Pakete in den MPEG-2-Transportstrom kapseln zu können, verwendet MPE einen Mechanismus, der Digital Storage Media Command and Control Sections (DSM-CC) genannt wird und im MPEG-2-Standard ISO/IEC 13818-6 definiert ist.

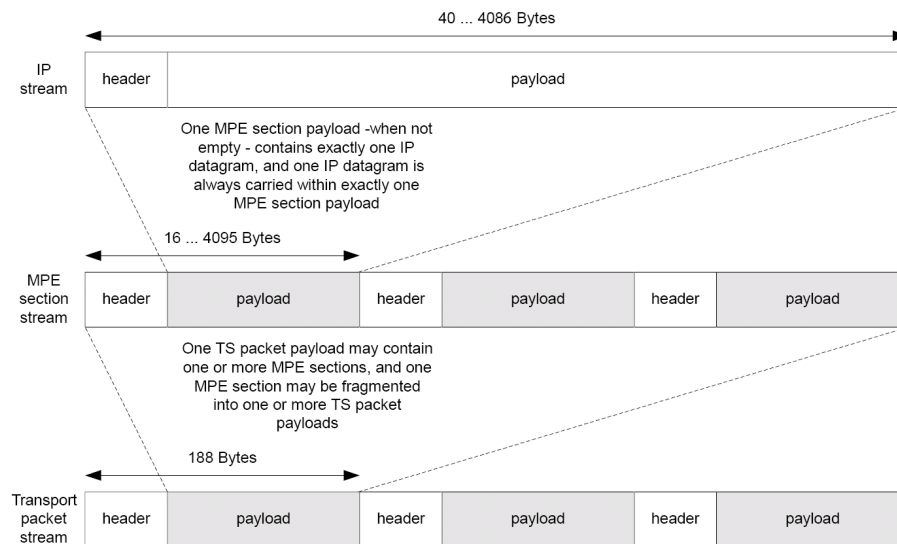


Abbildung 2.3: Einkapselung eines IP-Datenpaketes in den MPEG-2-Transportstrom [Wac07]

Mittels MPE können

- einzelne Empfänger (*Unicast*),
- Gruppen von Empfängern (*Multicast*) sowie
- alle Empfänger (*Broadcast*) eines Netzes adressiert werden.

Mit Hilfe der jedem Empfangsgerät eindeutig zugewiesenen 48-Bit-langen MAC-Adresse (Medium Access Control) werden die entsprechenden Empfänger adressiert. Das Besondere dabei ist, dass nur die letzten zwei Byte der MAC-Adresse im MPE-Header stehen, die übrigen außerhalb des Headers, also in der Payload. Dies ermöglicht die Filterung des bedeutsameren Teils der MAC-Adresse durch den Demultiplexer in Hardware. Ein IP-Datenpaket ist auf die Länge von 4086 Byte beschränkt, damit das Datenpaket genau in die Payload einer MPE-Section passt, ohne fragmentiert werden zu müssen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt. Ähnlich wie eine Netzwerkkarte ist ein geeigneter Empfänger damit in der Lage die im MPEG-2-Transportstrom verkapselten Daten zu entkapseln und diese dem Empfangsgerät bereitzustellen.

Ultralightweight Encapsulation (ULE)

Eine weitere Methode, um Daten in einen MPEG-2-Transportstrom zu kapseln, ist neben der bereits genannten Multiprotocol Encapsulation (MPE) die Ultralightweight Encapsulation (ULE). Dieses von der IP over DVB (IPDVB)-Arbeitsgruppe der Internet Engineering Task Force (IETF) entwickelte und in RFC 4326 standardisierte Nachfolgeprotokoll löst einige der in MPE enthaltenen Schwächen. Ohne auf die technischen Details dieses Protokolls näher einzugehen, sei an dieser Stelle nur kurz auf einige Verbesserungen im Vergleich zu MPE hingewiesen. Für weitere Details siehe [SFA⁺05] [CNF04] und [HCB05].

ULE bietet im Vergleich zu MPE eine effizientere Übertragung aufgrund eines kürzeren Headers (weniger Protokoll-Overhead). Außerdem ermöglicht ULE das Versenden an eine Ziel-IP-Adresse anstatt an eine Ziel-MAC-Adresse im Falle von MPE. Dies hat den Vorteil für den Provider, dass im IP/DVB-Gateway nun keine Datenbank mehr mit den MAC-Adressen der Empfänger geführt werden muss. Eine weitere Verbesserung von ULE gegenüber MPE ist die native Unterstützung für zukünftige Netzwerkprotokolle, wie zum Beispiel das Internet-Protokoll in der Version 6 (IPv6) als Nachfolgeprotokoll der Version 4 (IPv4). MPE hingegen muss sich der Verwendung des LLC/SNAP-Verfahrens bedienen, um IPv6 übertragen zu können. Insgesamt sprechen also der geringere Verarbeitungsaufwand sowie die einfachere Validierung des Protokolls für die Verwendung von ULE.

2.2 Wireless Local Area Network (WLAN)

Mit Wireless Local Area Network (WLAN), welches von der IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) erstmals 1997 im IEEE 802.11 Standard spezifiziert wurde, existiert die Möglichkeit der drahtlosen Übertragung von Daten. Diese Technologie basiert auf dem 802.3 Standard, welcher jene drahtgebundene Netzwerktechnologie (Ethernet) beschreibt, die am weitesten verbreitet ist.

2.2.1 WLAN-Standards

Die IEEE 802.11 Protokollfamilie besteht aus mehreren Standards, welche als Weiterentwicklungen aus dem ursprünglichen Standard resultieren. Einen Überblick über die wichtigsten WLAN-Standards gibt Tabelle 2.2, wobei der 802.11b-Standard heutzutage kaum mehr verwendet wird. Im Folgenden werden die WLAN-Standards 802.11a und 802.11g näher beschrieben, da diese für den praktischen Teil der Masterarbeit eingesetzt wurden [Rec08] [Tru09].

Standard	Frequenzband	Brutto-Datenraten	Übertragungsverfahren
802.11a	5 GHz	6 - 54 MBit/s	OFDM
802.11b	2,4 GHz	1 - 11 MBit/s	DSSS
802.11g	2,4 GHz	6 - 54 MBit/s	OFDM
802.11n	2,4 oder 5 GHz	Bis 600 MBit/s	OFDM

Tabelle 2.2: Übersicht der wichtigsten WLAN-Standards nach IEEE 802.11

IEEE 802.11a

Der Standard 802.11a nutzt zur Übertragung von Daten im 5-GHz-Frequenzbereich das OFDM-Verfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Im Gegensatz zum 2,4-GHz-ISM-Band bietet der 5-GHz-Bereich mehr nutzbare Bandbreite. Insgesamt stehen 455 MHz an Bandbreite zur Verfügung und damit 19 nicht überlappende Kanäle, während im 2,4-GHz-ISM-Band nur etwa 80 MHz und damit drei nicht überlappende Kanäle bereit

Frequenzbereich [GHz]	Bezeichnung	Kanalnummer	Mittelfrequenz [GHz]
5,150 - 5,250	U-NII lower band	36	5180
		40	5200
		44	5220
		48	5240
5,250 - 5,350	U-NII middle band	52	5260
		56	5280
		60	5300
		64	5320
5,470 - 5,725	Additional U-NII band	100	5500
		104	5520
		108	5540
		112	5560
		116	5580
		120	5600
		124	5620
		128	5640
		132	5660
		136	5680
		140	5700

Tabelle 2.3: Kanalaufteilung des 5-GHz-Bandes innerhalb der EU [Rec08] [OP05]

stehen. Tabelle 2.3 zeigt die Kanalaufteilung im 5-GHz-Frequenzband mit entsprechender Kanalnummer und Mittelfrequenz innerhalb der europäischen Union (EU).

Transmission Power Control (TPC): Durch Austausch von Informationen bezüglich der bestehenden Empfangsqualität zwischen Sender und Empfänger kann festgestellt werden, welche Sendeleistung für einen korrekten Betrieb notwendig ist. Wenn die volle Sendeleistung gerade nicht benötigt wird, so verringert der Sender automatisch seine Leistung. Diese automatische Sendeleistungsanpassung wird durch den TPC-Mechanismus vorgenommen. WLAN-Geräte welche im 5-GHz-Bereich senden, müssen dabei in der Lage sein, eine automatische Leistungsreduktion von mindestens 6 dB vornehmen zu können, ansonsten ist die Verwendung nur in einem beschränkten Frequenzbereich bzw. mit geringerer Sendeleistung erlaubt. Damit wird sichergestellt, dass sich Teilnehmer im 5-GHz-Bereich möglichst wenig gegenseitig stören.

Dynamic Frequency Selection (DFS): Da ebenso andere Dienste wie militärische Radarsysteme, Satellitenfunk oder Amateurfunk den 5-GHz-Bereich nutzen, müssen WLAN-Geräte während des Betriebs einen automatischen Kanalwechsel durchführen können, sollte auf der benutzten Frequenz eine Übertragung eines anderen Teilnehmers erkannt werden. Auch wird bereits vor Verwendung einer bestimmten Sendefrequenz der Kanal auf Sendeaktivitäten hin überprüft und im Falle von Störungen dieser erst gar nicht gewählt.

Frequenzbereich [GHz]	Nutzungsbereich	EIRP max mit DFS mit TPC	EIRP max mit DFS ohne TPC	EIRP max ohne DFS mit TPC	EIRP max ohne DFS ohne TPC
5,150 - 5,250	indoor	23 dBm (200 mW)	23 dBm (200 mW)	17,8 dBm (60 mW)	14,8 dBm (30 mW)
5,250 - 5,350	indoor	23 dBm (200 mW)	20 dBm (100 mW)	nicht erlaubt	nicht erlaubt
5,470 - 5,725	indoor outdoor	30 dBm (1 W)	27 dBm (500 mW)	nicht erlaubt	nicht erlaubt

Tabelle 2.4: Erlaubte Strahlungsleistungen im 5-GHz-Band innerhalb der EU [Rec08] [Ets07]

Dieser Wechsel auf einen freien Funkkanal wurde mittels DFS implementiert und muss für den Betrieb in allen UNII-Teilbändern mit maximaler Sendeleistung vom entsprechenden WLAN-Gerät unterstützt werden. Sowohl DFS als auch TPC wurden in der Erweiterung 802.11h definiert.

Die innerhalb der europäischen Union (EU) erlaubten Strahlungsleistungen (EIRP) sind Tabelle 2.4 zu entnehmen. Abhängig vom verwendeten Frequenzbereich und dem unterstützten Mechanismus (DFS bzw. TPC) vom WLAN-Gerät zur Vermeidung von Störungen anderer Dienste, sind für einen Betrieb unterschiedliche maximal erlaubte Strahlungsleistungen gesetzlich festgelegt.

IEEE 802.11g

WLAN-Geräte nach dem 802.11g-Standard arbeiten im 2,4-GHz-ISM-Band (Industrial, Scientific, Medical), das weltweit lizenz- und genehmigungsfrei genutzt werden darf. Es müssen lediglich die gesetzlich vorgeschriebenen Sendeleistungen eingehalten werden.

Im Gegensatz zum älteren 802.11b-Standard, welcher ebenso im 2,4-GHz-ISM-Band sendet und Datenraten bis 11 MBit/s unterstützt, können 802.11g-fähige Geräte mit Datenraten bis 54 MBit/s senden. In Europa stehen insgesamt 13 Kanäle zu je 22 MHz Bandbreite zur Verfügung. Um WLAN-Netze ohne gegenseitige Beeinflussung betreiben zu können, müssen Kanäle gewählt werden, die einen empfohlenen Abstand von 30 MHz zwischen den Mittenfrequenzen aufweisen und sich damit nicht überschneiden. Wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, erfüllen die Kanäle 1-7-13 diese Bedingung. Da in den USA nur 11 Kanäle zur Verwendung bereitstehen, empfiehlt es sich dort die Kanäle 1-6-11 mit einem Abstand von 25 MHz zu benutzen.

Die effektive Strahlungsleistung (EIRP) von 802.11g-WLAN-Geräten ist auf 20 dBm (100 mW) begrenzt. Die Verwendung ist sowohl im Indoor- als auch im Outdoor-Bereich für den gesamten Frequenzbereich im 2,4-GHz-ISM-Band mit dieser Sendeleistung erlaubt. Dabei sind im Gegensatz zu 802.11a-Komponenten hier die aufwendigen Mechanismen zur Vermeidung von Störungen anderer Funkteilnehmer (DFS) bzw. die automatische Sendeleistungsanpassung (TPC) nicht nötig.

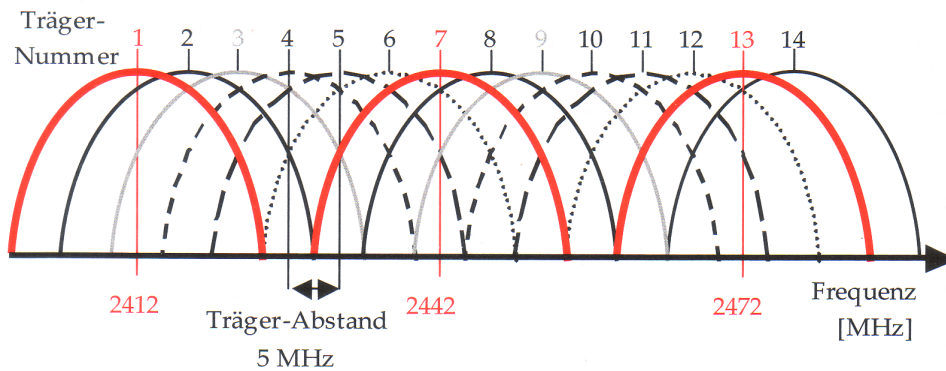


Abbildung 2.4: Frequenzraster und nichtüberlappende Kanäle bei 2,4 GHz für 802.11b/g

Ein großer Nachteil ist, dass sich 802.11b/g-Geräte den Frequenzbereich mit anderen Funktechnologien wie Bluetooth, aber auch mit Mikrowellenherden und Babyphones teilen müssen.

2.2.2 Topologie

Als Basic Service Set (BSS) bezeichnet man alle 802.11-WLAN-Geräte, die auf dem gleichen Kanal senden und sich einen geografischen Bereich teilen. Dabei kann ein BSS in unterschiedlichen Betriebsmodi arbeiten, im Ad-hoc Mode, im Infrastruktur-Modus, im Extended-Service-Set-Modus und als Wireless Distribution System. Diese Betriebsmodi sollen im Folgenden näher erläutert werden [Rec08] [Sau08].

Ad-hoc Mode

In diesem Betriebsmodus, der auch als Independent Basic Service Set (IBSS) bezeichnet wird, findet die Übertragung von Daten direkt zwischen den beteiligten WLAN-Endgeräten statt, ohne Beteiligung eines WLAN-Access-Points. Die WLAN-Endgeräte einigen sich zu Beginn auf einen Namen für das Netzwerk, die sogenannte Basic Service Set ID (BSSID) sowie einen Kanal, auf dem gesendet wird. Sollte eine verschlüsselte Übertragung stattfinden, so muss ein Verschlüsselungskey konfiguriert werden. Außerdem müssen alle Teilnehmer entsprechende IP-Adressen konfigurieren. Abbildung 2.5 zeigt den Aufbau eines Ad-hoc-Netzwerkes mit zwei Teilnehmern.

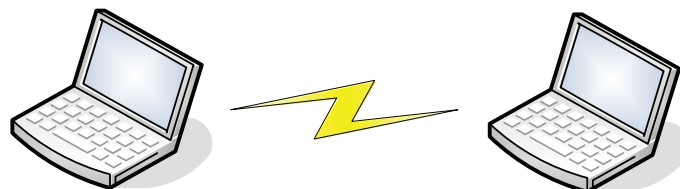


Abbildung 2.5: Ad-hoc-Netzwerk (Independent Basic Service Set)

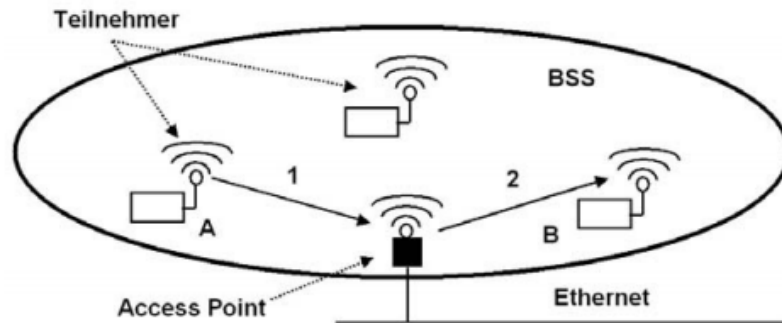


Abbildung 2.6: Netzwerk im Infrastruktur-Modus (Infrastructure Basic Service Set) [Rec08]

Infrastructure BSS

Bei diesem Betriebsmodus erfolgt sämtliche Kommunikation ausschließlich über einen Access-Point. Es ist nicht möglich, dass zwei Teilnehmer direkt miteinander kommunizieren. Wie in Abbildung 2.6 ersichtlich, sendet Teilnehmer A über den Access-Point eine Nachricht an Teilnehmer B. Dieser Modus erlaubt WLAN-Endgeräten miteinander zu kommunizieren, auch wenn sie sich außerhalb deren direkter Sendereichweite befinden. Diese müssen lediglich eine Verbindung zum selben Access-Point haben. Dadurch wird gleichzeitig auch die Ausleuchtzone vergrößert, da der Access-Point Nachrichten entgegennimmt und diese wieder verstärkt an das Ziel-Endgerät weitersendet. Der große Nachteil des Infrastructure BSS Betriebsmodus ist jedoch, dass der Übertragungskanal im Vergleich zur direkten Kommunikation wie im Falle des Ad-hoc-Modus doppelt so oft belegt und damit die maximale Datenrate halbiert wird.

Extended Service Set (ESS)

Als Extended Service Set bezeichnet man eine Anordnung mehrerer Access-Points, welche über ein Kabelnetzwerk, das sogenannte Distribution System (DS), miteinander verbunden sind (Abbildung 2.7). Dies erlaubt den Teilnehmern eines ESS den Standort zu wechseln (Roaming), gleichzeitig kann damit die Reichweite eines WLAN-Netzwerkes erheblich vergrößert werden. Die Access-Points müssen dabei auf verschiedenen Frequenzen senden, sollten daher nichtüberlappende Kanäle für eine störungsfreie Übertragung wählen. Um ein nahtloses Roaming zu ermöglichen, müssen sich die einzelnen Ausleuchtzonen der Access-Points geringfügig überlappen, damit auch in den Außenbereichen eine Netzabdeckung gegeben ist.

Ein ESS kann auch dazu verwendet werden, um in einem stark genutzten Bereich die Datenrate eines Teilnehmers zu erhöhen. Teilen sich sehr viele Teilnehmer denselben Übertragungskanal, so fällt die verfügbare Datenrate für den Einzelnen sehr gering aus. Durch Herabsetzen der Sendeleistung der Access-Points wird deren Ausleuchtzone verringert und damit können die Übertragungskanäle räumlich öfters wiederverwendet werden. Dadurch können weitere Access-Points innerhalb des gleichen Sendebereichs genutzt

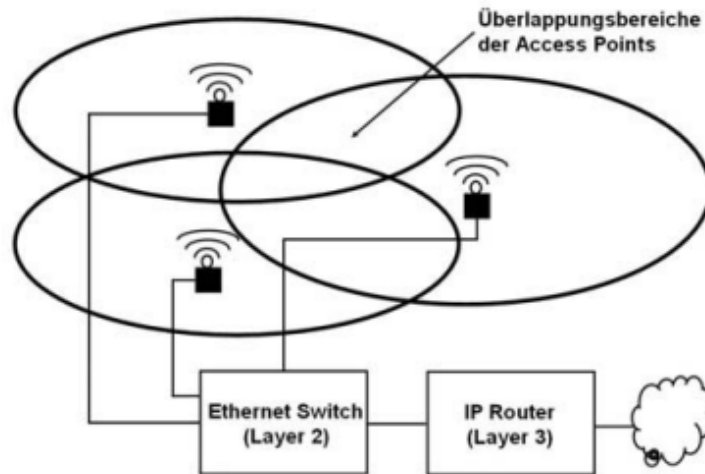


Abbildung 2.7: Netzwerk im ESS-Modus (Extended Service Set) [Rec08]

werden. Ein Access-Point muss nun weniger Teilnehmer versorgen, was in einer höheren Datenrate pro Teilnehmer resultiert.

Wireless Distribution System (WDS)

Mit Hilfe eines Wireless Distribution Systems lassen sich größere WLAN-Netzwerke aufbauen. Hierbei wird jedoch das kabelgebundene Distribution System (DS) im Falle eines ESS durch eine Funkstrecke ersetzt. Ein WDS kennt mit dem Bridging-Modus und dem Repeating-Modus zwei Betriebsmodi.

Beim Bridging-Modus kommunizieren zwei als WLAN-Bridges konfigurierte Access-Points direkt miteinander. Weitere WLAN-Clients können sich nicht an diesen anmelden, da der Datenverkehr exklusiv für diese Punkt-zu-Punkt-Verbindung reserviert ist. Dieser Betriebsmodus wird für den Aufbau von Richtfunkstrecken über sehr große Distanzen verwendet.

Der Repeating-Modus erlaubt die Implementierung einer Point-to-Multipoint-Verbindung. Dabei können mehrere Access-Points drahtlos miteinander verbunden werden und zusätzlich dürfen sich weitere WLAN-Clients verbinden. Damit kann die WLAN-Reichweite vergrößert werden, allerdings mit dem Nachteil, dass sich mit jedem zusätzlichen Access-Point als Wireless-Repeater durch das abwechselnde Senden und Empfangen die Datenrate halbiert.

2.2.3 Vergleich von 802.11g und 802.11a für Richtfunkstrecken

Vergleicht man das 2,4-GHz-Frequenzband mit dem 5-GHz-Frequenzband, so ergeben sich zahlreiche Vorteile bei Verwendung von 5-GHz-Equipment zur Herstellung einer Richtfunkverbindung.

Im Frequenzbereich zwischen 5,470 und 5,725 GHz (Additional U-NII Band) stehen 11 nicht überlappende Kanäle zur Verfügung, in denen jeweils bei Unterstützung von DFS und TPC mit 30 dBm (1 W) Strahlungsleistung (EIRP) gesendet werden darf. Im 2,4-GHz-Bereich sind dies nur drei nichtüberlappende Kanäle und die Strahlungsleistung ist auf 20 dBm (100 mW) limitiert. Dadurch erhält man bei Auswahl des 5-GHz-Bereichs eine Leistungsreserve von zumindest 3 dB (mit Berücksichtigung der höheren Dämpfung für höhere Frequenzen) im Vergleich zum 2,4-GHz-Band [MSL08]. Zudem ist das 5-GHz-Band nicht so überfüllt wie das ISM-Band, in dem zahlreiche Funksysteme konkurrieren.

Je höher die Frequenz ist, desto kleiner ist die Wellenlänge und damit verringert sich die Fresnelzone für 5-GHz-Wellen wesentlich im Vergleich zu 2,4-GHz-Wellen. Durch die Fresnelzone wird der räumliche Bereich angegeben, welcher möglichst frei von Hindernissen wie Bäumen oder Gebäuden sein soll, da es aufgrund von Reflexionen an diesen zu einer Auslöschung der Wellen am Empfänger kommen kann. Dadurch verringert sich der Signal-Rausch-Abstand am Empfänger und erschwert ein Detektieren des korrekten Signalzustandes. Außerdem bedeutet die Verwendung höherer Frequenzen, dass Antennen verwendet werden können, die bei gleichem Gewinn kompakter sind [Ahl04].

Aus diesen Gründen erfolgt die Implementierung einer IEEE 802.11a-Richtfunkstrecke für den regionalen Retourkanal im Frequenzbereich zwischen 5,470 und 5,725 GHz für den Freifeldaufbau.

3 Versuchsaufbau im Labor

Um die prinzipielle Funktionsweise des hybriden Systems zu testen, wurde in einem ersten Schritt ein Testsystem im Satellitenlabor des Instituts für Kommunikationsnetze und Satellitenkommunikation (IKS) aufgebaut. Hier befindet sich ebenso ein Studioaufbau, mit dem Audio- und Videostreams von verschiedenen Quellen encodiert, gemultiplext und über den DVB-T-Forschungssender ausgestrahlt werden können (siehe [Rom07] und [Wac07]). Der Laboraufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt und soll im Folgenden näher beschrieben werden.

3.1 Grundsätzliche Funktionsweise

Im Unterschied zu Internetzugängen mittels DSL oder Kabel TV (DOCSIS) kommen bei einer hybriden Internetanbindung verschiedene Technologien für den Vorwärts- und Retourkanal zum Einsatz. Anfragen eines Benutzers ins Internet werden über den sogenannten Retourkanal an den jeweiligen Internet-Service-Provider weitergeleitet. Je nach Zieladresse werden die Datenpakete ins Internet an den entsprechenden Zielrechner weitergeroutet. Die Antworten gelangen über den Vorwärtskanal wieder zum Benutzer zurück. In den meisten Fällen verfügt der Vorwärtskanal über die größere Bandbreite als der Retourkanal, man spricht von einer asymmetrischen Internetanbindung. In Abbildung 3.1 entspricht der mit (1) gekennzeichnete Pfad dem Retourkanal, (2) dem Vorwärtskanal.

Der Client-Rechner ist im ersten Versuchsaufbau über ein Ethernetkabel mit dem Router verbunden, um die Komplexität des Laboraufbaus zunächst gering zu halten. Dieser routet die Anfragen des Clients der Zieladresse entsprechend weiter. Anfragen ins Internet werden über den Internet-Gateway weitergeleitet. Die Antwortpakete gelangen nun nicht mehr über den selben Pfad zurück, sondern werden dem Benutzer über den IP/DVB-Gateway und die DVB-T-Strecke zur Verfügung gestellt. Dazu müssen die entsprechenden Routingeinträge in den Geräten konfiguriert werden, es wird das Konzept SplitIP implementiert.

Um IP-Pakete über das Medium DVB-T einem Empfänger zustellen zu können, müssen die Datenpakete in einen MPEG-2-Transportstrom gekapselt werden (siehe hierzu Kapitel 2.1.4). Diese Aufgabe übernimmt der IP/DVB-Gateway. Der resultierende Transportstrom wird anschließend von einem DVB-T-Modulator gemäß DVB-T-Spezifikation [Dvb09] auf eine hochfrequente Trägerfrequenz aufmoduliert und über ein Koaxialkabel zum Empfänger rückgeführt. Als Empfänger dient eine Set-Top-Box (STB), welche für

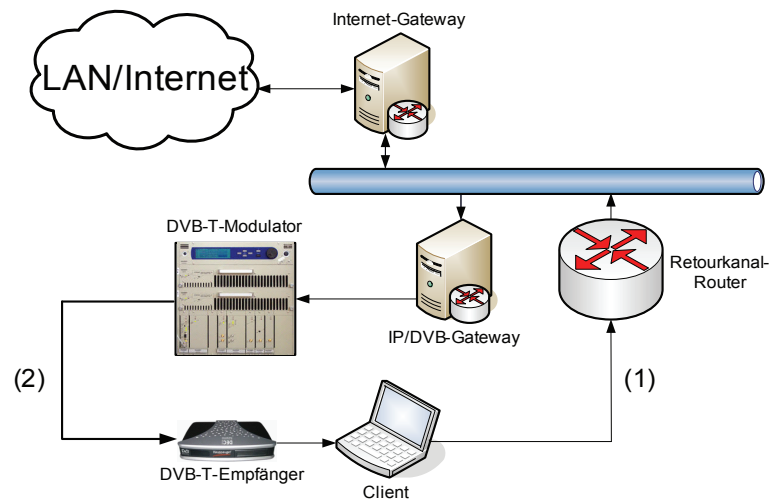


Abbildung 3.1: Laboraufbau mit einem Client

den Empfang von Datendiensten geeignet ist. Schließlich filtert eine Datenapplikation die für den Empfänger bestimmten Datenpakete und reicht diese an den TCP/IP-Stack des Betriebssystems weiter, welches diese wiederum an die ursprünglich anfragende Applikation weitergibt.

3.2 Genauere Beschreibung der Netzwerktopologie

Es folgt eine genauere Beschreibung der Netzwerktopologie des Laboraufbaus. Der erste Laboraufbau besteht im Wesentlichen aus drei Subnetzen eines privaten Netzwerkbereichs. Der Client stellt seine Anfragen über das 192.168.3.0/24-Retourkanal-Netz dem Backbone-Netz, welchem der Adressbereich 192.168.1.0/24 zugewiesen ist, zu. Die Antworten werden über das DVB-Broadcast-Netz 192.168.2.0/24 wieder zugestellt.

Der Internet-Gateway befindet sich nach außen hin im 129.27.140.x/25-Netz, im LAN des TU-Netzes. Diesem wird per Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) eine IP-Adresse zugewiesen. Sämtliche Anfragen des lokalen Netzwerkes nach außen werden über diese öffentliche IP-Adresse ins Internet weitergeleitet, da private Netzwerkadressen im Internet nicht geroutet werden. Der Laboraufbau mit den konfigurierten IP-Adressen ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

Retourkanal-Netz (192.168.3.0/24)

Wie schon in Kapitel 3.1 einleitend erwähnt, wurde die Komplexität des Retourkanals zunächst so gering wie möglich gehalten, um eventuell auftretende Probleme weitestgehend zu vermeiden und eingrenzen zu können. Der Retourkanal ist durch die Verbindung des Clients mit dem Router über ein Ethernetkabel hergestellt. Dieser Retourkanal wird in weiterer Folge durch eine Funkverbindung mittels WLAN ersetzt. Ein getrennter Re-

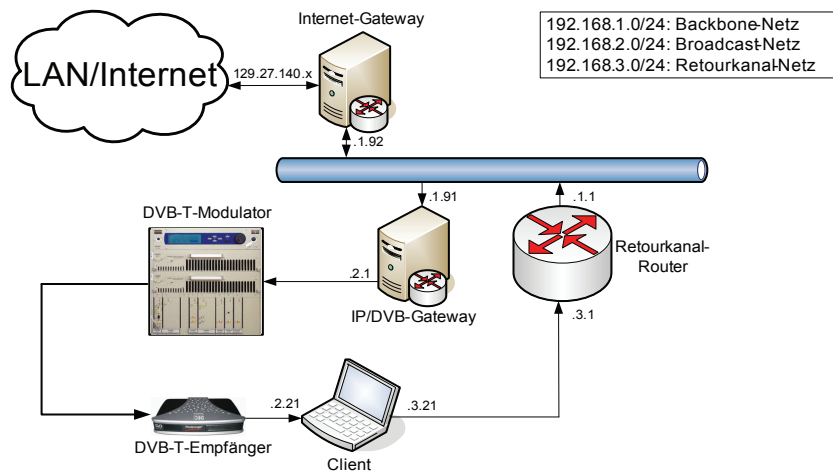


Abbildung 3.2: Netzwerktopologie des Laboraufbaus mit kabelgebundenem Retourkanal

tourkanal ist nötig, da es sich beim Vorwärtskanal mit DVB-T um eine unidirektionale Broadcast-Technologie handelt.

Backbone-Netz (192.168.1.0/24)

Das Kernnetz des Aufbaus repräsentiert das Netzwerk des Internet-Service-Providers, der über die nötige Infrastruktur verfügt, um den hybriden Internetzugang anbieten zu können. Die Komponenten im Backbone wurden im Versuchsaufbau über einen 10/100-MBit-Ethernet-Switch miteinander verbunden. Anfragen ins Internet werden über den Internet-Gateway abgewickelt.

DVB-Broadcast-Netz (192.168.2.0/24)

Über das DVB-Broadcast-Netz werden die Datenpakete an den Empfänger geschickt. Für die Einkapselung der IP-Daten in einen MPEG-2-Transportstrom wird eine spezielle DVB-Karte verwendet, die sogenannte Cobra-Karte, die in den IP/DVB-Gateway per PCI-Steckplatz (Peripheral Component Interconnect) eingebaut ist. Da diese Karte keine ASI-Schnittstelle (Asynchronous Serial Interface) besitzt, ist der IP/DVB-Gateway über einen SPI/ASI-Converter (SPI - Synchronous Parallel Interface) und ein Koaxialkabel mit dem ASI-Eingang des DVB-T-Modulators verbunden. Das modulierte Signal wird ohne Endverstärkung über einen Monitoring-Ausgang am Modulator wieder über ein Koaxialkabel im UHF-Frequenzbereich rückgeführt. Die DVB-T-Set-Top-Box, welche per Antennenkabel direkt mit dem Ausgang des DVB-T-Modulators verbunden ist, empfängt die Daten. Zunächst erfolgt keine Aussendung über den DVB-T-Sender, da dies für die Labormessungen nicht benötigt wird.

3.3 Komponenten und deren Konfiguration

Im folgenden Abschnitt werden die für den Versuchsaufbau eingesetzten Komponenten sowie deren Konfiguration näher beschrieben. Dazu gehören die Komponenten IP/DVB-Gateway, Retourkanal-Router, Internet-Gateway, DVB-T-Modulator und Client mit DVB-T-Set-Top-Box.

3.3.1 IP/DVB-Gateway

Ein Linux-Rechner dient als IP/DVB-Gateway, welcher die Schnittstelle zwischen Internet Protokoll (IP) und Digital Video Broadcasting (DVB) bildet. Die Aufgabe des IP/DVB-Gateways ist es, die ankommenden IP-Daten in einen MPEG-2-Transportstrom zu kapseln und damit für die Übertragung über DVB-T vorzubereiten.

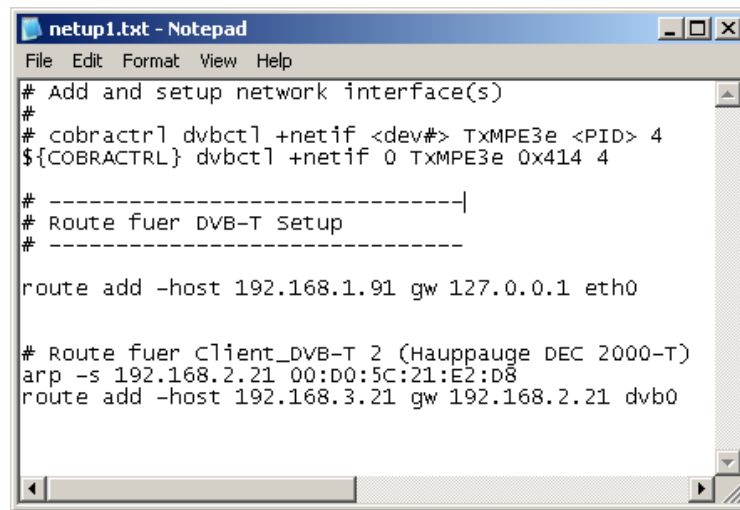
Wie in Abbildung 3.2 ersichtlich, verfügt der IP/DVB-Gateway über zwei Netzwerkschnittstellen. Über ein 10-MBit-Netzwerk-Interface mit der IP-Adresse 192.168.1.91 werden sämtliche Daten, die für Empfänger im DVB-Broadcast-Netz bestimmt sind, angenommen.

Die eigentliche Kapselung der IP-Daten wird von einer speziellen Karte, der sogenannten Cobra-Karte vorgenommen, die mit der IP-Adresse 192.168.2.1 konfiguriert ist. Es handelt sich um eine von der Global Communication And Services GmbH Salzburg (GCS) entwickelte PCI-DVB/SPI-Adapter-Karte. Diese kann Audio/Video- und IP-Daten sowohl im Empfangs- als auch im Sendemodus einkapseln, auskapseln und multiplexen und verbindet damit die Internet-Welt mit einer DVB-Umgebung. Die Cobra-Karte unterstützt Datenraten bis ca. 60 MBit/s. Die Datenrate wurde für sämtliche Messungen in einem Konfigurationsfile auf 10 MBit/s beschränkt. Da es sich um eine ältere Karte handelt, die noch nicht über ein ASI-Interface verfügt, ist der Gateway über einen SPI/ASI-Converter mit dem DVB-T-Modulator verbunden.

Damit der IP/DVB-Gateway überhaupt Datenpakete an die Zielrechner zustellen kann, müssen ihm IP-Adresse und MAC-Adresse der Empfänger bekannt gegeben werden. Diese Zuordnung wird mittels eines ARP-Eintrages (Address Resolution Protocol) in einem Konfigurationsfile gespeichert und muss konsistent gehalten werden. Weiters muss dem IP/DVB-Gateway bekannt sein, wie er einen Empfänger im DVB-Broadcast-Netz wieder erreichen kann, da er Datenpakete nicht über das gleiche Netz wieder zustellen soll, in dem sie empfangen wurden. Dies geschieht über das Hinzufügen eines Routingeintrages, was ebenfalls im gleichen Konfigurationsfile passiert. Abschließend wird noch die PID konfiguriert, damit der Empfänger den gewünschten Datendienst referenzieren kann. Ein Ausschnitt aus dem Konfigurationsfile mit den eben genannten Konfigurationen ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Der Eintrag

```
$COBRCTRL dvbctl +netif 0 TxMPE3e 0x414 4
```



```

netup1.txt - Notepad
File Edit Format View Help
# Add and setup network interface(s)
#
# cobractrl dvbctl +netif <dev#> TxMPE3e <PID> 4
#{COBRACTRL} dvbctl +netif 0 TxMPE3e 0x414 4
# -----|
# Route fuer DVB-T Setup
# -----|

route add -host 192.168.1.91 gw 127.0.0.1 eth0

# Route fuer Client_DVB-T 2 (Hauppauge DEC 2000-T)
arp -s 192.168.2.21 00:D0:5C:21:E2:D8
route add -host 192.168.3.21 gw 192.168.2.21 dvb0

```

Abbildung 3.3: Ausschnitt aus dem Konfigurationsfile *netup*

definiert, dass die mittels MPE gekapselten Daten die PID 1044 (als Hexadezimalwert 0x414) verwenden.

```
arp -s 192.168.2.21 00:D0:5C:21:E2:D8
```

Diese statische ARP-Zuweisung am IP/DVB-Gateway ist aufgrund des unidirektionalen Mediums erforderlich. Damit kennt der IP/DVB-Gateway den Empfänger mit der IP-Adresse 192.168.2.21 und MAC-Adresse 00:D0:5C:21:E2:D8 und kann diese als Ziel-MAC-Adresse beim Einkapseln verwenden.

```
route add -host 192.168.3.21 gw 192.168.2.21 dvb0
```

Mit diesem Eintrag wird der Retourpfad definiert. Datenpakete, die an den Rechner mit der IP-Adresse 192.168.3.21 im Retourkanal-Netz gerichtet sind, benutzen als Gateway 192.168.2.21 (eine andere Schnittstelle desselben Client-Rechners im Broadcast-Netz) und verlassen den IP/DVB-Gateway über das Exit-Interface dvb0, nehmen also den Weg über den DVB-T-Vorwärtskanal.

3.3.2 Retourkanal-Router

Als Retourkanal-Router dient ein Cisco 2801 Router mit IOS Version 12.4.(15)T8, der das Retourkanal-Netz mit dem Backbone-Netz verbindet und die Daten der anfragenden Clients entsprechend weiterleitet. Um Anfragen ins DVB-Broadcast-Netz, also ins 192.168.2.0/24-Netz weiterleiten zu können, wurde die statische Route (ip route 192.168.2.0 255.255.255.0 192.168.1.91) konfiguriert. Damit werden die Anfragen ins 192.168.2.0/24-Netz an die Next-Hop-IP-Adresse 192.168.1.91, also den IP/DVB-Gateway weitergeleitet. Dies ist notwendig, da das DVB-Broadcast-Netz nicht direkt an einem Router-Interface angeschlossen ist und damit für den Router nicht direkt bekannt ist.

Weiters wurde eine statische Default Route (ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 192.168.1.92) konfiguriert, um Anfragen der Clients an nicht lokale Adressen ins Internet weiterzuleiten. Pakete mit Ziel-IP-Adressen außerhalb der lokalen Netze, werden somit an den Internet-Gateway weitergeroutet.

3.3.3 Internet-Gateway

Ein Rechner mit Windows-XP-Betriebssystem im Backbone-Netz leitet Anfragen ins LAN der TU Graz und in weiterer Folge ins Internet weiter. Damit sichergestellt ist, dass Antwort-Pakete ins 192.168.3.0/24-Netz den Weg über den DVB-T-Vorwärtskanal nehmen und damit vom IP/DVB-Gateway entsprechend verarbeitet werden, ist wiederum ein manueller Eintrag in der Routingtabelle des Internet-Gateways nötig. Mit der Eingabe von

```
route ADD 192.168.3.0 255.255.255.0 192.168.1.91
```

in die MS-DOS-Eingabeaufforderung wird dies erreicht.

3.3.4 DVB-T-Modulator

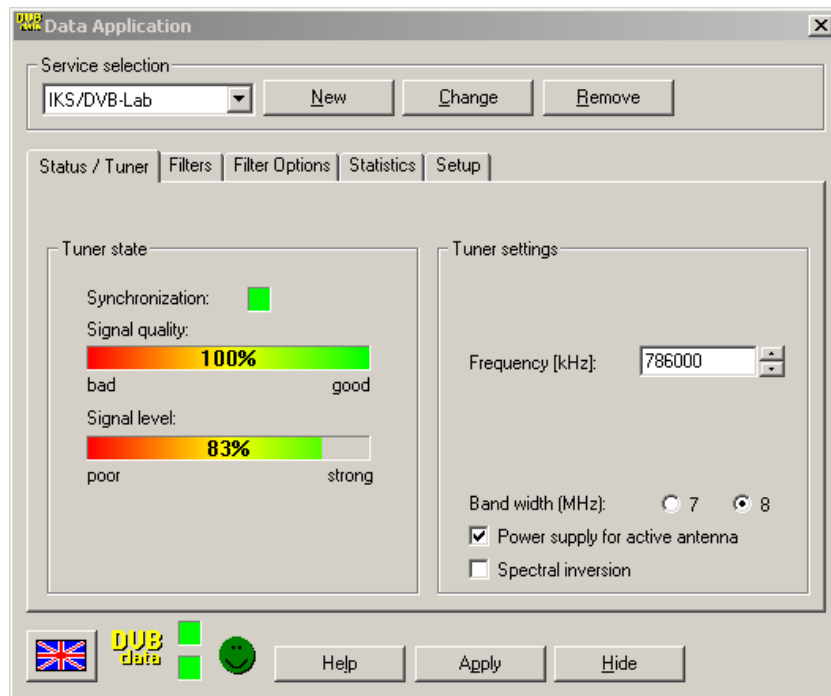
Als DVB-T-Modulator kommt ein im Harris DTV 660 eingebauter COFDM-Modulatoreinschub zum Einsatz. Dieser fügt dem Eingangssignal einen Fehlerschutz hinzu und moduliert es auf eine eingestellte Trägerfrequenz. Der DVB-T-Modulator wurde wie in Tabelle 3.1 ersichtlich konfiguriert. Aus den eingestellten Parametern resultiert eine Netto-Bitrate (abzüglich Fehlerschutz) von 16,588 MBit/s. Damit für einen anschließenden Freifeldaufbau das DVB-T-Sendesignal auch wirklich über eine Antenne abgestrahlt werden kann, bedarf es einer Sendegenehmigung seitens des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, da DVB-T-Sendeanlagen im lizenzierten Band senden. Da eine Sendegenehmigung für die Frequenz 786 MHz vorliegt, entspricht Kanal 60 im UHF-Band V, wird diese im Modulator eingestellt.

COFDM Modus	Modulation	Coderate	Guard Interval	Bitrate
8k-FFT	16-QAM	3/4	1/8	16,588 MBit/s

Tabelle 3.1: Eingestellte Parameter am DVB-T Modulator und resultierende Bitrate

3.3.5 Client mit DVB-T-Set-Top-Box

Ein Benutzer benötigt zum Empfang von IP-basierten DVB-Datendiensten eine geeignete DVB-T-Set-Top-Box. Als Empfangsbox für den Versuchsaufbau kommt eine Hauppauge DVB-2000t zum Einsatz, welche über ein USB-Kabel mit dem Rechner verbunden ist. Diese bietet neben dem Empfang von digitalen, terrestrischen Fernsehinhalten auch die Möglichkeit, Datendienste zu verarbeiten. Dies geschieht mit Hilfe einer Datenapplikation, welche neben den notwendigen Treibern installiert werden muss (Anmerkung: Treiber nur

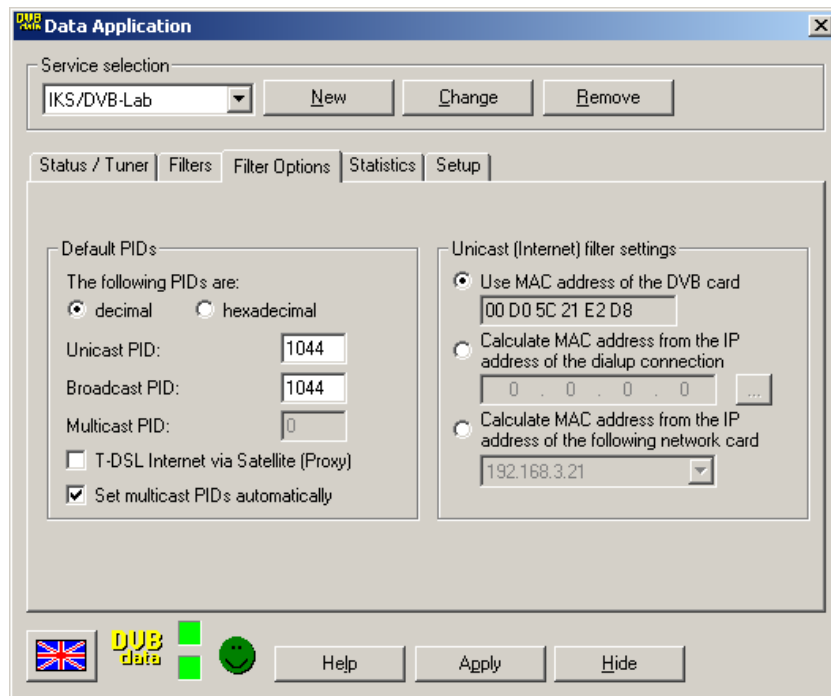
Abbildung 3.4: Datenapplikation *DVB Data Control* – Tuner-Status

für Windows-Systeme erhältlich). Bei der Installation des Geräts wird ein zusätzlicher Netzwerkadapter Virtual STB-S/-C/-T Network Adapter installiert, der die empfangenen Datenpakete an das Betriebssystem weiterleitet. Dieser Netzwerkadapter wird mit einer IP-Adresse im DVB-Broadcast-Netz konfiguriert (192.168.2.21) und dient lediglich dem Empfang von Daten. Über diese Netzwerkschnittstelle werden keine Daten gesendet.

Da die Daten nicht über ein IP-basiertes Netzwerk empfangen werden, sondern über DVB-Broadcasting, müssen in der Datenapplikation *DVB Data Control* weitere Einstellungen vorgenommen werden:

Der Tuner wird auf die Sendefrequenz des DVB-T-Senders eingestellt. In diesem Falle wurde eine Frequenz von 786 MHz eingestellt. Die benötigte Kanal-Bandbreite des Signals muss ebenfalls eingestellt werden, es handelt sich um einen 8 MHz breiten Kanal. Der Tuner-Status zeigt die empfangene Signalqualität sowie den Signalpegel als Prozentwert an. Ein Screenshot der Datenapplikation ist in Abbildung 3.4 zu sehen.

Damit die Datenapplikation die für den Empfänger relevanten Datenpakete aus dem MPEG-2-Transportstrom herausfiltern kann, müssen entsprechende Filter konfiguriert werden. Da die vom IP/DVB-Gateway gesendeten Daten in den MPEG-2-Transportstrom mit der PID 1044 gekapselt werden, wird die PID 1044 konfiguriert. Um auf der Sicherungsschicht (ISO/OSI Layer 2) Datenpakete zustellen zu können, muss die Ziel-MAC-Adresse mit der MAC-Adresse des Empfängers übereinstimmen, da ansonsten die Pakete bereits auf Layer 2 verworfen werden. Auf welche MAC-Adresse gefiltert werden soll, muss

Abbildung 3.5: Datenapplikation *DVB Data Control* – Filter-Options

ebenfalls konfiguriert werden. Nach der Konfiguration der Datenapplikation verhält sich der DVB-Empfänger wie eine normale Netzwerkkarte. Abbildung 3.5 zeigt die eingestellten Parameter.

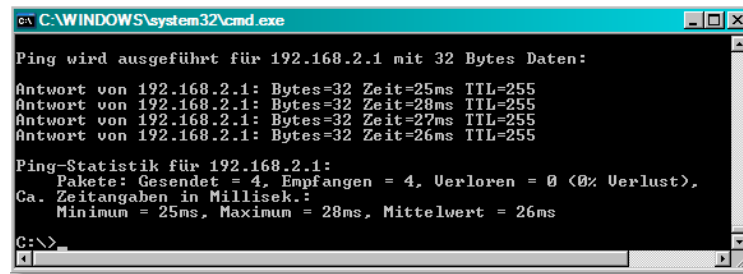
Für den Retourkanal wird die eingebaute Netzwerkkarte des Rechners mit einer IP-Adresse des Retourkanal-Netzes (192.168.3.21) konfiguriert. Da das DVB-Broadcast-Netz nicht über dieselbe Netzwerkschnittstelle erreicht werden kann, an der die Daten ankommen, ist ein manueller Eintrag in der Routingtabelle des Betriebssystems notwendig. Der Befehl

```
route ADD 192.168.2.0 MASK 255.255.255.0 192.168.3.1
```

fügt einen Eintrag in die Routingtabelle hinzu. Dieser besagt, dass Daten, die für das Netzwerk 192.168.2.0 bestimmt sind, den Weg über den Router mit der Next-Hop-IP-Adresse 192.168.3.1 nehmen sollen.

3.4 Erster Funktionstest

Mit Hilfe des in jedem Betriebssystem integrierten Netzwerk-Tools Ping kann die korrekte Funktion des Aufbaus getestet werden. Dies betrifft mit der Bitübertragungs-, Sicherungs- und Vermittlungsschicht die untersten drei Schichten des ISO/OSI-Schichtenmodells. Dabei wird überprüft, ob ein bestimmter Host in einem Netzwerk erreichbar ist und welche



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Ping wird ausgeführt für 192.168.2.1 mit 32 Bytes Daten:
Antwort von 192.168.2.1: Bytes=32 Zeit=25ms TTL=255
Antwort von 192.168.2.1: Bytes=32 Zeit=28ms TTL=255
Antwort von 192.168.2.1: Bytes=32 Zeit=27ms TTL=255
Antwort von 192.168.2.1: Bytes=32 Zeit=26ms TTL=255
Ping-Statistik für 192.168.2.1:
    Pakete: Gesendet = 4, Empfangen = 4, Verloren = 0 (0% Verlust),
    Ca. Zeitangaben in Millisek.:
        Minimum = 25ms, Maximum = 28ms, Mittelwert = 26ms
C:\>

```

Abbildung 3.6: Antwort und RTT-Zeit bei kabelgebundenem Retourkanal

Zeit das Routing hin und wieder zurück dafür beansprucht. Dazu sendet Ping ein ICMP-Echo-Request-Paket an einen Zielhost, der wiederum mit einem ICMP-Echo-Reply-Paket antwortet, sofern dieser erreichbar ist.

Das Resultat eines Pings vom Client an das DVB-Interface des IP/DVB-Gateways ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Die gemessene Zeit, die sogenannte Round-Trip-Time (RTT), beläuft sich auf 25 bis 28 ms. Dieser relativ hohe Wert für die Latenz begründet sich in der DVB-T-Vorwärtskanalstrecke, unter anderem durch den erhöhten Verarbeitungsaufwand des Einkapselungsvorgangs der IP-Pakete in einen MPEG-2-Transportstrom.

3.5 Erweiterung des Retourkanals um WLAN

Im nächsten Schritt wurde der Retourkanal um die WLAN-Technologie erweitert und damit der kabelgebundene Retourkanal ersetzt. Ebenso wurde dem Retourkanal-Netz ein weiterer Client hinzugefügt, um anschließende Messungen an verschiedenen Endgeräten durchführen zu können. Das Gesamtsystem mit erweitertem Retourkanal ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Bei den im Retourkanal eingesetzten WLAN-Komponenten handelt es sich um drei WLAN-Access-Points der Firma Compex. Diese Hochleistungs-Access-Points bieten zahlreiche Einstellungsmöglichkeiten, unter anderem wahlweise den Betrieb im 802.11a-Modus (5 GHz) oder im 802.11b/g-Modus (2,4 GHz). Näheres ist dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Lokaler Retourkanal via 802.11g-Modus (2,4 GHz)

Die Clients (handelsübliche Notebooks) sind über deren eingebaute WLAN-Netzwerkkarte mit dem Access-Point *AP 1* verbunden. Bei dieser Funkverbindung handelt es sich um eine 802.11g-WLAN-Verbindung, bei der die Übertragung im 2,4-GHz-ISM-Band verschlüsselt stattfindet. Dabei kommt die Verschlüsselungsmethode Wi-Fi Protected Access (WPA) zum Einsatz. Der Access-Point arbeitet im Modus *Access Point Mode*, es findet daher ausschließlich eine Client-zu-Access-Point-Kommunikation statt (siehe Kapitel 2.2.2). Durch Auswahl der Option *Smart Select* im Konfigurationsmenü des Access-Points wird die Wahl des Funkkanals vom Access-Point durchgeführt. Im Falle von Störungen durch andere Geräte, welche auf derselben Frequenz senden, wechselt der Access-Point damit

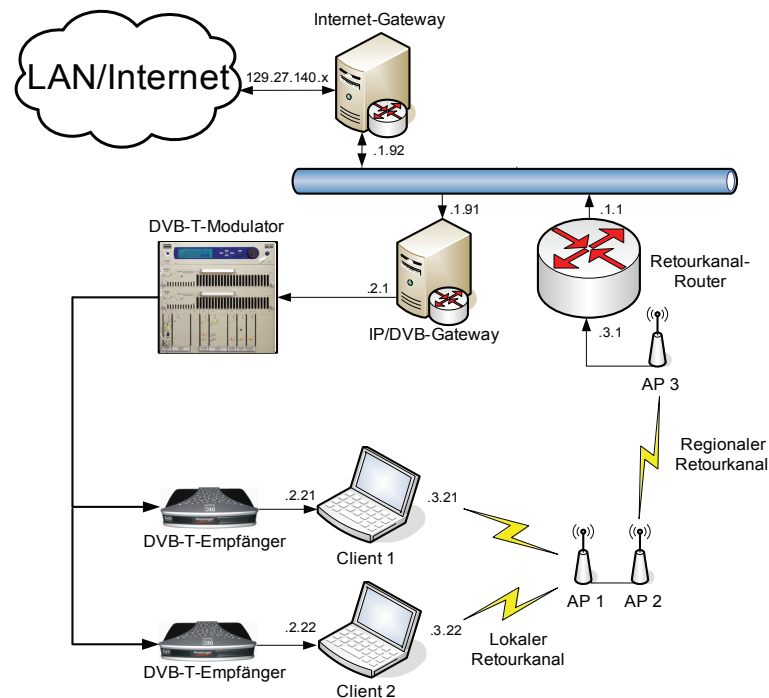


Abbildung 3.7: Laboraufbau mit WLAN im Retourkanal

automatisch den Kanal. Der Access-Point *AP 1* fungiert ebenso als DHCP-Server. Damit erhalten die Clients die notwendigen IP-Adressen automatisch vom Access-Point bei der Verbindungsherstellung. Dem Client 1 wird die IP-Adresse 192.168.3.21, Client 2 die IP-Adresse 192.168.3.22 zugewiesen.

Diese Verbindung simuliert gleichzeitig die Verbindung der Benutzer zu einer lokalen Relais-Station.

Regionaler Retourkanal via 802.11a-Modus (5 GHz)

Bei der Verbindung von *AP 2* zu *AP 3* handelt es sich um eine 802.11a-WLAN-Verbindung im 5-GHz-Bereich. Da diese Access-Points im Freifeldaufbau zur Herstellung einer Richtfunkverbindung dienen, werden sie als Punkt-zu-Punkt-Verbindung (Wireless Distribution System (WDS) Bridge) konfiguriert (siehe Kapitel 2.2.2). Dabei arbeitet *AP 2* im *Root Access Point Mode*, *AP 3* im *Transparent Client Mode* (beide Bezeichnungen sind herstellerspezifisch). Compex als Hersteller der Access-Points sieht diese Konfiguration zur Umsetzung einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung vor. Im *Transparent Client Mode* werden die Daten transparent über die WDS Bridge übertragen, das heißt die MAC-Adressen der Pakete der angeschlossenen Geräte bleiben bei der Übertragung über die Bridge erhalten. In den anderen Client Modes benutzen alle angeschlossenen Geräte die selbe MAC-Adresse zur Kommunikation mit dem Root Access Point.

Wiederum wird per Option *Smart Select* die Auswahl des Kanals dem Access-Point überlassen. Da der Abstand beider Access-Points im Laboraufbau sehr gering ist, reicht eine eingestellte Sendeleistung von 1 dBm aus, um die (theoretische) maximale Übertragungsgeschwindigkeit von 54 MBit/s dauerhaft zu erzielen.

Diese Verbindung simuliert die Richtfunkstrecke von einer lokalen Relais-Station zurück zum Internet-Service-Provider. Aufgrund der geringen Entfernung beider Access-Points im Labor findet die Übertragung in den Laborversuchen ungerichtet statt. Die Vorteile einer WLAN-Richtfunkstrecke im 5-GHz-Frequenzbereich wurden bereits in Kapitel 2.2.3 genannt. Alternativ wäre hier der Einsatz von Free Space Optics (FSO) eine Möglichkeit um Nutzeranfragen mit höheren Datenraten an den Internet-Service-Provider zurückzusenden. Auch wäre ein hybrider Ansatz für den Datentransport denkbar, bei dem ein System bei Ausfall des anderen die Weiterleitung des Datenverkehrs übernimmt oder per Load Balancing der Datenverkehr auf beide Systeme verteilt wird [MLG07] [Hen09].

4 Messungen der erzielbaren Verbindungsqualität im Labor

In diesem Kapitel werden die Messungen dokumentiert, welche im Labor anhand des in Abbildung 4.1 dargestellten Aufbaus durchgeführt wurden. Dazu wurde der schon bestehende Laboraufbau um einen Mess-Rechner (in weiterer Folge als Test-Server bezeichnet) im Backbone-Netz erweitert. Sämtliche Messungen beinhalten die Verwendung dieses Test-Servers. Die durch die Labormessungen erhaltenen Ergebnisse stellen erste Referenzwerte dar und dienen gleichzeitig dazu mögliche Fehler bzw. Probleme im Aufbau bereits im Vorfeld zu erkennen.

4.1 Grundlegendes zu den Messungen

Bevor die Labormessungen und deren Ergebnisse im Einzelnen beschrieben werden, erfolgt zunächst eine kurze Beschreibung des eingesetzten Tools. Außerdem werden die zur Beurteilung der Verbindungsqualität erfassten Messparameter erläutert.

4.1.1 Messwerkzeug

Für die Messungen der erzielbaren Verbindungsqualität wurde das Open-Source-Tool `iperf` verwendet. Dieses kommandozeilen-basierte Netzwerk-Tool wird sehr häufig zu Performance-Messungen in verschiedensten drahtgebundenen aber auch drahtlosen Netzwerken eingesetzt.

Bei Auswahl des UDP-Protokolls für die Messung können neben dem UDP-Durchsatz ebenso Paketverlusten (Packet Loss) sowie Jitter gemessen werden. Bei Verwendung des TCP-Protokolls können Durchsatzraten bei verschiedenen Paketgrößen und Empfangsfenstergrößen (Receive Window Size) gemessen werden. Für die Messung wird ein Rechner als *Client*, der andere als *Server* deklariert. Der Datenfluss erfolgt standardmässig vom *Client* zum *Server*. `Iperf` existiert für alle gängigen Betriebssysteme wie Windows, Linux, Mac OS X, etc. Mit `jperf` steht sogar eine graphische Benutzeroberfläche für `iperf` zur Verfügung, welche neben den Zahlenwerten auch Plots der Messwerte liefert [Ipe09].

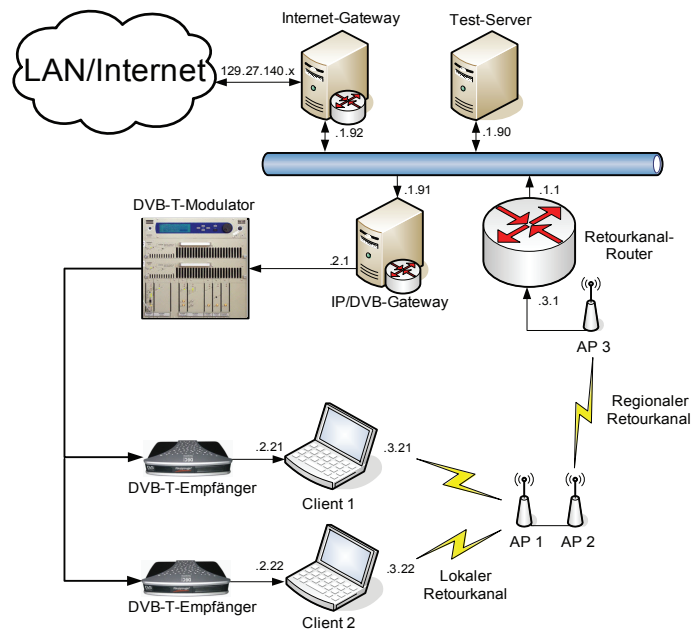


Abbildung 4.1: Laboraufbau für Messungen

4.1.2 Messparameter

Zur Beurteilung der Verbindungsqualität des hybriden Aufbaus werden folgende Parameter messtechnisch erfasst:

Verzögerungszeit (Round Trip Time): gibt die Zeit an, die ein Datenpaket zum Zielrechner und wieder zurück benötigt. In der vorliegenden Arbeit ist mit Verzögerungszeit stets die Round Trip Time gemeint. Sollte mit der Verzögerung die Einweglatenz (One Way Delay) gemeint sein, so wird explizit darauf hingewiesen.

UDP-Durchsatz: Bei Verwendung des verbindungslosen Netzwerkprotokolls UDP für die Messung mit iperf kann die Paketverlustrate (Packet Loss) bei einer bestimmten UDP-Sendedatenrate bestimmt werden. Zu hohe Paketverlusten können beispielsweise bei VoIP-Gesprächen zu einer verminderten Gesprächsqualität führen. Außerdem können zu große Paketverluste auf einem Übertragungskanal bei Verwendung des TCP-Protokolls im Falle einer gesicherten Datenübertragung zu TCP-Retransmissions führen. Datenpakete müssen erneut angefordert werden und dies senkt den Datendurchsatz erheblich. UDP-Messungen können daher ebenso bei der Fehlersuche nützlich sein.

TCP-Durchsatz: Gemessen wird die Datenmenge pro Zeiteinheit bei einer gesicherten Übertragung. Bei einer Datenübertragung, welche TCP als Transportprotokoll verwendet, wird der gesicherte Austausch der Information garantiert. Dies wird dadurch erreicht, dass der Empfänger den korrekten Erhalt der Datenpakete mittels Acknowledgements zurück an den sendenden Kommunikationspartner bestätigt.

Jitter: Als Jitter bezeichnet man die zeitliche Schwankung der Verzögerung von Datenpaketen. In diesem Fall bezeichnet die Verzögerung die Verzögerungszeit in eine Richtung (One Way Delay). Die Berechnung des Jitters erfolgt bei iperf durch den iperf-Server, wie im Real Time Transport Protocol (RTP) in RFC 1889 spezifiziert [Ipe09]. Störend wirken sich zu hohe Werte für den Jitter vor allem bei jitter-sensitiven Anwendungen wie VoIP oder Video-Streaming aus. Diese Anwendungen versuchen mit sogenannten Jitter-Buffern diesen negativen Effekt zu minimieren. Dies führt jedoch wiederum zu zusätzlichen Verzögerungen.

Die Messungen des Jitters erfolgen jedoch erst im Freifeldaufbau und werden in Kapitel 5.2.1 für den DVB-T-Vorwärtskanal bzw. in Kapitel 5.3.1 für den WLAN-Retourkanal näher erläutert.

4.2 Verzögerungszeit (Round Trip Time)

Ein wichtiger Parameter in Computer-Netzwerken ist die sogenannte Round Trip Time (RTT). Diese gibt an, wie lange ein Paket vom Sender zum Empfänger und wieder zurück benötigt. Limitierende Faktoren sind unter anderem die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie der Verarbeitungsaufwand in allen beteiligten Komponenten wie Switches oder Routern, welche bei der Weiterleitung an die Zieladresse eine Rolle spielen.

4.2.1 Messung der RTT für den hybriden Aufbau

Zur Bestimmung der RTT wird mittels Ping ein ICMP-Echo-Request-Paket vom Client 2 an den Test-Server gesendet. Dieser antwortet mit einem ICMP-Echo-Reply-Paket, die gemessene Zeit kann am Client 2 abgelesen werden. Um die benötigte Zeit für verschiedene Paketgrößen ermitteln zu können, wurde die Messung dreimal mit verschiedener Größe des Nutzlastanteils (= Payload) durchgeführt.

Die blaue Kurve in Abbildung 4.2 zeigt die gemessenen RTTs bei Paketgrößen von 32, 512 und 1472 Byte des ICMP-Pakets. Die Werte zwischen 27 ms und 36 ms ergeben sich jeweils als Mittelwerte aus 60 gesendeten Ping-Paketen je Paketgröße. Es ist eine leichte Erhöhung der Verzögerungszeit für größere Pakete festzustellen, welche durch einen vergrößerten Verarbeitungsaufwand in allen beteiligten Komponenten erklärt werden kann. Diese relativ hohen Werte der Verzögerungszeit ergeben sich technologiebedingt für Kommunikationssysteme, welche DVB-T beinhalten. Der Grund hierfür ist in der senderseitig notwendigen Einkapselung der IP-Daten in einen MPEG-2-Transportstrom sowie deren anschließende Entkapselung auf der Empfängerseite zu suchen. Hardwaretechnische Einschränkungen seitens der DVB-T-Technologie liegen jedenfalls nicht vor.

In [GKX⁺05] wird die Performance eines hybriden DVB-T-Netzwerkes mit verschiedenen Retourkanaltechnologien untersucht. Dabei dient ebenso DVB-T als Vorwärtskanaltechnologie. Als Retourkanaltechnologien werden unter anderem WLAN 802.11b, Public Switched Telephone Network (PSTN) und Global System For Mobile Communications (GSM)

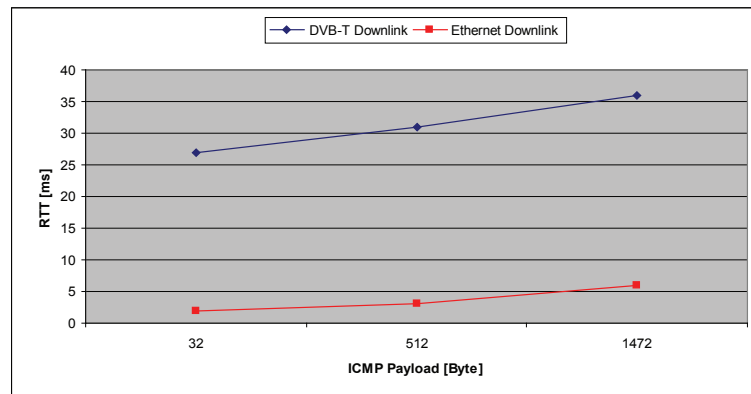


Abbildung 4.2: Verzögerungszeiten (RTTs) gemessen an Client 2 - Laboraufbau

eingesetzt. Die Messergebnisse bezüglich der RTT zeigen, dass bei letzteren wesentlich höhere Verzögerungszeiten auftreten. Im Beispiel von PSTN als Retourkanaltechnologie ergeben sich RTTs von ca. 130 ms. Im Falle von GSM im Retourkanal werden RTTs von 400 ms gemessen. Im Vergleich dazu sind die Verzögerungszeiten bei Messung mit WLAN im Retourkanal ähnlich niedrig jener, welche für diesen Aufbau gemessen wurden. Mit WLAN 802.11b beträgt die RTT abhängig von der gewählten Paketgröße zwischen 40 und 54 ms. Vergleicht man verschiedenste Retourkanaltechnologien miteinander, so erreicht man mit WLAN in Bezug auf die benötigte Verzögerungszeit die beste Performance.

4.2.2 Anteil der durch DVB-T verursachten zusätzlichen Verzögerung

Um den Anteil der durch den Einsatz von DVB-T verursachten zusätzlichen Verzögerung für diesen Laboraufbau zu bestimmen, wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt, in welcher der DVB-T-Vorwärtskanal durch eine einfache Verbindung mittels Ethernetkabel ersetzt wurde. Da nun sowohl die Einkapselung der IP-Daten in einen MPEG-2-Transportstrom durch den IP/DVB-Gateway sowie deren anschließende Entkapselung empfangsseitig wegfällt, ergeben sich nun für den selben Aufbau Verzögerungszeiten zwischen 2 und 6 ms. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4.2 durch die rote Kurve dargestellt. Daraus ergibt sich je nach Paketgröße eine zusätzliche Verzögerung bedingt durch DVB-T als Vorwärtskanaltechnologie von ca. 25 bis 30 ms.

Durch den Einsatz von DVB-T als Vorwärtskanaltechnologie ergeben sich also zusätzliche Verzögerungen, deren Einfluss auf die Performance latenzzeitkritischer Anwendungen wie beispielsweise VoIP beachtet werden muss. Ebenso stellt die RTT bei TCP-basierten Diensten eine wichtige Metrik dar.

4.3 Maximale Durchsatzraten

In diesem Abschnitt werden Messungen zu den maximal erreichbaren Durchsatzraten dokumentiert. Die Messungen der maximalen Durchsatzraten, sowohl des UDP- als auch des TCP-Durchsatzes, zeigen, welcher Datendurchsatz mit den verwendeten Komponenten in der Praxis erreicht werden kann. Zur Ermittlung des Durchsatzes wird *iperf* verwendet, welches in Kapitel 4.1.1 beschrieben ist. Es erfolgen Messungen zur Bestimmung des UDP- und TCP-Durchsatzes sowohl für den DVB-T-Vorwärtskanal als auch für den WLAN-Retourkanal.

Zunächst werden Messungen zum erreichbaren Durchsatz mit dem UDP-Protokoll durchgeführt. Diese Messungen sind vorab wichtig, um zu erkennen, ob es zu Paketverlusten im Netzwerk kommt. Ein Übertragungskanal, auf dem sehr viele Pakete verloren gehen, beispielsweise aufgrund schlechter Empfangsbedingungen oder Überlast im Netzwerk, würde bei Verwendung von TCP-basierten Diensten keine gute Performance liefern. Die Überprüfung der Paketverlustrate mittels UDP-Messung kann bei TCP-Durchsatzmessungen, welche unter der erwarteten Performance bleiben, sehr hilfreich sein. Das Tool *iperf* ermittelt bei Verwendung von UDP sowohl den Durchsatz als auch die Paketverlustrate.

4.3.1 UDP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals

Um den erreichbaren UDP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals bestimmen zu können, wird *iperf* am Client 2 als *Server* und am Test-Server als *Client* gestartet. Die Messungen erfolgen mittels UDP-Paketen mit einer Größe der Nutzlast (Payload) von 1470 Byte. Zusammen mit 8 Byte für den UDP-Header, 20 Byte für den IPv4-Header, sowie 14 Byte für den Ethernet-Header ergeben sich 1512 Byte große Ethernet-Frames (ohne die 4 Byte Frame Check Sequence von Ethernet).

Beginnend mit einer eingestellten UDP-Sendedatenrate von 1000 kBit/s wird die Sendedatenrate solange erhöht bis es zu Paketverlusten am Empfänger kommt. Jede Messung erfolgt für die Dauer von 60 Sekunden. Tabelle 4.1 fasst die erhaltenen Messergebnisse zusammen. Es ergibt sich eine gemessene maximale UDP-Durchsatzrate von 4800 kBit/s. Bis zu dieser Sendedatenrate kommt es zu keinem einzigen Paketverlust. Das Netzwerk kann die Datenmenge, welche der *iperf*-Prozess erzeugt, leicht verarbeiten. Bei Sendedatenraten mit mehr als 4800 kBit/s kommt es jedoch zum Absturz der DVB-T-Datenapplikation.

Hier soll jedoch angemerkt werden, dass der erreichte UDP-Durchsatz lediglich durch die Verwendung dieser speziellen DVB-T-Set-Top-Box und dessen Datenapplikation auf einen maximalen UDP-Durchsatzwert von 4800 kBit/s beschränkt ist. Die Spezifikation des DVB-T-Standards erlaubt jedenfalls auch höhere Datenraten (siehe Tabelle 2.1 aus Kapitel 2.1.2). Für die weiteren Messungen stellt dieses Messergebnis jedenfalls einen wichtigen Richtwert dar.

Messung	Sendedatenrate [kBit/s]	UDP-Durchsatz [kBit/s]	Paketverlustrate
1	1000	1000	0/5103(0%)
2	2000	2000	0/10206(0%)
3	3000	2999	0/15307(0%)
4	4000	3999	0/20406(0%)
5	4500	4499	0/22962(0%)
6	4800	4786	0/24490(0%)

Tabelle 4.1: UDP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals (Labormesswerte)

Messung	Sendedatenrate [kBit/s]	UDP-Durchsatz [kBit/s]	Paketverlustrate
1	1000	1000	0/5105 (0%)
2	5000	4967	0/25340 (0%)
3	10000	9999	0/51010 (0%)
4	15000	14893	3/75996 (0.0039%)
5	20000	19960	2/101864 (0.002%)
6	23000	22693	1/115795 (0.00086%)
7	25000	24653	5/125797 (0.004%)
8	30000	23690	4/120886 (0.0033%)

Tabelle 4.2: UDP-Durchsatz des WLAN-Retourkanals (Labormesswerte)

4.3.2 UDP-Durchsatz des WLAN-Retourkanals

Zur Messung des erreichbaren UDP-Durchsatzes im WLAN-Retourkanal wird wiederum die eingestellte Sendedatenrate kontinuierlich erhöht bis es zu Paketverlusten in der Übertragung kommt bzw. keine weitere Erhöhung des Durchsatzes mehr erreicht werden kann.

Für die Messung wird nun der iperf-Prozess als *Client* am Client 1 gestartet und als *Server* am Test-Server. Das Ergebnis der Messungen für den WLAN-Retourkanal ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Konkret ergibt sich für diesen Aufbau mit der verwendeten Hardware ein maximaler UDP-Durchsatz von ca. 25 MBit/s. Dieser Wert wird jedoch nur für den Client 1 erreicht. Bei gleicher Messung mit Client 2 wird ein maximaler Durchsatz von nur ca. 19 MBit/s erreicht. Der iperf-Prozess konnte am Client 2 aus nicht nachvollziehbaren Gründen keine höheren Datenraten erzeugen. Da bei den Messungen ideale Empfangsbedingungen für die WLAN-Access-Points vorlagen und das Netzwerk durch keinen anderen Netzwerkverkehr ausgelastet wurde, blieb die Paketverlustrate auch für höhere Datenraten weit unter einem Prozent.

4.3.3 TCP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals

Wie die Messergebnisse in Kapitel 4.2 zeigen, ergeben sich für diesen Aufbau relativ hohe Verzögerungszeiten. Je nach eingestellten Modulationsparametern liefert ein DVB-T-Vorwärtskanal außerdem Nettodatenraten im Bereich mehrerer MBit/s. Ein Netzwerk,

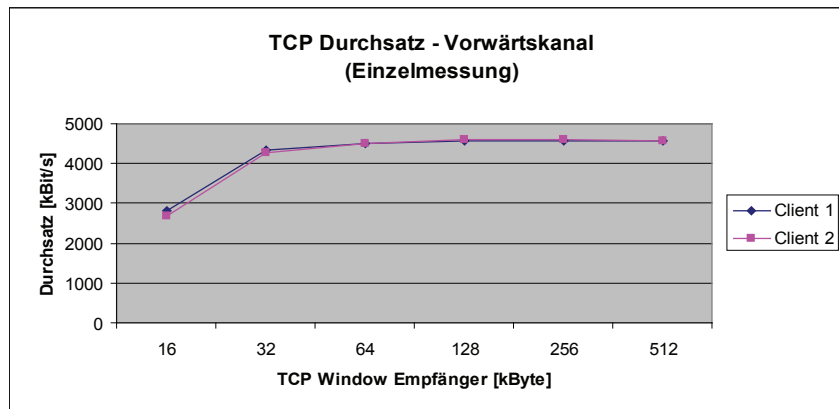


Abbildung 4.3: TCP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal bei Einzelmessung (Labormesswerte)

welches ein hohes Verzögerungs-Bandbreiten-Produkt aufweist, wird häufig als Long Fat Network (LFN) bezeichnet. Dieses Produkt aus Verzögerung und Bandbreite ist für den TCP-Durchsatz sehr wichtig, da es jene Datenmenge definiert, welche gesendet werden darf, ohne auf die Bestätigung des Empfängers warten zu müssen [Wik09a]. Die TCP Window Size des Empfängers sowie das Congestion Window des Senders limitieren diese Datenmenge, bestimmen also, wie gefüllt die Pipe ist. Daher erfolgen die Messungen des TCP-Durchsatzes bei verschiedenen Größen der TCP Window Size des Empfängers. Gemessen wurde bei einer TCP Window Size des Empfängers zwischen 16 und 512 kByte. Der TCP-Durchsatz wurde für die Dauer von 60 Sekunden je Messung bestimmt.

Dabei muss angemerkt werden, dass das Advertised-Window-Feld im Header des TCP-Protokolls als 16-Bit-Wert definiert ist und daher nur Fenstergrößen von maximal 64 kByte erlaubt. Diese Einschränkung wurde mit der TCP Window Scale Option, welche in RFC-1323 (vergleiche mit [RFC09]) definiert ist, behoben und erlaubt nun Fenstergrößen von bis zu einem GByte. Diese Option muss im jeweiligen Betriebssystem aktiviert sein.

Abbildung 4.3 zeigt den erreichten TCP-Durchsatz für beide Clients bei Einzelmessung. Mit den getesteten DVB-T-Set-Top-Boxen ergeben sich maximale TCP-Durchsatzraten von ca. 4,5 MBit/s. Weiters ist der Grafik zu entnehmen, dass eine TCP Window Size des Empfängers von 16 kByte für dieses Netzwerk und dessen Wert für die RTT nicht ausreicht, um den maximalen Durchsatz zu erzielen.

Das Ergebnis (in Abbildung 4.4 dargestellt) bei gleichzeitiger Messung beider Clients liefert einen maximalen TCP-Durchsatz von ca. 4 MBit/s je Client. Dieser Wert liegt minimal unter jenem bei der Einzelmessung. Dies liegt daran, dass der IP/DVB-Gateway nur über eine 10 MBit/s Ethernet-Karte verfügt, dessen Nettodurchsatz bei rund 8 MBit/s liegt. Für den DVB-T-Vorwärtskanal ergibt sich daher ein Gesamtdurchsatz von 8 MBit/s, welcher nicht überschritten werden kann.

Abschließend zeigt Abbildung 4.5 den erreichbaren TCP-Durchsatz mit den entsprechenden Uplink-Datenraten. Bei den Uplink-Daten handelt es sich um TCP-Acknowledge-

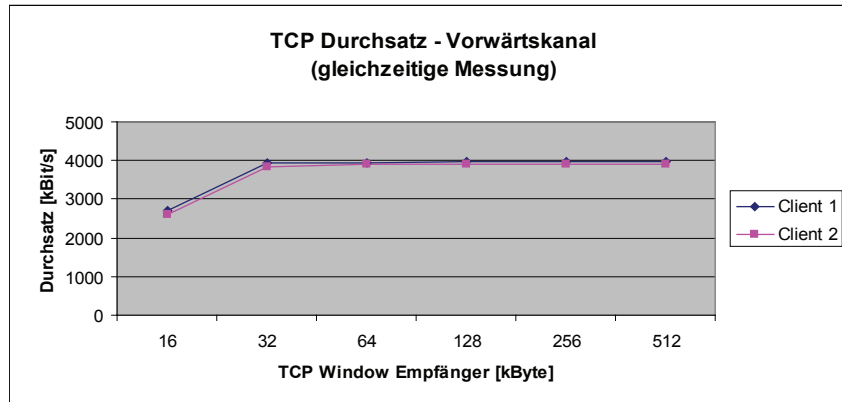


Abbildung 4.4: TCP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal bei gleichzeitiger Messung (Labor-messwerte)

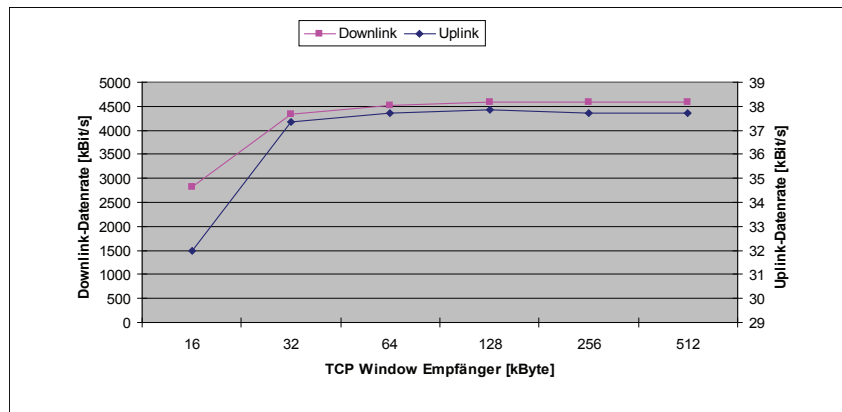


Abbildung 4.5: Downlink-Datenraten im DVB-T-Vorwärtskanal mit entsprechenden Uplink-Datenraten im WLAN-Retourkanal (Labormesswerte)

ments, welche für die zuverlässige Übertragung der Daten notwendig sind. Dieses Messergebnis zeigt, dass mit sehr geringem Upload-Traffic sehr hohe Downlink-Datenraten erreicht werden können. Beispielsweise reicht eine Uplink-Datenrate von 37,9 kBit/s aus, um im Downlink eine Datenrate von ca. 4,5 MBit/s zu erhalten. Die Kapazität des WLAN-Retourkanals bietet jedenfalls reichlich Bandbreite hierfür. Entsprechend viele Teilnehmer könnten sich die Kapazität des WLAN-Retourkanals teilen und trotzdem im Downlink Datenraten von mehreren MBit/s erreichen.

4.3.4 TCP-Durchsatz des WLAN-Retourkanals

Das Ergebnis der TCP-Durchsatzmessungen des WLAN-Retourkanals ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Client 1 erreicht einen maximalen TCP-Durchsatz von ca. 24 MBit/s, was aufgrund der Ergebnisse der UDP-Durchsatzmessung aus Kapitel 4.3.2 zu erwarten war. Mehr als 15 MBit/s konnte mit Client 2 nicht erreicht werden. Dies bestätigt jedenfalls

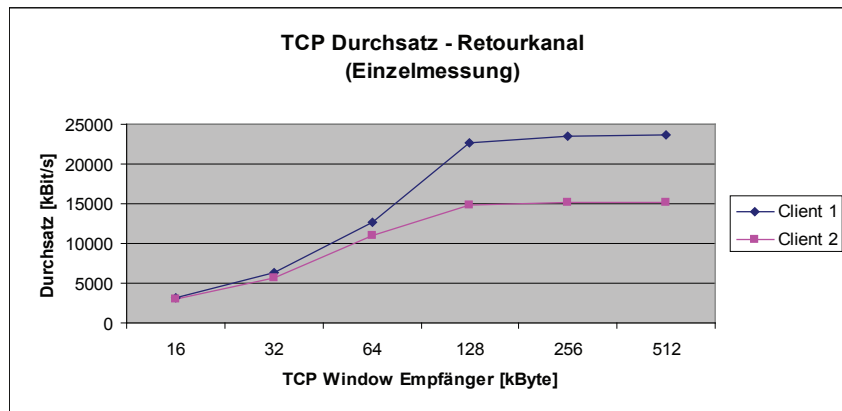


Abbildung 4.6: TCP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal bei Einzelmessung (Labormesswerte)

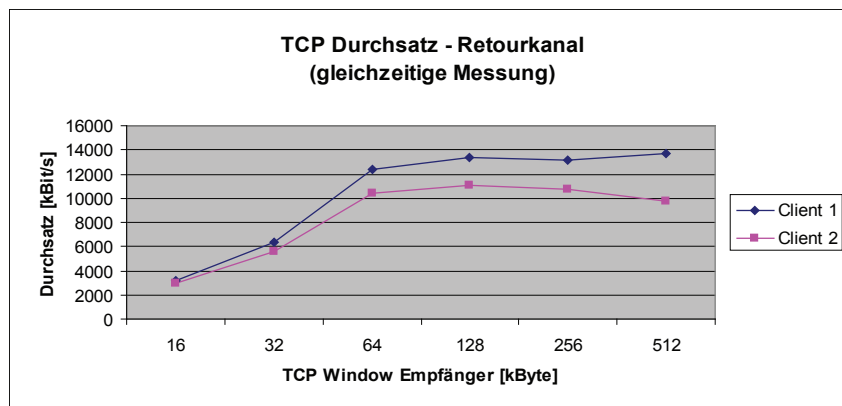


Abbildung 4.7: TCP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal bei gleichzeitiger Messung (Labormesswerte)

die Probleme welche bereits bei den UDP-Durchsatzmessungen für diesen Client festgestellt wurden. Das Ergebnis in Abbildung 4.7 zeigt, dass bei gleichzeitiger Messung die vorhandene Bandbreite entsprechend aufgeteilt wird. Der Einfluss der TCP Window Size des Empfängers ist im Vergleich zu den Vorwärtskanalmessungen noch gravierender, da die erreichbaren Datenraten in diesem Fall höher sind.

5 Messungen der erzielbaren Verbindungsqualität im Freifeld

Um Messergebnisse auch unter realen Bedingungen zu erhalten bzw. verschiedene Anwendungen wie das Browsen im Web (HTTP), VoIP oder Video-Streaming etc. in der Praxis testen zu können, wurde der Laboraufbau ins Freifeld übertragen. An der Struktur des Aufbaus sowie an der Funktionsweise ändert sich dabei nichts. Es sind lediglich die maximal erlaubten Strahlungsleistungen in den Frequenzbereichen für DVB-T im UHF-Band (786 MHz) bzw. WLAN (5 GHz) im Outdoor-Betrieb einzuhalten. Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Versuchsaufbaus im Freifeld.

5.1 Versuchsaufbau im Freifeld

Im Studienzentrum in der Inffeldgasse (Graz) befindet sich das Satellitenlabor des Instituts für Kommunikationsnetze und Satellitenkommunikation (IKS), in welchem sich weiterhin die Infrastruktur für das Backbone-Netz befindet. Auf dem Dach des Studienzentrums befindet sich sowohl der DVB-T-Sender als auch ein Teil der WLAN-Richtfunkstrecke (WLAN-Antenne, Access-Point). Als Standort für die Benutzer (Client-Rechner) dient das 2,7 km entfernte Observatorium am Lustbühel. Abbildung 5.1 zeigt den Blick vom Dach des Studienzentrums zur WLAN-Gegenstelle am Standort Lustbühel.

Die Daten, welche über den DVB-T-Vorwärtskanal auszusenden sind, werden nun nach der Modulation mittels eines RF-Power-Amplifiers verstärkt und über eine vertikale UHF-Sektorantenne von Kathrein abgestrahlt. Die Ausgangsleistung beträgt 200 Watt. Zusammen mit dem Gewinn der DVB-T-Sendeantenne darf hierbei laut Sendegenehmigung die maximale Strahlungsleistung (ERP) von 33 dBW in vertikaler Polarisationsrichtung nicht überschritten werden. Ein problemloser Indoor-Empfang des DVB-T-Signals am Standort der Benutzer ist jedoch nicht möglich, deshalb wurden die DVB-T-Empfangsantennen der Clients auf dem Dach des Observatoriums montiert.

Für die WLAN-Richtfunkstrecke des Retourkanals wurden die Access-Points in ein wetterfestes Außengehäuse verpackt und jeweils auf den Dächern des Observatoriums Lustbühel bzw. des Studienzentrums nahe der WLAN-Antennen montiert. Als Antennen für die Richtfunkstrecke dienen zwei Aluminium-Gitterspiegel, welche für den Frequenzbereich 5-6 GHz geeignet sind und einen Gewinn von ca. 31 dBi haben. Weitere Details zu den



Abbildung 5.1: Studienzentrum mit Blick auf die WLAN-Gegenstelle am Lustbühel (links), Observatorium Lustbühel (rechts)

Kennwerten der verwendeten WLAN-Antennen sind dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen.

Der grundsätzliche Aufbau im Freifeld entspricht jenem des Labors, die Konfiguration der verwendeten Komponenten ist ident. Eine Ausnahme bildet die verwendete Strahlungsleistung für die 5-GHz-WLAN-Richtfunkstrecke, welche auf die gesetzlich erlaubten Strahlungsleistungen in diesem Bereich angepasst werden musste (siehe dazu Kapitel 5.1.2). Die Entfernung der Clients zur lokalen Relais-Station entspricht dem 802.11g-Link und beträgt ca. 15 m. Als Übersicht dient Abbildung 5.2, welche eine schematische Darstellung des gesamten Freifeldaufbaus zeigt.

5.1.1 Berechnung des Link Budgets für den WLAN-Retourkanal

Für den Aufbau einer zuverlässigen Richtfunkstrecke ist die Berechnung des Link Budgets (Leistungsbilanz) wichtig. Dabei werden sämtliche in der Übertragungskette vorhandenen Komponenten (Sender, Empfänger), Gewinne (Antennengewinne), Verluste (Kabelverluste, Steckerverluste) sowie Dämpfungen (Freiraumdämpfung) berücksichtigt. Schließlich erhält man einen Wert für die Leistungsreserve (Link Margin), welcher sich aus der Addition bzw. Subtraktion dieser Kennwerte (in dB) ergibt [Lüd07].

Die Berechnung des Link Budgets erfolgt für die Sendefrequenz (f_s) von 5,5 GHz bei Freiraumausbreitungsbedingungen. Dies bedeutet, dass keine Hindernisse innerhalb der Fresnelzone sind. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger (D) beträgt 2700 Meter.

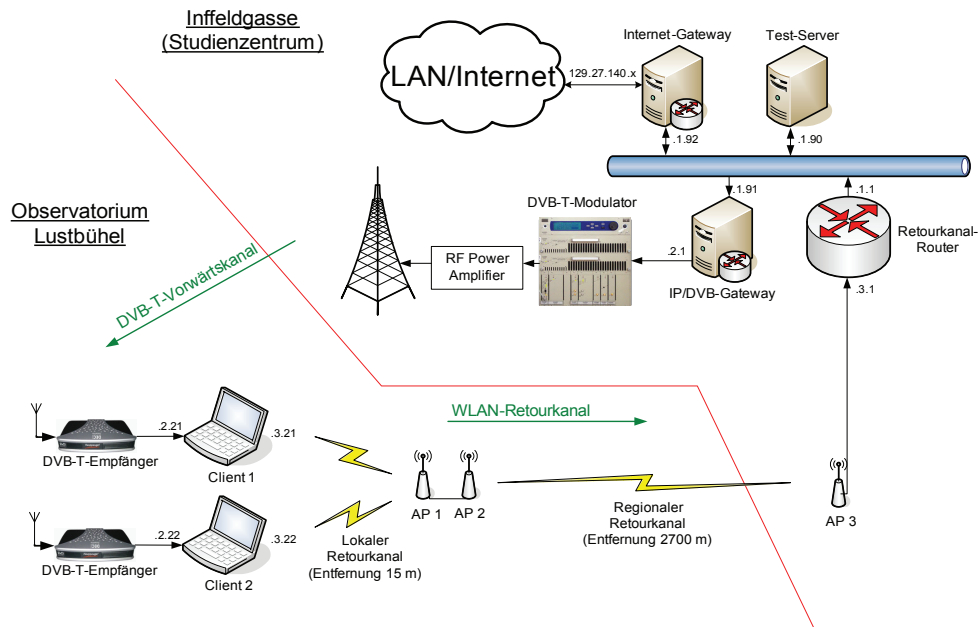


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des Freifeldaufbaus

Die gesetzlich erlaubte EIRP an der Sendeantenne beträgt 27 dBm, da der eingesetzte Access-Point den Mechanismus TPC nicht unterstützt (vgl. mit Tabelle 2.4). Die auf Sender- und Empfängerseite verwendeten Aluminium-Gitterspiegelantennen weisen einen maximalen Gewinn von ca. 31 dBi auf (G_{Ant1} , G_{Ant2}). Für die Zuleitungsverluste durch die Länge des Kabels sowie durch Steckverbindungen (a_{Kabel1} , a_{Kabel2}) wird ein Wert von 5 dB angesetzt. Die Empfindlichkeit des Empfängers (P_{Rx}), bei der der Access-Point mit einer maximalen Datenrate von 54 MBit/s arbeitet, beträgt laut Datenblatt -73 dBm (siehe Anhang).

Zunächst erfolgt die Berechnung der maximalen Sendeleistung, die am Sender-Access-Point eingestellt wird, um die gesetzlichen Vorgaben einzuhalten. Dabei darf die Ausgangsleistung des Senders plus Antennengewinn abzüglich Zuleitungsverlusten nicht mehr als 27 dBm betragen:

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Ant1} - a_{Kabel1} = 1 + 31 - 5 = 27 \text{ dBm} \quad (5.1)$$

Es ergibt sich eine maximale Ausgangsleistung des Senders P_{Tx} von 1 dBm.

Den aus verwendeter Sendefrequenz sowie vorliegender Entfernung zwischen Sender und Empfänger resultierenden Wert für die Freiraumdämpfung (Free Space Loss) erhält man aus folgender Berechnung:

$$a_{FSL}[dB] = -10 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \Pi \cdot r \cdot f_s}{c} \right)^2 \quad (5.2)$$

c ... Lichtgeschwindigkeit (300 000 000 m/s)
 r ... Entfernung zwischen Sender und Empfänger (m)
 f_s ... Sendefrequenz (Hz)

Nachdem nun alle Parameter bekannt sind, erfolgt die Berechnung der Leistungsreserve (Link Margin) in Tabelle 5.1 durch einfache Addition bzw. Subtraktion der entsprechenden Werte in dB.

Entfernung (D)	2700 m
Sendefrequenz (f_s)	5,5 GHz
Sendeleistung (P_{Tx})	1 dBm
Kabel- und Steckerverluste (a_{Kabel1})	-5 dBm
Gewinn Sendeantenne (G_{Ant1})	31 dBi
Freiraumdämpfung (a_{FSL})	-116 dB
Gewinn Empfangsantenne (G_{Ant2})	31 dBi
Kabel- und Steckerverluste (a_{Kabel2})	-5 dBm
Empfindlichkeit des Empfängers (P_{Rx})	73 dBm
EIRP	27 dBm
Leistungsreserve (Link Margin)	9 dB

Tabelle 5.1: Link Budget für den WLAN-Retourkanal in Anlehnung an [MSL08]

Als Ergebnis erhält man 9 dB für die vorhandene Leistungsreserve. Diese 9 dB bieten im Falle von Abschattungen durch Vegetation (Bäume) oder Störungen in Form von Umwelteinflüssen wie Regen etc. eine notwendige Leistungsreserve, damit die verwendeten Access-Points zu jeder Zeit in der Lage sind, die volle Datenrate zu unterstützen.

5.1.2 Verwendete Strahlungsleistungen

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 zu den WLAN-Standards erwähnt wurde, müssen für den Betrieb von WLAN- Equipment sowohl im 2,4-GHz-ISM-Band als auch im 5-GHz-Frequenzbereich die gesetzlich erlaubten Strahlungsleistungen eingehalten werden. Die verwendeten Strahlungsleistungen für den regionalen Retourkanal (WLAN 802.11a-Link) sowie den lokalen Retourkanal (WLAN 802.11g-Link) sollen im Folgenden beschrieben werden.

Regionaler Retourkanal via WLAN 802.11a-Link

Für den Freifeldaufbau kommen dieselben Access-Points zum Einsatz, welche bereits beim Laboraufbau verwendet wurden. Da diese Access-Points mit DFS nur eine der beiden Methoden zur Vermeidung von Störungen anderer Funkssysteme im 5-GHz-Bereich unterstützen, darf in diesem Falle nicht mit 30 dBm (1 W) gesendet werden. Laut [Ets07] muss bei Geräten, welche TPC nicht unterstützen, das Limit um 3 dBm gesenkt werden (vgl. mit Tabelle 2.4).

Als Sendeleistung für die 2,7-km-Richtfunkstrecke wurde 1 dBm am Access-Point *AP 2* und *AP 3* konfiguriert. Die WLAN-Antenne bietet einen maximalen Gewinn von ca. 31 dBi. Zieht man die Verluste, als Resultat von Dämpfung in der Antennenzuleitung durch Kabel und Stecker ab, arbeitet man mit gesetzlich erlaubten Strahlungsleistungen (EIRP). Die Verbindungsqualität im regionalen Retourkanal lässt sich am Access-Point *AP 3* ablesen und beträgt 54 MBit/s (Bruttodatenrate).

Im Unterschied zum Laboraufbau wird nun allerdings die Wahl des für die Übertragung verwendeten Kanals nicht per *Smart Select* dem Access-Point überlassen, sondern fix der Kanal 100 (entspricht 5,5 GHz) eingestellt. Der Grund hierfür ist der eingeschränkte Nutzungsbereich in den Frequenzbereichen des U-NII Lower und Middle Band, welche hier die Nutzung nur im Indoor-Bereich vorsehen. Damit wird verhindert, dass der Access-Point zu einem Kanal wechselt, welcher im Outdoor-Bereich nicht verwendet werden darf. Ebenso mussten für eine korrekte Kommunikation der Access-Points auf der 5-GHz-Richtfunkstrecke die Timing-Parameter des WLAN-Protokolls entsprechend der Entfernung von 2,7 km zwischen den Access-Points *AP 2* und *AP 3* adaptiert werden. Bei Eingabe der Entfernung in Meter im Konfigurationsmenü der Access-Points (Long Distance Parameters), werden die empfohlenen Werte für die Parameter SlotTime, ACKTimeOut und CTSTimeOut automatisch berechnet.

Lokaler Retourkanal via WLAN 802.11g-Link

Bei der Anbindung der Clients zum Access-Point *AP 1* handelt es sich wie bereits im Laboraufbau um eine WLAN 802.11g-Verbindung in Form einer Client-zu-Access-Point-Verbindung. Damit bei den Messungen keine Störungen durch andere Funkteilnehmer auftreten und dadurch die Messergebnisse beeinflussen, wurde vor der Wahl des Kanals mit Hilfe des freien WiFi-Netzwerk-Scanning-Tools *InSSIDer* [Ins09] ein Scan auf Funkaktivität des gesamten WLAN-2,4-GHz-Frequenzbereichs am Standort der Client-Rechner durchgeführt. Schließlich wurde Kanal 11 zum Senden ausgewählt. Dabei wird eine Sendeleistung von 20 dBm eingestellt, welche das Limit in diesem Bereich darstellt. Trotz der maximal erlaubten Sendeleistung schwankt die Verbindungsqualität. Der Hauptteil der zu übertragenen Frames wird mit 24, 36, 48 und 54 MBit/s (Bruttodatenraten) übertragen (Link Adaption). Die maximal mögliche Datenrate von 54 MBit/s kann nicht dauerhaft erreicht werden, da sich unter anderem eine aus Beton bestehende Decke zwischen den Clients und dem Access-Point *AP 1* befindet.

5.1.3 Verzögerungszeit (Round Trip Time)

Nach erfolgter Installation aller benötigten Komponenten für den Freifeldaufbau dient wiederum ein Ping als erster Funktionstest. Abbildung 5.3 zeigt die bei beiden Clients gemessenen Verzögerungszeiten (RTTs) bei den schon für die Labormessungen verwendeten Paketgrößen von 32, 512 und 1472 Byte. Wiederum werden für das Diagramm die Mittelwerte aus 60 gesendeten Ping-Paketen je Paketgröße eingezeichnet. Die RTTs haben sich im Vergleich zu den Labormesswerten nicht wesentlich verändert, was zu erwarten war.

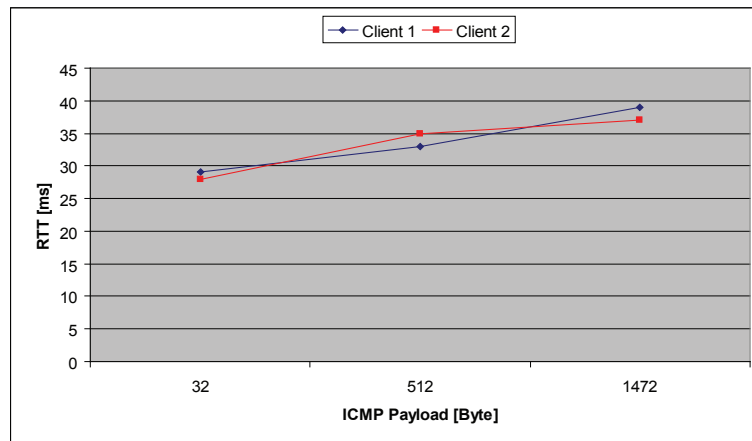


Abbildung 5.3: Verzögerungszeiten (RTTs) beider Clients im Freifeldaufbau

Die korrekte Funktion des Freifeldaufbaus in Verbindung aller beteiligten Komponenten ist damit jedenfalls gezeigt.

5.2 Eigenschaften des DVB-T-Vorwärtskanals

Die Beurteilung der erzielbaren Verbindungsqualität für den DVB-T-Vorwärtskanal im Freifeld erfolgt durch die Messungen des Jitters sowie der maximalen Durchsatzraten. Eine Zusammenfassung der erhaltenen Messergebnisse rundet Kapitel 5.2 ab.

5.2.1 Jitter

Wie bereits in Kapitel 4.1 (Grundlegendes zu den Messungen) erwähnt, können bei Verwendung des UDP-Protokolls für die Messung mit `iperf` die Werte des auftretenden Jitters (Varianz der Verzögerung) gemessen werden. Zu große Schwankungen in der Verzögerungszeit können speziell bei VoIP zu Qualitätseinbußen oder gar Verbindungsabbrüchen führen.

Der Jitter, welcher im DVB-T-Vorwärtskanal auftritt, wurde für zwei verschiedene Datenraten gemessen. Diese entsprechen jenen, die auch bei typischen VoIP-Verbindungen auftreten. Tabelle 5.2 zeigt die bei den Messungen simulierten VoIP-Codecs.

Details zur Messung

Um den Jitter zu messen, der im DVB-T-Vorwärtskanal bei den zu simulierenden Datenraten auftritt, wird `iperf` als *Server* an den Clients und als *Client* am Test-Server gestartet. Im Beispiel von G.729A als simulierten VoIP-Codec wurde `iperf` wie folgt gestartet:

```
Client1>iperf.exe -s -u -i 1 -p 5001 -l 32
```

Codec	Datenübertra- gungsrate (Sprache) [kBit/s]	Sampling Intervall [ms]	Payload Sprache [Byte]	Pakete pro Sekunde	Ethernet- Datenrate [kBit/s]
G.729A	8	20	20	50	31,2
G.711 (PCM)	64	20	160	50	87,2

Tabelle 5.2: Zur Messung des Jitters simulierte VoIP-Codecs (in Anlehnung an [Fin08])

startet den iperf-Prozess als *Server* (-s) bei Verwendung des UDP-Protokolls (-u) und Port 5001 (-p 5001). Das Ergebnis wird sekundlich (-i 1) geliefert. Um die Paketgröße eines G.729A codierten VoIP-Paketes zu simulieren, wird ein Nutzlastanteil von 32 Byte (-l 32) gewählt (20 Byte Payload Sprache + 12 Byte RTP-Header).

Nachdem der iperf-Prozess am Client gestartet wurde, kann der Test-Server mit dem Senden der Daten beginnen:

```
Test-Server>iperf.exe -c 192.168.3.21 -u -p 5001 -t 1800 -b 12800 -l 32
```

Der iperf-Prozess sendet als *Client* (-c) eine konstante UDP-Datenrate an die IP-Adresse des Client 1 (192.168.3.21). Um eine resultierende Gesamtdatenrate von 31,2 kBit/s (entspricht der Ethernet-Datenrate auf ISO/OSI-Schicht 2) und damit 50 Pakete pro Sekunde zu erhalten, muss iperf mit einer Datenrate von 12,8 kBit/s (-b 12800) gestartet werden. Diese Datenrate bezieht sich nur auf die Payload und berücksichtigt nicht die zusätzlichen 8 Byte für den UDP-Header, 20 Byte für den IPv4-Header sowie 14 Byte für den Ethernet-Header (ohne 4 Byte Frame Check Sequence). Die Messung erfolgt für die Dauer von 1800 Sekunden (-t 1800). Der Nutzlastanteil ist wiederum 32 Byte (-l 32). Für eine genauere Beschreibung der Parameter sei auf die Dokumentation auf der iperf-Homepage verwiesen [Ipe09].

Die Messungen des Jitters im DVB-T-Vorwärtskanal erfolgen jeweils nacheinander für die verschiedenen Datenraten an beiden Clients. Ebenfalls wurde der Verlauf des Jitters bei gleichzeitiger Messung erfasst.

Ergebnis der Jitter-Messungen im DVB-T-Vorwärtskanal für G.729A

Abbildung 5.4 zeigt den Verlauf des Jitters, welcher an Client 1 gemessen wurde. Dieser zeigt eine zufällige Verteilung des Jitters während des gesamten Messintervalls von 30 Minuten. Es gibt keine Bereiche, in denen ein konstant hoher Jitter zu beobachten wäre. Im Mittel beträgt der Wert des Jitters 6,40 ms. Auch die Paketverlustrate ist mit 0,03 % für diese Messung sehr niedrig.

Die Messung des Jitters an Client 2 liefert ähnliche Resultate (Abbildung 5.5). Auch hier ist eine zufällige Verteilung des Jitters über die gesamte Messdauer zu beobachten. Der Mittelwert des Jitters beträgt hier 6,45 ms. Die Paketverlustrate beträgt jedoch in diesem Fall 1,1 %. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich, dass der Großteil der Paketverluste innerhalb eines 80-sekündigen Intervalls auftraten. Stellenweise beträgt die Paketverluste

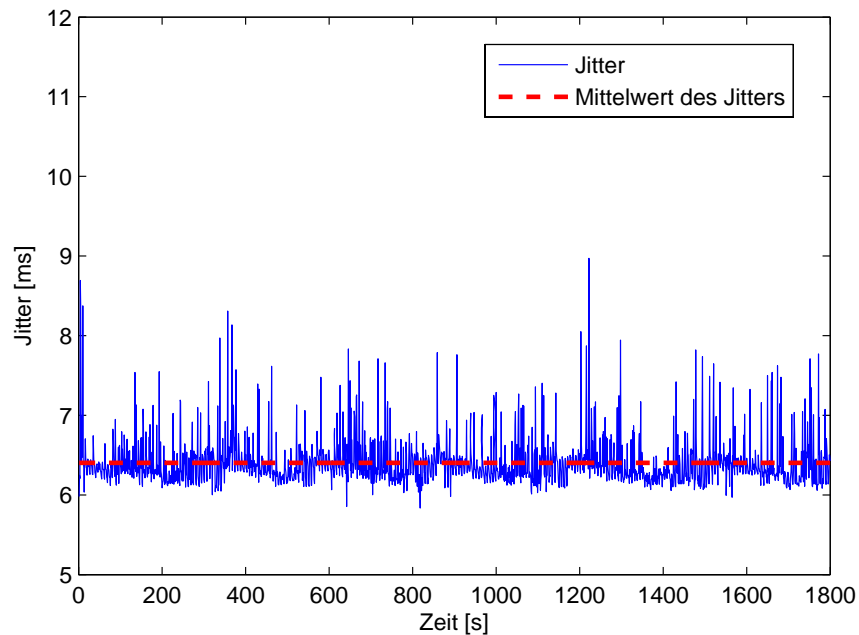


Abbildung 5.4: Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 27/90001 (0.03 %)

über 30 % innerhalb eines Sekunden-Intervalls. Für die Qualität eines VoIP-Gesprächs zeigt sich dieses Verhalten jedenfalls kritischer als würden die Pakete einzeln und sehr verteilt über die gesamte Messdauer verloren gehen. Kurzzeitige Empfangsprobleme seitens des DVB-T-Empfängers könnten eine mögliche Ursache dafür sein. Dieses Problem trat jedenfalls nur bei dieser Jitter-Messung auf.

Bei gleichzeitiger Messung (Test-Server sendet gleichzeitig an Client 1 und Client 2) konnte keine wesentliche Erhöhung des Jitters festgestellt werden. Der erzeugte Datenverkehr dürfte hierfür noch zu gering sein. Generell jedenfalls wird bei erhöhtem Datenaufkommen auch der Wert des Jitters zunehmen.

Als Grenze für den Jitter wird in [SH04] ein Wert von 30 ms genannt. Sollten Jitterwerte von über 30 ms konstant auftreten, so verschlechtert dies die Sprachqualität eines VoIP-Gesprächs merkbar. Dies hängt auch sehr stark von der Implementierung des Jitter-Buffers ab. Dieser Grenzwert wurde jedenfalls bei beiden Messungen zu keinem Zeitpunkt überschritten.

Anzumerken ist jedoch, dass diese Jitterwerte für einen abgeschlossenen Aufbau (kein Internetverkehr) bei idealen Bedingungen, das heißt kein anderer Datenverkehr im Netzwerk, gemessen wurden. Bei größerer Last im Netzwerk bzw. wenn ebenso durch das Internet geroutet würde, würden die Jitterwerte entsprechend zunehmen. Gleiches gilt natürlich auch für die Verzögerungszeiten, welche mit jedem zusätzlichen Hop (Internet-Router) mitunter drastisch ansteigen können.

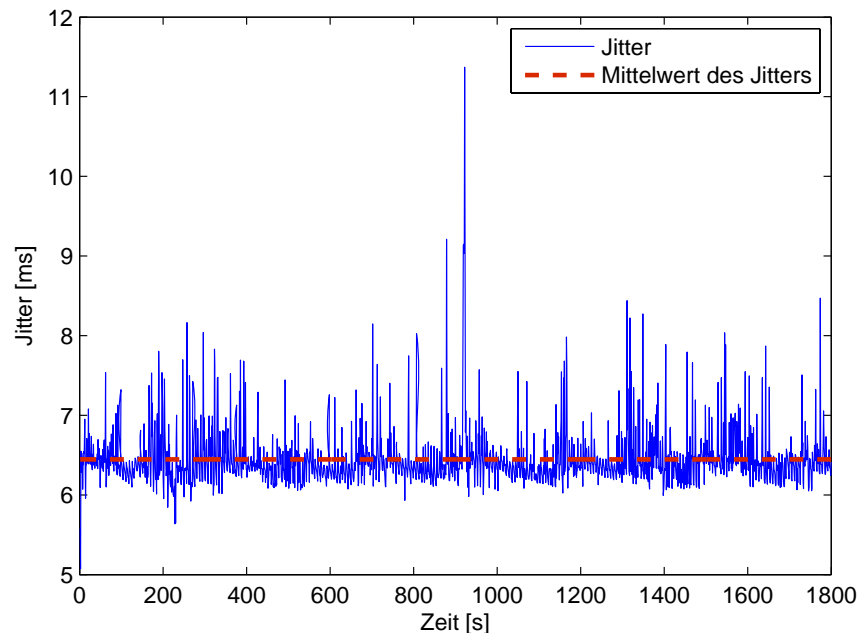


Abbildung 5.5: Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 961/90001 (1.1 %)

Ergebnis der Jitter-Messungen im DVB-T-Vorwärtskanal für G.711

Das Ergebnis der Messungen für den G.711 (PCM) Codec unterscheidet sich nicht wesentlich vom G.729A Codec und ist dem Anhang (siehe Kapitel A.1) zu entnehmen.

5.2.2 Maximale Durchsatzraten

Für die Messungen der erzielbaren Durchsatzraten im Freifeld für den DVB-T-Vorwärtskanal werden sowohl der UDP-Durchsatz als auch der TCP-Durchsatz bestimmt. Des Weiteren wird über Probleme mit der DVB-T-Empfangsfeldstärke am Standort Lustbühel reflektiert.

UDP-Durchsatz

Die UDP-Durchsatzmessungen aus den Labormessungen (Kapitel 4.3.1) zeigen, dass mit den verwendeten DVB-T-Empfangsboxen eine maximale UDP-Durchsatzrate von ca. 4,8 MBit/s nicht überschritten werden kann. Um zu testen, ob eine konstante UDP-Datenrate bei geringen Paketverlusten (Packet Loss) auch bei einer Langzeitmessung erzielt werden kann, wurde für diese Messung eine UDP-Datenrate von 3 MBit/s gewählt. Diese wurde für die Dauer von ca. 16 Stunden vom Test-Server an den Client 1 gesendet. Die an den Messungen beteiligten Rechner wurden mit folgenden iperf-Parametern gestartet:

```
Client1>iperf.exe -s -u -i 1 -p 5001 -f k -w 128k
```

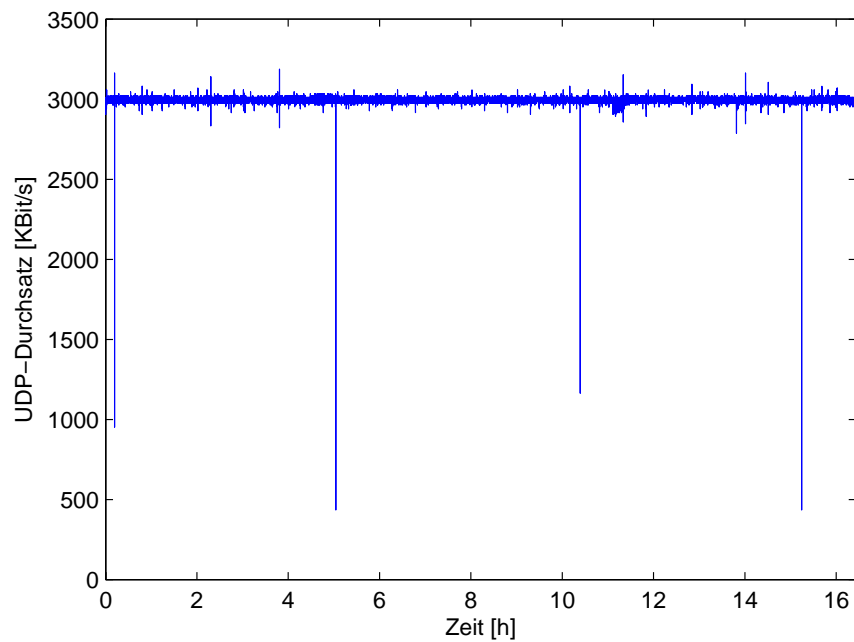


Abbildung 5.6: UDP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Langzeitmessung

```
Test-Server>iperf.exe -c 192.168.3.21 -u -i 1 -p 5001 -f k -t 60000 -w 128k -b 3M
```

Abbildung 5.6 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Bei einer Anzahl von 15087585 gesendeten UDP-Paketen für diese Messdauer, gingen nur 658 Pakete verloren, was einer Paketverlustrate von 0.0044 % entspricht. Dieses Ergebnis zeigt, dass auch bei einer Langzeitmessung eine konstante UDP-Datenrate bei einer geringen Paketverlustrate über den DVB-T-Vorwärtskanal gesendet werden kann.

Sowohl für Anwendungen wie Streaming als auch für VoIP-Gespräche ist es wichtig, dass eine konstante Datenrate bei geringem Paketverlust geliefert werden kann. Eine geringe Paketverlustrate führt ebenso bei TCP-basierten Diensten zu einer wesentlich verbesserten Performance.

TCP-Durchsatz

Die Messung des TCP-Durchsatzes im Freifeld soll zeigen, dass der in den Labormessungen erreichte Durchsatz (vergleiche mit Kapitel 4.3.3) für den DVB-T-Vorwärtskanal auch unter Freifeldbedingungen über mehrere Stunden erzielt werden kann.

Bei der Messung bauen der Client 1 und der Test-Server eine TCP-Verbindung auf. Die Rechner wurden mit folgenden iperf-Parametern gestartet:

```
Client1>iperf.exe -s -p 5001 -f k -i 1 -w 64k
```

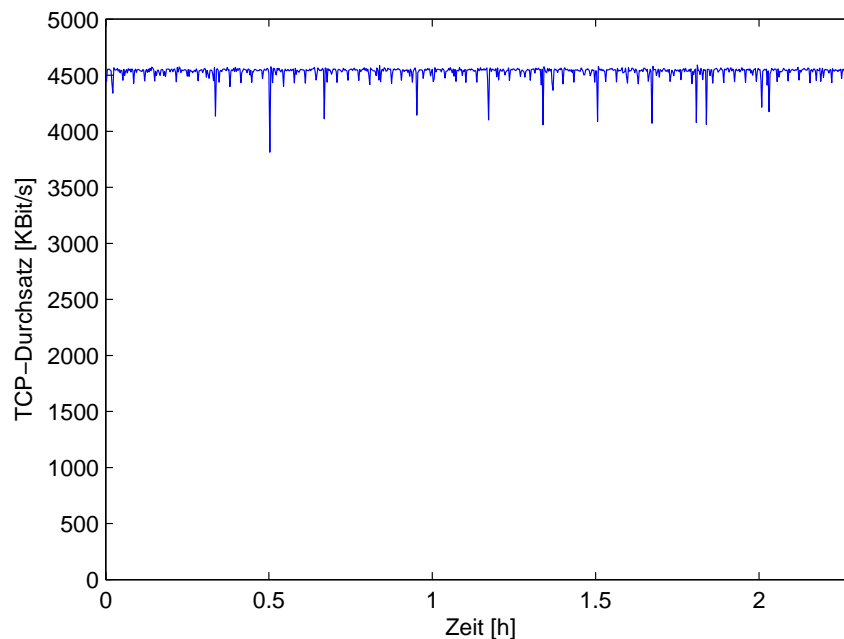


Abbildung 5.7: TCP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Langzeitmessung

Client 1 startet als iperf-Server (-s) eine TCP-Messung bei Verwendung des Ports 5001 (-p 5001). Das Ergebnis der Durchsatzrate wird in einem Intervall von einer Sekunde (-i 1) in kBit/s (-f k) angezeigt. Als Empfangsfenstergröße (TCP Receive Window Size) wird 64 kByte (-w 64k) gewählt.

```
Test-Server>iperf.exe -c 192.168.3.21 -f k -t 60000 -w 64k
```

Die TCP-Verbindung wird mit Client 1 (IP-Adresse 192.168.3.21) aufgebaut. Die Größe des Sendebuffers beträgt 64 kByte (-w 64k).

Das Ergebnis der TCP-Durchsatzmessung in Abbildung 5.7 zeigt, dass auch im Freifeld ca. 4,5 MBit/s an einem Client erreicht werden können. Die hier eingezeichneten Messwerte ergeben sich als Mittelwerte aus 10 Messwerten. Aus dem zeitlichen Verlauf des TCP-Durchsatzes sind periodische Bandbreiteneinbrüche zu erkennen. Als Ursache dafür wird die Nicht-Echtzeitfähigkeit des Tools iperf in Verbindung mit Windows-Prozessen, die periodisch CPU-Ressourcen beanspruchen, vermutet.

Probleme mit der DVB-T-Empfangsfeldstärke am Lustbühel

Die DVB-T-Sendeantenne am Dach des Studienzentrums in der Inffeldgasse ist gemäß den Auflagen des entsprechenden Genehmigungsbescheides für die DVB-T-Sendeanlage ausgerichtet. Aufgrund dieser Ausrichtung strahlt die DVB-T-Sendeantenne jedoch den Hauptteil der Leistung nicht in die Richtung des Standortes Lustbühel ab, wodurch die

Empfangsbedingungen für die Client-Rechner nicht ideal sind. Die Client-Rechner werden nur über eine Nebenkeule mit dem DVB-T-Signal versorgt. Deshalb war es nicht möglich durchgehende Messungen über mehrere Tage durchzuführen, bei denen Datenraten verwendet wurden, welche sich nahe am Limit der von den DVB-T-Empfangsboxen unterstützten maximalen Datenraten befinden. Die schlechten Empfangsbedingungen mit den damit verbundenen hohen Bitfehlerraten resultierten in Abstürzen der Datenapplikation. Der TCP-Durchsatz konnte nicht über die eingestellten 16 Stunden gemessen werden, da es nach ca. 2,5 Stunden zum Absturz der DVB-T-Datenapplikation kam. Eine längere TCP-Durchsatzmessung als ca. 2,5 Stunden war deshalb nicht möglich.

5.2.3 Zusammenfassung der erzielbaren Verbindungsqualität mit DVB-T

Wie bereits in den Labormessungen gezeigt wurde, erhält man durch die Verwendung von DVB-T zusätzliche Verzögerungen infolge der notwendigen Einkapselung der IP-Daten in einen MPEG-2-Transportstrom sowie durch die empfangsseitige Auskapselung zur Rückgewinnung der IP-Pakete. Für den vorliegenden Freifeldaufbau ergeben sich zusätzliche Verzögerungen (One Way Delay) zwischen 25 und 30 ms. Für Anwendungen wie Browsen im Web oder Video-Streaming stellt dies kein Problem dar. Bei Echtzeitanwendungen wie VoIP, Video-Konferenzen oder interaktiven Datenanwendungen sind diese zusätzlichen Latenzen zu berücksichtigen. In der ITU-T Recommendation G.114 [Itu03] wird für die Übertragung von Sprache eine maximale Verzögerungszeit (One Way Delay) von 150 ms empfohlen. Als absolute Obergrenze, bei der die Qualität von Echtzeitkommunikation noch als akzeptabel eingestuft werden kann, empfiehlt die ITU-T Einweglaufzeiten bis 400 ms. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Überschreitung von 150 ms bereits Verständigungsprobleme seitens der Gesprächsteilnehmer auftreten können [Fin08]. Vergleicht man jedoch die Verzögerungszeiten, die bei einer Übertragung mittels DVB-T auftreten, mit jenen bei einer Satelliteninternetanbindung, so stellt man fest, dass diese im Falle von DVB-T wesentlich geringer sind. So weist ein Satellitensystem in 36 000 km Höhe (geostationärer Orbit) bereits Signallaufzeiten von 260 ms für die Entfernung von der Erde zum Satelliten und wieder zurück auf [Itu03].

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Qualität eines VoIP-Gespräches ist der Jitter. Die Messungen des Jitters bei zwei verschiedenen Datenraten zeigen sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Der Grenzwert von 30 ms wurde während des Messintervalls nicht überschritten, außerdem gibt es keine Bereiche mit konstant hohem Jitter. Bei den anschließenden VoIP-Tests sollten daher keine großen Probleme auftreten.

Trotz der nicht idealen Empfangsbedingungen der Client-Rechner am Standort Lustbühl aufgrund der Ausrichtung der DVB-T-Sendeantenne am Dach des Studienzentrums in der Inffeldgasse konnte bei der Langzeitmessung mit UDP eine geringe Paketverlustrate erzielt werden. Das robuste DVB-T-Signal in Verbindung mit den konfigurierten Modulationsparametern und der verketteten Vorwärtsfehlerkorrektur (äußerer Fehlerschutz: Reed-Solomon-Blockcode, innerer Fehlerschutz: Faltungscodes) ermöglicht dies.

Bei Verwendung einer Retourkanaltechnologie, in diesem Falle WLAN, ist auch der Einsatz von Protokollen wie TCP, welche eine bidirektionale Übertragung voraussetzen, möglich. Hier konnte gezeigt werden, dass ein TCP-Durchsatz von 4,5 MBit/s für einen Client über mehrere Stunden erreicht werden kann. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Durchsatz lediglich durch die verwendete Hardware (DVB-T-Empfangsboxen) begrenzt ist. Der DVB-T-Standard erlaubt je nach eingestellten Modulationsparametern, welche auf die Empfangssituation am Standort der Benutzer angepasst sind, Nettodatenraten von bis zu ca. 32 MBit/s für einen 8 MHz breiten Kanal. Dies macht breitbandige Internetanwendungen wie Video-Streaming oder rasches Browsen im Web möglich.

5.3 Eigenschaften des WLAN-Retourkanals

Die Beurteilung der erzielbaren Verbindungsqualität für den WLAN-Retourkanal im Freifeld erfolgt wiederum durch die Messungen des Jitters sowie der maximalen Durchsatzraten. Eine Zusammenfassung der erhaltenen Messergebnisse rundet das Unterkapitel ab.

5.3.1 Jitter

Der Aufbau besteht mit DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal aus unterschiedlichen Technologien für diese beiden Pfade. Die Art und Weise, wie die WLAN-Geräte auf das Medium Luft zur Datenübertragung zugreifen (Medienzugriffsverfahren), unterscheidet sich wesentlich von jener bei DVB-T. Daher ist es sinnvoll die Jittermessungen ebenfalls für den WLAN-Retourkanal durchzuführen. Wiederum erfolgen die Messungen des Jitters bei verschiedenen Datenraten, nämlich jener Datenrate, die bei einer VoIP-Verbindung bei Verwendung des G.729A-Codec auftritt sowie jener bei Verwendung des G.711 (PCM) Codecs.

Details zur Messung

Um den Jitter im Retourkanal zu messen, müssen nun iperf-Server und iperf-Client im Vergleich zu den Jitter Messungen im DVB-T-Vorwärtskanal vertauscht werden. Der Datenfluss erfolgt also nun von den Clients über den WLAN-Retourkanal zum Test-Server im Backbone-Netz. Der Jitter, welcher zwischen Client 2 und dem Test-Server bei der Datenrate einer G.729A-Verbindung auftritt, wurde wie folgt gemessen:

```
Test-Server>iperf.exe -s -u -i 1 -p 5001 -l 32
```

```
Client2>iperf.exe -c 192.168.1.90 -u -p 5001 -t 1800 -b 12800 -l 32
```

Der iperf-Befehl zur Messung des Jitters zwischen Client 1 und dem Test-Server ist mit Ausnahme des verwendeten Ports (z.B.: -p 5002) identisch zu jenem, welcher am Client 2 konfiguriert wird.

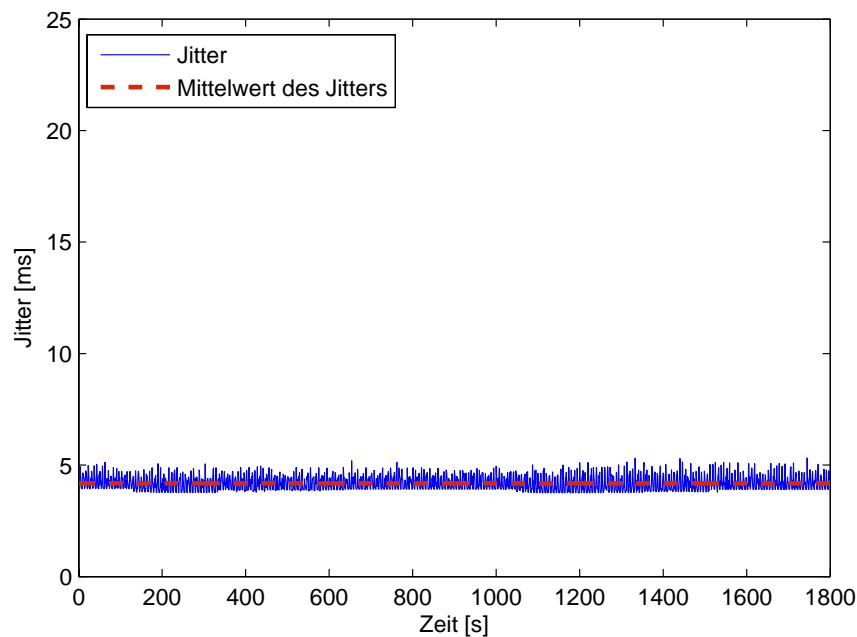


Abbildung 5.8: Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 0/90002 (0 %)

Ergebnis der Jitter-Messungen im WLAN-Retourkanal für G.729A

Das Ergebnis der Jittermessung mit Client 1 zeigt Abbildung 5.8. Innerhalb des Messintervalls von 30 Minuten bleibt der Wert des Jitters konstant und bewegt sich zwischen 3,75 und 5,32 ms. Es gibt keine Ausreißer nach oben. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 5.9 der Jitter bei Messung mit Client 2 dargestellt. In diesem Falle zeigen sich kontinuierliche Ausreißer der Jitterwerte von bis zu 24 ms. Die beiden Clients besitzen WLAN-Chipsätze von unterschiedlichen Herstellern (Client 1 benutzt einen Atheros AR5007EG Chipsatz, Client 2 einen Intel(R) PRO/Wireless 2200BG Chipsatz), was eine mögliche Ursache für diese Unterschiede sein könnte. Die Paketverlustrate für die Messung mit Client 1 beträgt 0 %, jene für die Messung mit Client 2 nur 0,0011 %.

Weiters wurde der Jitter bei gleichzeitigem Senden beider Clients gemessen. Dazu wurde iperf an beiden Clients zeitgleich gestartet. Der iperf-Prozess muss nun am Test-Server zweimal gestartet werden, jeweils für beide Clients mit unterschiedlichen Ports (z.B.: 5001 und 5002). Da nun zwei Teilnehmer um den Zugriff auf das Übertragungsmedium Luft konkurrieren, müsste dies zu erhöhten Jitterwerten führen. Stellt ein Client fest, dass bereits eine Übertragung stattfindet, so muss dieser mit dem Senden warten. Dieser Effekt führt zwangsläufig zu erhöhten Werten für den Jitter. Dies konnte jedoch aufgrund des Vorhandenseins von lediglich zwei konkurrierenden Stationen für diese Messungen nicht festgestellt werden. Im Allgemeinen jedoch wird dies für sehr viele Teilnehmer an einem Access-Point zu beobachten sein und speziell bei VoIP-Anwendungen aufgrund des hohen Jitters möglicherweise zu Problemen führen.

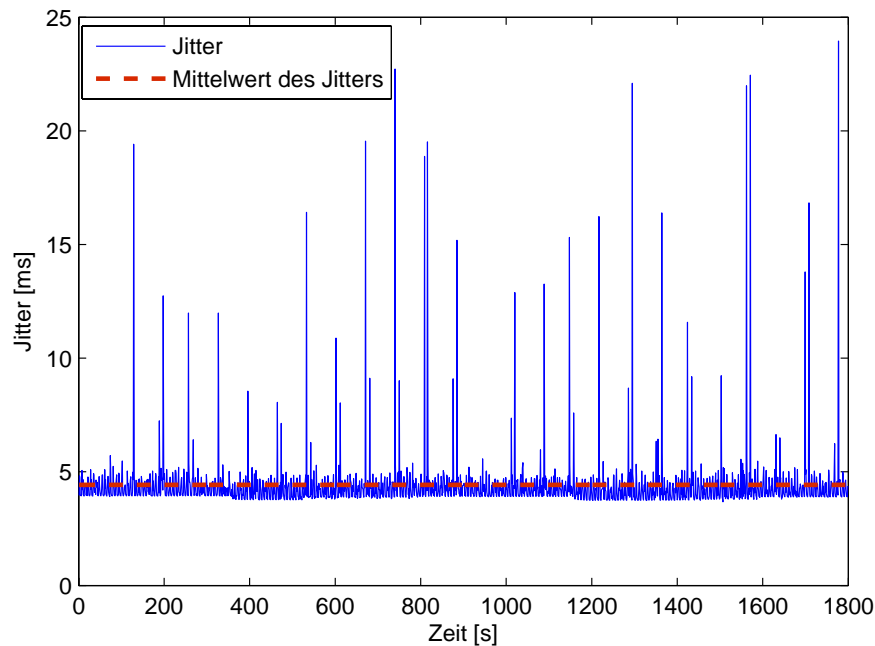


Abbildung 5.9: Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 1/90001 (0,0011 %)

Ergebnis der Jitter-Messungen im WLAN-Retourkanal für G.711

Das Ergebnis der Messungen für den G.711 (PCM) Codec unterscheidet sich nicht wesentlich vom G.729A Codec und ist dem Anhang (siehe Kapitel A.2) zu entnehmen.

5.3.2 Maximale Durchsatzraten

Für die Messungen der erzielbaren Durchsatzraten im Freifeld für den WLAN-Retourkanal werden sowohl der UDP-Durchsatz als auch der TCP-Durchsatz bestimmt. Neben dem Durchsatz wird bei der Messung mit dem UDP-Protokoll ebenfalls die Paketverlustrate gemessen.

UDP-Durchsatz

Aus den UDP-Durchsatzmessungen im Labor für den WLAN-Retourkanal ergibt sich ein maximaler UDP-Durchsatz von ca. 25 MBit/s für den Client 1. Zur Messung des UDP-Durchsatzes im Freifeld bei einer Langzeitmessung wird daher eine UDP-Sendedatenrate von 25 MBit/s am Client 1 für die Messung mit iperf eingestellt:

```
Test-Server>iperf.exe -s -u -i 1 -p 5001 -f k -w 128k
```

```
Client2>iperf.exe -c 192.168.1.90 -u -i 1 -p 5001 -f k -t 60000 -w 128k -b 25M
```

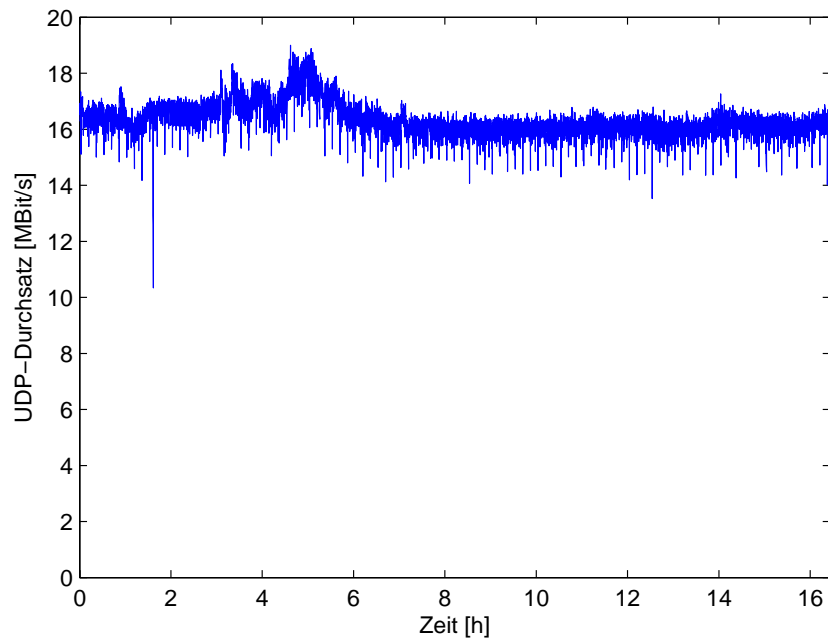


Abbildung 5.10: UDP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal gemessen mit Client 1 bei Langzeitmessung

Das Ergebnis in Abbildung 5.10 zeigt, dass diese UDP-Datenrate im Freifeld nicht mehr erzielt werden kann. Die eingezeichneten Messwerte ergeben sich dabei als Mittelwerte aus 10 gemessenen Werten. Der Grund für den geringeren UDP-Durchsatz ist, dass die Signalstärke der WLAN-Verbindung zwischen den Clients und dem Access-Point *AP 1* zwischen 24 und 54 MBit/s (entspricht den Bruttodatenraten) schwankt und daher die volle Datenrate nicht erzielt werden kann. Diese Langzeitmessung weist jedoch mit 0,31 % einen sehr geringen Wert für die Paketverlustrate auf.

TCP-Durchsatz

Um zu überprüfen, ob die in den Labormessungen erreichten TCP-Durchsatzraten für den WLAN-Retourkanal auch im Freifeld über eine längere Messperiode erzielt werden können, wurde eine Langzeitmessung durchgeführt. Für diese Messung bauen Client 1 und der Test-Server eine TCP-Verbindung auf:

```
Test-Server>iperf.exe -s -p 5001 -f k -i 1 -w 64k
```

```
Client1>iperf.exe -c 192.168.1.90 -f k -t 60000 -w 64k
```

In Abbildung 5.11 ist das Ergebnis dieser Messung zu sehen. Wiederum entsprechen die in der Abbildung eingezeichneten Messwerte den Mittelwerten aus 10 Messwerten. Das Messergebnis zeigt, dass ein TCP-Durchsatz von ca. 15 MBit/s erreicht wird. Dieser Wert liegt aufgrund des größeren Protokolloverheads bei Verwendung des TCP-Protokolls mi-

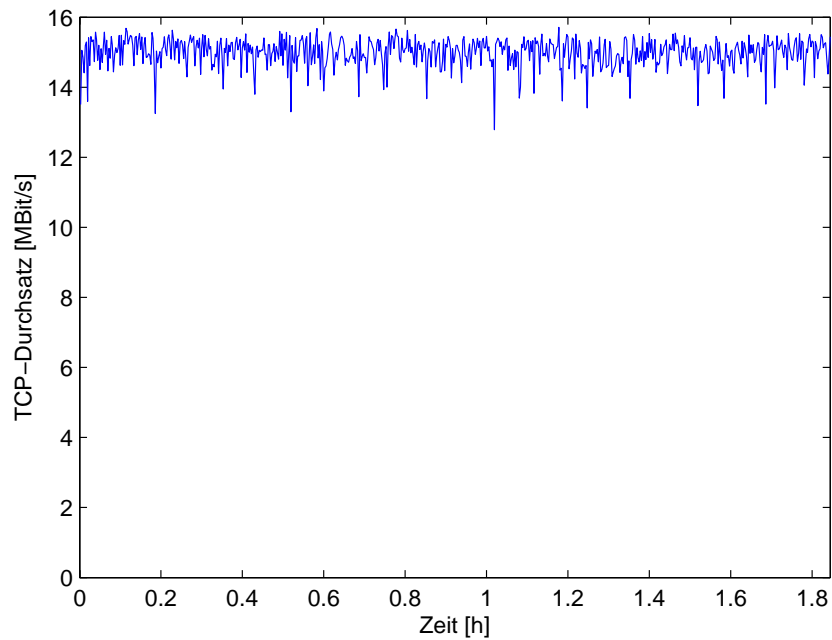


Abbildung 5.11: TCP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal gemessen mit Client 1 bei Langzeitmessung

nimal unter jenem des UDP-Durchsatzes. Auch in diesem Fall ist die Signalstärke der WLAN-Verbindung zwischen den Clients und dem Access-Point *AP 1* (entspricht dem lokalen Retourkanal) ausschlaggebend für den geringeren Durchsatz im Vergleich zu den Labormessungen.

5.3.3 Zusammenfassung der erzielbaren Verbindungsqualität mit WLAN

Wie bereits einführend erwähnt, existiert mit WLAN eine kostengünstige Retourkanaltechnologie, da diese im lizenzfreien Band arbeitet. Bei Einsatz von 802.11a oder 802.11g zur Datenübertragung können Nettodatenraten von bis zu 60 % der Bruttodatenraten erreicht werden. Dies entspricht einer Nettodatenrate von etwa 32 MBit/s für die maximale Bruttodatenrate von 54 MBit/s für diese beiden Standards. Für WLAN-Richtfunkstrecken im 5-GHz-Frequenzbereich können bei Vorhandensein entsprechender Leistungsreserven (Link Margin) Nettodatenraten von 20 - 30 MBit/s für einen 10-km-Link und immerhin noch 5 - 10 MBit/s für einen 20-km-Link bei Einhaltung der maximalen Strahlungsleistungen (EIRP) erreicht werden. Dies setzt jedoch eine freie Fresnelzone zwischen 7 m und 10 m ohne Hindernisse voraus [MSL08]. Im Anhang befindet sich dazu ein Messergebnis, welches diesen Sachverhalt für einen 2,7-km-Link zeigt und auf der gleichen Richtfunkstrecke zwischen dem Studienzentrum in der Inffeldgasse und dem Observatorium Lustbühel (Graz) gemessen wurde.

Auch wenn diese Datenraten für den vorliegenden Aufbau in den Freifeldmessungen aufgrund von schlechten Empfangsbedingungen im lokalen Retourkanal nicht erreicht werden konnten, so sind sie in der Praxis möglich. Die Kapazität des WLAN-Retourkanals reicht jedenfalls aus, um vielen Benutzern Downlink-Datenraten über DVB-T von mehreren MBit/s liefern zu können. Dies ist ebenso für Benutzer möglich, welche aufgrund von zu großen Entfernungen zu einem Access-Point oder schlechten Empfangsbedingungen nur mit geringeren Datenraten (zum Beispiel 6 oder 9 MBit/s) senden können (Link Adaption).

Vergleicht man den Einsatz von Public Switched Telephone Network (PSTN) oder Mobilfunkstandards wie GSM oder GPRS als Retourkanaltechnologien mit WLAN, so zeichnet sich WLAN durch geringere Verzögerungszeiten aus (vergleiche mit [GKX⁺05]). Dies wirkt sich positiv auf die Gesprächsqualität einer VoIP-Verbindung aus.

Die gemessenen Jitterwerte für den WLAN-Retourkanal unterscheiden sich wesentlich zwischen den beiden Clients. Während bei Client 1 die Jitterwerte nur geringfügig um den Mittelwert schwanken, so zeigen sich bei Client 2 doch erhebliche Ausreißer der Jitterwerte nach oben. Der lokale Retourkanal zeigt sich im Vergleich zum regionalen Retourkanal insofern kritischer, als dass der lokale Retourkanal mit dem Problem des Mehrfachzugriffes zu kämpfen hat. Sowohl der Jitter als auch die Verzögerungszeiten werden bei einer größeren Anzahl an Teilnehmern im Retourkanal-Netz, welche um den Zugriff auf das Medium Luft konkurrieren, zwangsläufig zunehmen. Kritisch wirkt sich dies vor allem bei Echtzeitanwendungen wie VoIP oder Video-Telefonie aus. Zur besseren Unterstützung von Echtzeitanwendungen ist im Standard IEEE 802.11e ein Quality-of-Service-Konzept (QoS) für WLANs definiert. Hiermit werden den Teilnehmern entsprechende Bandbreiten zugesprochen und Verzögerungszeiten und Jitter bleiben unter bestimmten Grenzen. Bei einer Vielzahl an Benutzern an einem Access-Point ist daher die Verwendung von WLAN-Equipment zu empfehlen, welches über QoS-Mechanismen verfügt.

5.4 Testen verschiedener Applikationen

Nachdem die wichtigsten Messparameter für den Freifeldaufbau bestimmt wurden, erfolgt in diesem Kapitel die Beschreibung verschiedener Applikationen, welche getestet wurden. Obwohl lediglich zwei Benutzer im Retourkanal-Netz vorhanden sind, so zeigen die Tests, dass die grundsätzliche Funktion verschiedener Applikationen über den hybriden Aufbau gegeben ist.

5.4.1 Browsen im Web

Bei Aufruf einer Webseite in einem geeigneten Browser werden die Anfrage-Pakete über den WLAN-Retourkanal zunächst ins Backbone-Netz übermittelt. Da es sich bei der Anfrage um Adressen außerhalb des lokalen Netzes handelt, werden die Pakete vom Retourkanal-Router zunächst an den Internet-Gateway weitergesendet. Von diesem wer-

den die Pakete über das Internet an den jeweiligen Zielrechner weitergeleitet. Die Antwort-Pakete retournieren am Internet-Gateway wieder ins Backbone-Netz. Da die ursprüngliche Anfrage aus dem Retourkanal-Netz stammt, leitet der Internet-Gateway die Pakete weiter zum IP/DVB-Gateway, welcher sie zur Aussendung über den DVB-T-Vorwärtskanal vorbereitet. Nach Empfang der Datenpakete durch die DVB-T-Set-Top-Box wird der Inhalt der Webseite im Browser dargestellt.

Da die Anbindung an das Internet über das LAN der TU Graz sehr breitbandig ist, können die vollen von den DVB-T-Empfangsboxen unterstützen Datenraten bei Aufruf einer Webseite an die Clients geliefert werden. Mit ca. 4,5 MBit/s ermöglicht dies ein rasches Browsen im Internet. Eine über mehrere Stunden durchgeführte Literaturrecherche im Internet verlief problemlos und ohne Einschränkungen. Auch bei Benutzung beider Clients gleichzeitig konnten keine Probleme festgestellt werden.

E-Mail

Auch das Empfangen und Senden von E-Mails gehört zu den Standardanwendungen des Internet. Sowohl der Empfang als auch das Versenden einer 2 MByte großen E-Mail war ohne Probleme möglich.

Datei-Download

Zur Durchführung eines Download-Tests wurde an beiden Clients gleichzeitig das Microsoft Windows XP Service Pack 3 (314 MByte) von der Microsoft-Homepage heruntergeladen. Abbildung 5.12 zeigt die beim Download erreichten TCP-Durchsatzraten der Clients. Trotz kurzer Bandbreiteneinbrüche im Verlauf des Downloads war mit 4,06 MBit/s für den Client 1 und 3,92 MBit/s für den Client 2 ein sehr rascher Download der Dateien möglich, welcher ebenso das Limit für diesen Aufbau darstellt (8 MBit/s Gesamtdurchsatz für den DVB-T-Vorwärtskanal). Wie bereits die TCP-Durchsatzraten bei gleichzeitiger Messung aus den Labormessungen (Kapitel 4.3.3) zeigen, können aufgrund der 10 MBit/s-Ethernet-Netzwerkkarte des IP/DVB-Gateways insgesamt nicht mehr als ca. 8 MBit/s über den DVB-T-Vorwärtskanal gesendet werden.

5.4.2 File Transfer Protocol (FTP)

Die Übertragung von Dateien mittels FTP wurde ebenso getestet. Für den Test wurde die freie Software *Filezilla* verwendet [Fil09]. Der *FileZilla-Server* wurde auf dem Test-Server installiert. Mit Hilfe des *FileZilla-Clients* verbinden sich die Client-Rechner zu diesem Server.

Als Testdatei zur Übertragung dient das 314 MByte große Microsoft Windows XP Service Pack 3. Dieses wird per FTP von Client 1 an den Test-Server übertragen. Abbildung 5.13 zeigt einen Screenshot während der Übertragung der Datei. FTP verwendet zur sicheren Übertragung der Datei das TCP-Protokoll. Die hierfür notwendigen Acknowledgements werden über den DVB-T-Vorwärtskanal dem Client 1 zugestellt. Wie auch schon die

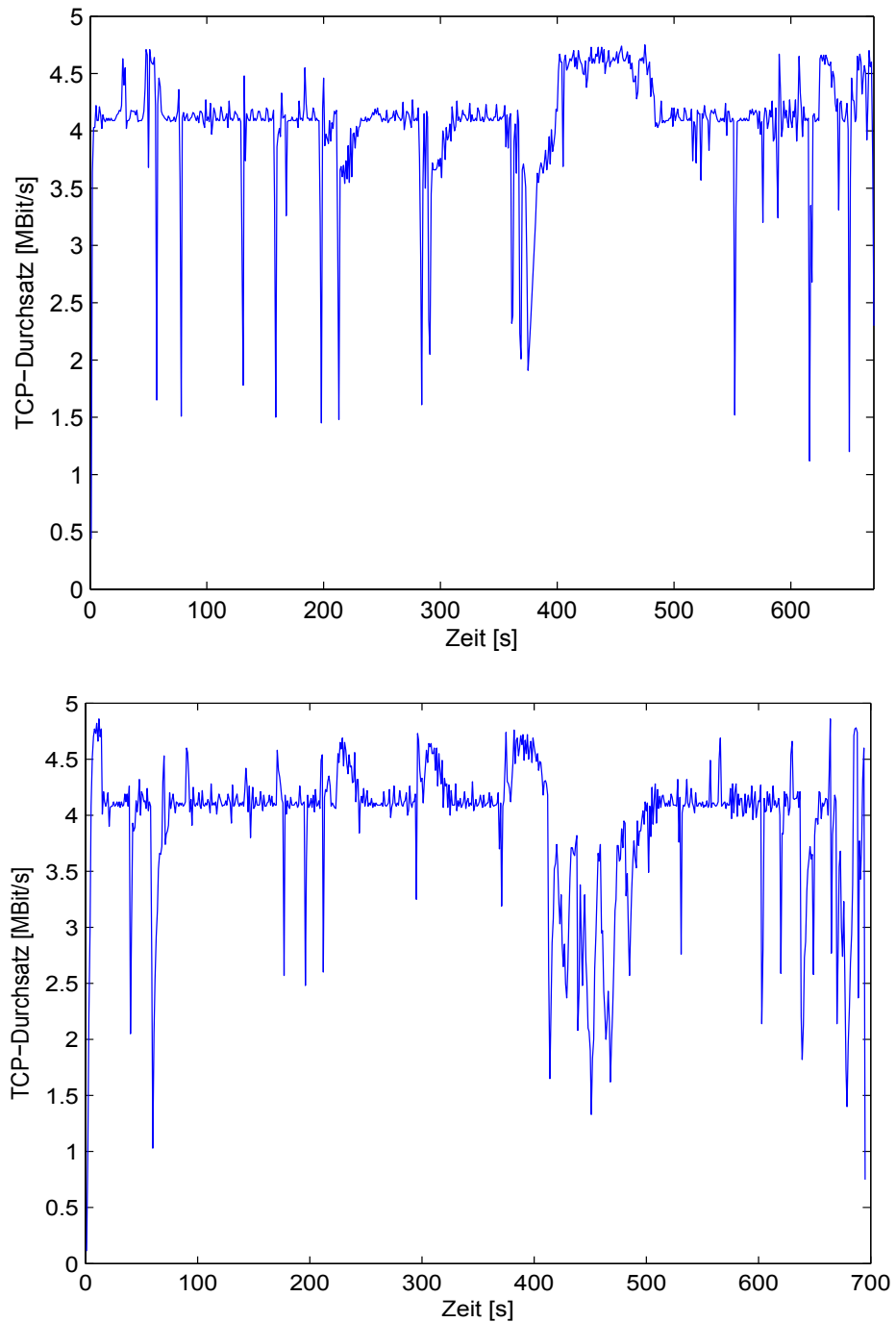


Abbildung 5.12: TCP-Durchsatz bei Download einer Datei, Client 1 mit 4,06 MBit/s in 11,18 min (oben), Client 2 mit 3,92 MBit/s in 11,58 min (unten)

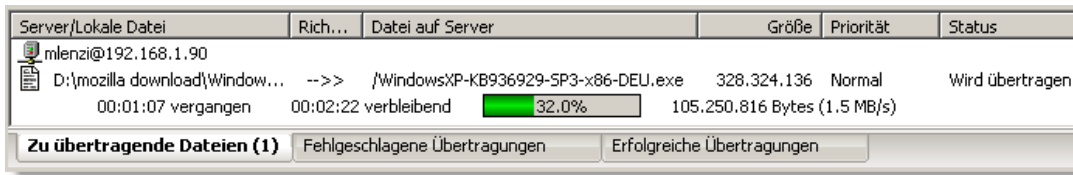


Abbildung 5.13: Dateiübertragung per FTP von Client 1 an den Test-Server

Messungen in Kapitel 5.3.2 zu den erreichbaren TCP-Durchsatzraten für den WLAN-Retourkanal zeigen, werden hier ähnliche Durchsatzraten erreicht. Die TCP-Durchsatzrate schwankte während der Dauer der Übertragung zwischen 12 und 15 MBit/s.

5.4.3 Video-Streaming

Als Streaming-Applikation wurde die freie Open-Source Software VLC-Media-Player in der Version 0.9.9 verwendet. Diese Softwarelösung unterstützt zahlreiche Audio- und Video-Codex und ist bestens für das Streamen von Multimedia-Inhalten in Netzwerken mit hoher Bandbreite geeignet. Weitere Details zu den unterstützten Features finden sich auf der Webseite des Herstellers [Vlc09].

Das zum Streaming verwendete Video hat eine Laufzeit von 44 Minuten und 36 Sekunden. Das Video wurde mit einer Bitrate von 2000 kBit/s mit dem Codec MPEG-2 codiert. Als Audio-Codec wurde MPEG-Audio mit einer Bitrate von 128 kBit/s verwendet. Das ganze wurde schließlich in einen MPEG-Transportstrom verkapselt und per UDP-Protokoll an die IP-Adresse 192.168.3.21, also an den Client 1 über den DVB-T-Vorwärtskanal gestreamt.

Für den Test der Streaming-Anwendung wurde ein Unicast-Stream vom Test-Server an den Client 1 gestreamt. Dabei wird der VLC Media Player als Streaming-Server am Test-Server gestartet. Ebenso dient der VLC Media Player am Client 1 zum Empfang des Streams. Die vorhin genannten Einstellungen wurden am Streaming-Server vorgenommen. Um am Client den Stream zu empfangen, muss lediglich der Netzwerk-Stream geöffnet und das Protokoll sowie die IP-Adresse eingetragen werden. Einen Screenshot des empfangenen Streams zeigt Abbildung 5.14.

Um feststellen zu können, ob die Datenrate des Streams auch konstant am Empfänger gemessen werden kann, wurde der Netzwerk-Traffic am Netzwerkadapter Virtual STB-S/-C/-T Network Adapter mitgeschnitten. Abbildung 5.15 zeigt, dass die Datenrate mit Ausnahme eines kurzen Einbruchs konstant am Empfänger ankommt. Da bei solchen Anwendung stets gepuffert wird, stellt dies jedoch kein gravierendes Problem dar. Rein visuell bzw. akkustisch konnte während der gesamten Spieldauer kein Aussetzer festgestellt werden. Streaming-Anwendungen lassen sich damit über DVB-T grundsätzlich problemlos nutzen.

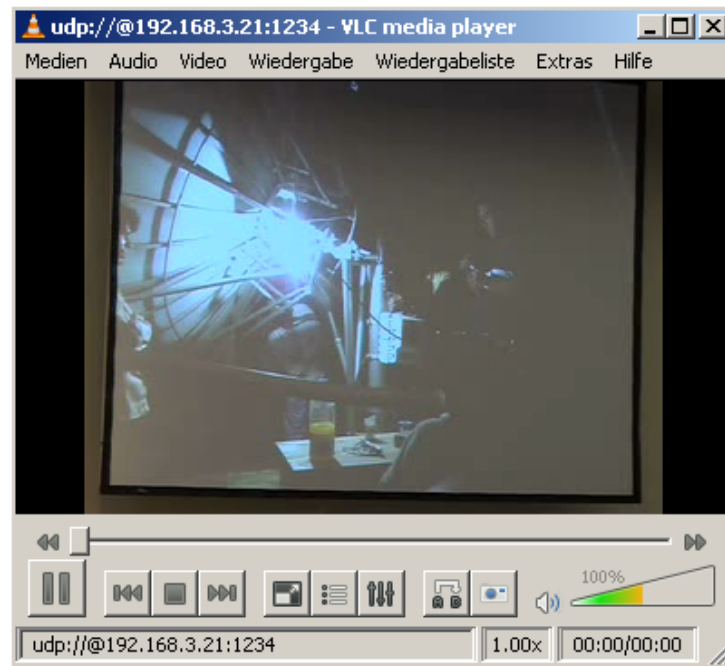


Abbildung 5.14: Geöffneter Netzwerkstream am Client 1

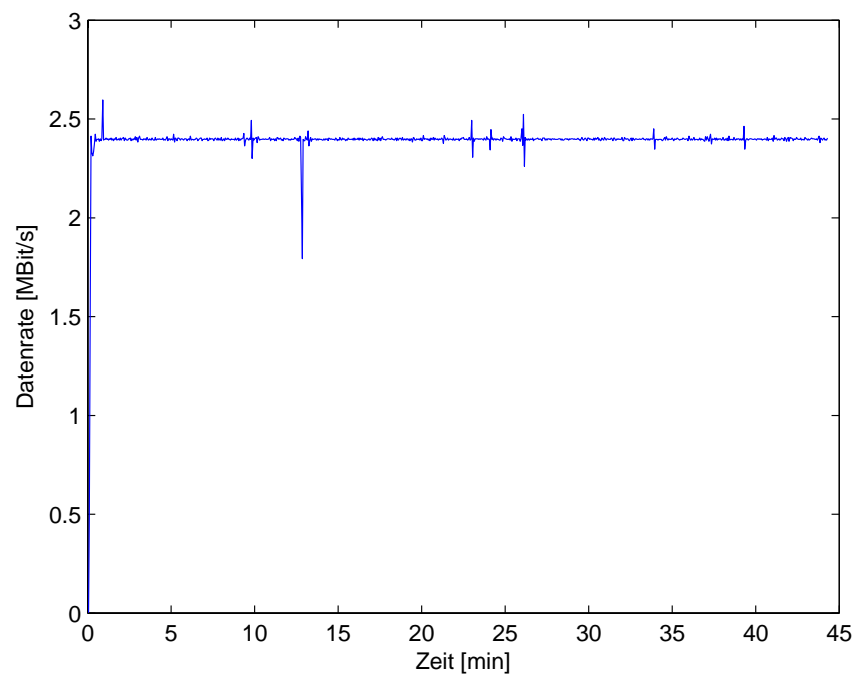


Abbildung 5.15: Streaming-Datenrate am Empfänger Client 1

5.4.4 Virtual Private Network (VPN)

Um die Stabilität einer VPN-Anwendung für den hybriden Aufbau zu testen, wurde mittels *OpenVPN* eine VPN-Verbindung zwischen Client 2 und dem Test-Server konfiguriert. *OpenVPN* ist eine freie Software unter der General Public License (GPL) und ermöglicht den Aufbau einer verschlüsselten Verbindung mit Hilfe des TLS-Protokolls (Transport Layer Security). Mit *OpenVPN GUI for Windows* existiert ein grafisches Frontend für Windows-Betriebssysteme, welches zur einfacheren Konfiguration einer VPN-Verbindung in der Version 1.0.3 verwendet wurde [Ope09a].

Konfiguration der VPN-Verbindung

Die Installation sowie die Konfiguration der OpenVPN-Verbindung wurden in Anlehnung an [Ope09b] vorgenommen. Dabei wurde der Test-Server im Backbone-Netz als OpenVPN-Server konfiguriert. Sowohl Client 1 als auch Client 2 wurden für eine mögliche VPN-Verbindung mit dem Server konfiguriert. Für den Langzeittest baute jedoch Client 2 die Verbindung zu diesem auf. Als Adressbereich wurde der private Adressbereich 10.8.0.0/24 benutzt. Damit ist das VPN-Interface des Test-Servers unter der IP-Adresse 10.8.0.1 zu erreichen. Dem Client 2 wird die IP-Adresse 10.8.0.6 beim Aufbau einer VPN-Verbindung zugewiesen.

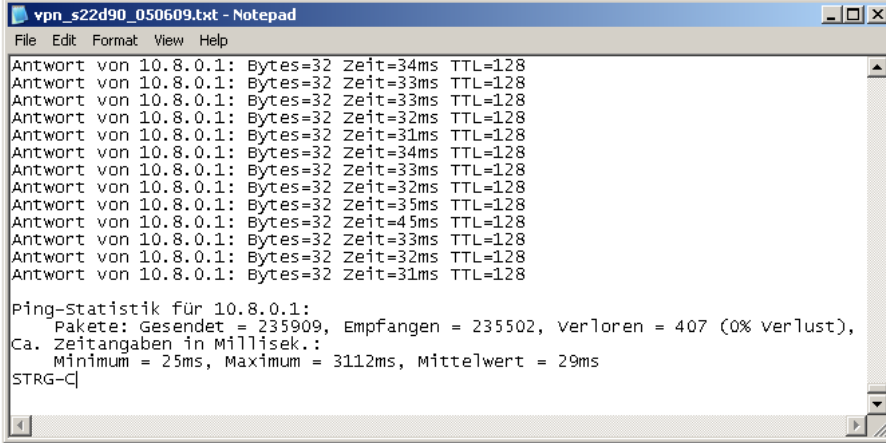
Dauertest der VPN-Verbindung

Nach erfolgreichem Aufbau der VPN-Verbindung wurde ein Dauer-Ping von Client 2 an den Test-Server initiiert. Dabei startet

```
>ping 10.8.0.1 -t
```

einen Endlos-Ping an das VPN-Interface des Test-Servers. Wiederum gelangen die ICMP-Echo-Request-Pakete über den WLAN-Retourkanal zum Zielrechner im Backbone-Netz. Dessen ICMP-Echo-Reply-Pakete gelangen über den DVB-T-Vorwärtskanal wieder zum anfragenden Host zurück. Um den Vorgang wieder abubrechen und damit die Ping-Statistik abzurufen, muss vom Benutzer *Control-C* eingegeben werden. Nach etwa 65,5 Stunden wurde der Test abgebrochen. Während dieses Zeitraums lief die VPN-Verbindung stabil, es trat jedenfalls kein Verbindungsabbruch auf. Dies bestätigt ebenso ein in der Software integrierter Keepalive-Mechanismus, welcher Aufschluss darüber gibt, ob sich die Teilnehmer erreichen und damit die Verbindung weiterhin besteht.

Das Ergebnis des Dauertests in Form der Ping-Statistik ist in Abbildung 5.16 zu sehen. Diese zeigt mit 407 verlorenen Paketen eine sehr geringe Paketverlustrate.



```
vpn_s22d90_050609.txt - Notepad
File Edit Format View Help
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=34ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=33ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=33ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=32ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=31ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=34ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=33ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=32ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=31ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=35ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=45ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=33ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=32ms TTL=128
Antwort von 10.8.0.1: Bytes=32 Zeit=31ms TTL=128

Ping-Statistik für 10.8.0.1:
Pakete: Gesendet = 235909, Empfangen = 235502, verloren = 407 (0% verlust),
Ca. Zeitangaben in Millisek.:
Minimum = 25ms, Maximum = 3112ms, Mittelwert = 29ms
STRG-C
```

Abbildung 5.16: Ping-Statistik für VPN-Verbindung zwischen Client 2 und Test-Server

5.4.5 Voice over IP (VoIP)

Die Qualität einer VoIP-Verbindung hängt unter anderem - wie bereits erwähnt - entscheidend vom Jitter, von der Verzögerungszeit (One Way Delay) und der Paketverlustrate ab. Für den vorliegenden Aufbau wurden diese Messwerte bereits erfasst und die Ergebnisse dargelegt. Im Allgemeinen verschlechtern sich diese Kennwerte bei einem "echten" VoIP-Gespräch in ein Zielnetz außerhalb des lokalen Aufbaus, beispielsweise aufgrund von hoher Netzauslastung an Routern im Internet. Gateways als Schnittstelle zwischen verschiedenen Netzwerktechnologien spielen ebenso eine entscheidende Rolle.

Details zum Aufbau und zur Konfiguration des SIP-Telefons

Um die Sprachqualität bei VoIP-Gesprächen auch für den oben genannten Fall zu überprüfen, erfolgten mehrere Testanrufe aus dem Retourkanalnetz in das Festnetz bzw. in ein Mobilfunknetz. Dazu wurde ein Linksys SPA2102 VoIP-Telefonadapter verwendet, um ein Standard-Telefon mit dem IP-basierten Netzwerk zu verbinden. Der VoIP-Telefonadapter ist per Ethernet-Kabel mit dem Client 2 verbunden und bekommt von diesem eine lokale IP-Adresse durch DHCP zugewiesen. Client 2 fungiert in diesem Test als notwendige Schnittstelle zwischen dem VoIP-Telefon und dem Backbone-Netz, da weiterhin die Pakete im Downlink über DVB-T zugestellt werden. Somit übernimmt Client 2 lediglich Routing-Funktionalität und leitet die Anfrage-Pakete des VoIP-Telefons über den WLAN-Retourkanal ins Backbone-Netz weiter. Von dort aus werden diese über den Internet-Gateway ins Internet und je nach Zielnetz (IP-Netz, Mobilfunknetz oder Festnetz) an den entsprechenden Gesprächsteilnehmer weitergeroutet. Im Vorwärtskanal gelangen die Antwort-Pakete des angerufenen Teilnehmers schließlich über DVB-T im letzten Teilstück der Übertragungsstrecke zu Client 2 zurück, welcher diese an das anfragende VoIP-Telefon weiterreicht.

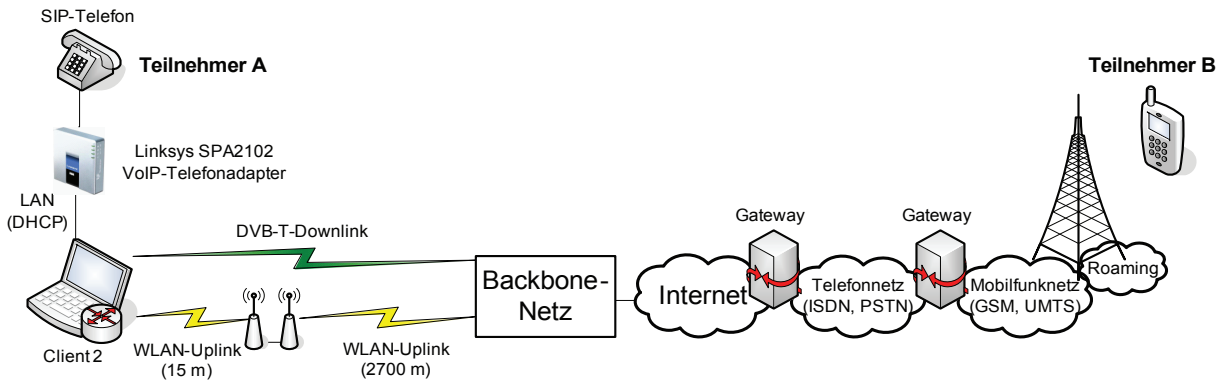


Abbildung 5.17: VoIP-Gespräch zwischen Teilnehmer A in Graz und Teilnehmer B in Belgien

Als Signalisierungsprotokoll wird das Session Initiation Protocol (SIP) verwendet. Dieses von der Sprachkommunikation unabhängige Protokoll dient dem Aufbau, der Steuerung und dem Abbau des Gespräches zwischen den Teilnehmern. Der VoIP-Telefonadapter ist bereits vorkonfiguriert und verwendet für die Durchführung von VoIP-Gesprächen einen SIP-Provider in Wien. Um mit diesem kommunizieren zu können, muss die lokale IP-Adresse der Datenpakete des SIP-Telefons in eine öffentliche IP-Adresse umgesetzt werden (Network Address Translation (NAT)). Dies geschieht im Backbone-Netz durch den Internet-Gateway. Die Verwendung von NAT macht weiters den Einsatz des STUN-Protokolls (Session Traversal Utilities for NAT) notwendig, damit die korrekte Funktion in beide Gesprächs-Richtungen (Teilnehmer A → Teilnehmer B, Teilnehmer B → Teilnehmer A) gegeben ist. Hierzu wurde der freie STUN-Server *stun.ekiga.net* im Linksys SPA2102 konfiguriert.

Abbildung 5.17 zeigt skizzenhaft den grundsätzlichen Aufbau sowie stark abstrahiert die gesamte Übertragungsstrecke mit den beteiligten Komponenten und Teilnetzen für ein Testgespräch ins Ausland. Der Teilnehmer A befindet sich bei allen Testgesprächen am Observatorium Lustbühel in Graz. Bei dem Testgespräch ins Ausland befindet sich der angerufene Mobilfunkteilnehmer B in Belgien.

Durchgeführte Testgespräche

Insgesamt wurden drei Testgespräche durchgeführt. Bei den ersten beiden Gesprächen befinden sich die Teilnehmer B im Inland. Der erste Anruf erfolgte auf einen Festnetzanschluss, der zweite auf ein Mobilfunk-Handy. Um noch größere Verzögerungszeiten zu erhalten, wurde im dritten Testgespräch ein Mobilfunkteilnehmer im Ausland angerufen. Die Sprachpakete zwischen dem SIP-Telefon und dem SIP-Provider in Wien sind mit dem ITU-T G.729 Sprachcodec codiert. Zur weiteren Analyse wurde der Datenverkehr aller drei Gespräche am Client 2 mit Hilfe des Tools *Wireshark* in der Version 1.0.6 mitgeschnitten. Dieses Netzwerk-Analyse-Programm ist frei erhältlich unter der General Public License (GNU) [Wsh09].

VoIP-Anruf	Standorte		Zielnetz	Dauer [min]	Pakete (RTP)	Paket-verluste	Jitter [ms]	
	Tln A	Tln B					Max	Mittel
1	Graz	Tirol	Festnetz	1,25	3484	0 (0,0 %)	57,14	3,80
2	Graz	Kärnten	Mobilfunk	1,00	2417	0 (0,0 %)	60,74	4,96
3	Graz	Belgien	Mobilfunk	2,33	5459	0 (0,0 %)	61,01	4,60

Tabelle 5.3: Zusammenfassung dreier VoIP-Gespräche und Wireshark VoIP-Statistik für RTP-Streams im Downlink

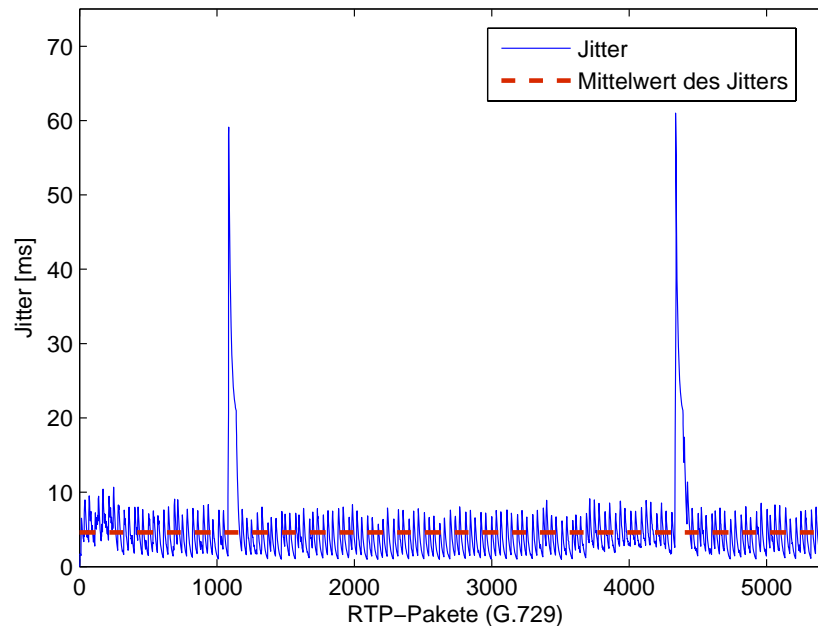


Abbildung 5.18: Jitter im Downlink bei VoIP-Gespräch zwischen Teilnehmer A in Graz und Teilnehmer B in Belgien

Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Testgespräche sowie einige Kenngrößen, welche mit Wireshark erfasst wurden. Wireshark erkennt, dass es sich bei den mitgeschnittenen Paketen um ein SIP-VoIP-Gespräch handelt und ermöglicht die Analyse der einzelnen RTP-Streams. Für einen ausgewählten RTP-Stream können damit beispielsweise die Anzahl der Pakete, die Nutzlast (Payload), Paketverlustrate und Jitter bestimmt werden. Bei den in der Tabelle angegebenen Werten handelt es sich um die Kenngrößen, die aus den RTP-Streams der einzelnen Gespräche vom SIP-Provider zum SIP-Telefon ermittelt wurden, also um die Sprachpakete von Teilnehmer B im Downlink, da nur in dieser Richtung Jitter und Paketverlustrate sinnvoll gemessen werden können.

Ergebnisse und Beurteilung der Sprachqualität

Die Paketverlustrate beträgt bei allen Gesprächen für den Downlink 0 %. Der Mittelwert des Jitters bewegt sich zwischen 3,80 und 4,96 ms. Bei allen Gesprächen wurde ein kurzzeitiger Anstieg des Jitters auf einen Maximalwert von ca. 60 ms gemessen. Ein Grund hierfür könnte eine mögliche Überlast an einem Router im Internet sein. Es konnte dadurch jedenfalls keine Einschränkung in Form von Sprachaussetzern festgestellt werden. Bei Testgespräch 3, welches die längste Gesprächsdauer aufweist wurde, dieser Effekt zweimal gemessen. Der Verlauf des Jitters bei diesem Testgespräch ist in Abbildung 5.18 dargestellt.

Alle drei Gespräche verliefen ohne Probleme, es traten jedenfalls keine Kommunikationsschwierigkeiten oder gar Verbindungsabbrüche auf. Die Sprachqualität kann subjektiv gesehen als hervorragend bezeichnet werden. Die Verwendung von DVB-T im Vorwärtskanal ist damit auch für Echtzeitanwendungen wie VoIP gezeigt und ein Einsatz grundsätzlich möglich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde die an der TU Graz vorhandene DVB-T-Infrastruktur um die Möglichkeit erweitert, auch IP-basierte Dienste übertragen zu können. Der Aufbau einer WLAN-Richtfunkstrecke für den benötigten Retourkanal ermöglicht damit breitbandige Internetanwendungen, welche eine bidirektionale Übertragung voraussetzen. Diese hybride Internetanbindung mit DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal stellt außerdem eine alternative Breitbandinternetzugangsmöglichkeit dar, um auch in ländlichen Regionen eine Grundversorgung zu ermöglichen.

Für den Retourkanal existiert mit WLAN eine Technologie, welche im lizenzfreien Band sendet. Es konnte im Rahmen der durchgeführten Messungen gezeigt werden, dass geringe Uplink-Datenraten im Bereich von einigen kBit/s im Retourkanal ausreichen, um im Downlink Datenraten von mehreren MBit/s zu erzielen. Damit können sich entsprechend viele Benutzer die WLAN-Kapazität teilen und trotzdem breitbandige Internetdienste nutzen, da im Normalfall über den Vorwärtskanal die größeren Datenmengen bezogen werden.

Bei den TCP-Durchsatzmessungen im DVB-T-Vorwärtskanal, welche sowohl unter Laborbedingungen als auch im Freifeld durchgeführt wurden, konnte eine maximale Gesamtdatenrate von ca. 4,5 MBit/s je Client aufgrund von Hardwareeinschränkungen seitens der DVB-T-Empfangsboxen nicht überschritten werden. Der DVB-T-Standard ermöglicht jedoch abhängig vom verwendeten Modulationsverfahren, der gewählten Coderate sowie dem Schutzintervall (Guard Interval) Nettodatenraten bis ca. 32 MBit/s für einen 8 MHz breiten Kanal.

Die TCP-Durchsatzmessungen im WLAN-Retourkanal bleiben aufgrund von schlechten Empfangsbedingungen im lokalen Retourkanal ebenfalls unter den maximal erreichbaren Werten. Dennoch bietet vor allem der WLAN-Standard nach 802.11a für Richtfunkstrecken ideale Voraussetzungen, um über mehrere Kilometer Nettodatenraten von bis zu ca. 30 MBit/s zu liefern.

Die Messungen zu den Verzögerungszeiten (Round Trip Times) zeigen, dass durch die notwendige Einkapselung der IP-Datenpakete in einen MPEG-2-Transportstrom zur Auslieferung über DVB-T zusätzliche Verzögerungen auftreten. Für den vorliegenden Aufbau ergeben sich zusätzliche Verzögerungen zwischen 25 und 30 ms. Gerade bei Echtzeitanwendungen wie VoIP, Video-Konferenzen oder interaktive Datenanwendungen führen zu große Verzögerungen zu Qualitätseinbußen. Die ITU-T empfiehlt in der Recommendation

G.114 eine maximale Verzögerungszeit (One Way Delay) von 150 ms für diese Art von Anwendungen.

Die Ergebnisse der Jittermessungen für zwei verschiedene Datenraten, welche jenen typischer VoIP-Verbindungen entsprechen, zeigen zufriedenstellende Jitterwerte. Sowohl der Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal als auch im WLAN-Retourkanal bleibt zumindest bei diesem Aufbau mit zwei getesteten Client-Rechnern (entspricht den Benutzern) im Retourkanal-Netz unter den empfohlenen Grenzwerten.

Das erfolgreiche Testen von verschiedenen Anwendungen wie Browsen im Web, das Versenden von E-Mails, Datentransfers mittels FTP, Video-Streaming, VPN und Voice over IP unter realen Bedingungen im Freifeld zeigt, dass die grundsätzliche Funktion über den hybriden Aufbau gegeben ist.

Für die praktische Umsetzung, bei der sehr viele Teilnehmer im Retourkanal-Netz vorhanden sind, bleibt die Wahl der Architektur offen, anhand derer die Benutzer an einen lokalen Relaisknotenpunkt angebunden werden können. Die Möglichkeit, die Benutzer per Client-zu-Access-Point-Verbindung anzubinden, setzt voraus, dass alle Benutzer innerhalb der Sendereichweite des Access-Points liegen. Dies wird für unterversorgte Regionen, in denen die Haushalte hunderte Meter voneinander entfernt sind, zumindest bei Verwendung ungerichteter WLAN-Antennen an den Hausdächern nicht immer möglich sein. Zudem senkt jeder Benutzer, der nicht mit der maximal unterstützten Datenrate angebunden ist, den Gesamtdurchsatz im WLAN-Retourkanal. Ebenso steigt bei vielen Teilnehmern an einem Access-Point die Wahrscheinlichkeit, ein besetztes Medium vorzufinden und damit nicht senden zu dürfen. Dies wiederum schlägt sich in erhöhten Verzögerungszeiten und Jitterwerten nieder. Ein größerer Aufwand in der Herstellung der Infrastruktur im Retourkanal-Netz (höhere Dichte an WLAN-Access-Points und damit weniger Teilnehmer pro Access-Point) kann diesen Problemen jedoch entgegenwirken. Eine andere Möglichkeit wäre, die Benutzer untereinander über ein sogenanntes Wireless Meshed Network zu verbinden, bei dem die Datenpakete von einem Benutzer zum nächsten weitergereicht werden. Damit ließen sich jedenfalls große Abdeckungsbereiche erzielen. Gerade für Echtzeitanwendungen scheint diese Topologie jedoch weniger geeignet zu sein, da die Verzögerungszeiten dadurch mitunter drastisch ansteigen können und eine Kommunikation in Echtzeit unmöglich machen. Ein weiterer Nachteil dieser Art der Vernetzung ist, dass stets jedes Teilnehmerequipment aktiv sein muss, da ja die Weiterleitung des Datenverkehrs über die anderen Teilnehmer läuft.

In jedem Fall ist der Einsatz von QoS-Mechanismen, wie sie im IEEE 802.11e Standard für WLAN-Geräte definiert sind, zu empfehlen, da nur so jedem Benutzer definierte Bandbreiten sowie Verzögerungszeiten und Jitter innerhalb bestimmter Grenzen zugesprochen werden können. Erst dies ermöglicht eine problemlose Benutzung sämtlicher Internetdienste auch für eine sehr große Anzahl an Benutzern.

Zusammenfassend bleibt zu sagen, dass mit DVB-T eine schon im Fernsehbereich etablierte Technologie existiert, welche aber ebenso Internetdatendienste mit hohen Daten-

raten übertragen kann. Der Einsatz von WLAN ist eine kostengünstige und verbreitete Möglichkeit für den erforderlichen Retourkanal. Die Kombination von DVB-T und WLAN bietet damit die Chance zeitnah eine bessere Versorgung von Breitbandinternet in unterversorgten Gebieten zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- [Ahl04] AHLERS, E.: *Weitfuncker - WLAN-Richtfunk selbst gemacht*. c't Magazin für Computertechnik, Heft Nr. 25, 2004
- [CNF04] COLLINI-NOCKER, B. ; FAIRHURST, G.: ULE versus MPE as an IP over DVB Encapsulation, 2004
- [Dig09] *Digitale Dividende - Positionspapier der Mobilfunkbranche vom Mai 2009*. <http://www.fmk.at/media/pdf/pdf1043.pdf>, aufgerufen im Oktober 2009
- [Dvb09] *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television (ETSI EN 300 744 v1.6.1)*. 2009
- [Ets07] *ETSI EN 301 893 V1.4.1 (2007-07) Harmonized European Standard; Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive*. 2007. – Seite 12
- [Fil09] *Filezilla FTP Homepage*. <http://filezilla-project.org/>, aufgerufen im Juni 2009
- [Fin08] FINNERAN, M.: *Voice Over WLANs - The Complete Guide*. 2008
- [Fis06] FISCHER, W.: *Digitale Fernsehtechnik in Theorie und Praxis*. Springer, 2006
- [GKX⁺05] GARDIKIS, G. ; KORMENTZAS, G. ; XILOURIS, G. ; KOUMARAS, H. ; KOURTIS, A.: Broadband Data Access over Hybrid DVB-T Networks. (2005)
- [HCB05] HONG, Teh C. ; CHEE, Wan T. ; BUDIARTO, R.: A Comparison of IP Datagrams Transmission using MPE and ULE over Mpeg-2/DVB Networks. In: *Proc. Fifth International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, 2005, S. 1173–1177
- [Hen09] HENKEL, M.: *Implementation and Evaluation of Load-Balanced Radio and Optical Wireless Communication*. Bakkalaureatsarbeit, 2009
- [Ins09] *InSSIDer Wi-Fi Network Scanner für Windows Homepage*. <http://www.metageek.net/products/inssider>, aufgerufen im Juni 2009

- [Ipe09] *Iperf TCP/UDP Bandwidth Performance Measurement Tool Homepage*. <http://web.archive.org/web/20080617174544/http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>, aufgerufen im September 2009
- [Itu03] *ITU-T Recommendation G.114 - One-way Transmission Time*. Mai 2003
- [KLK⁺05] KOUIS, D. ; LOUKATOS, D. ; KONTOVASILIS, K. ; KORMENTZAS, G. ; SKIANIS, C.: On the Effectiveness of DVB-T for the Support of IP-based Services in Heterogeneous Wireless Networks. In: *Computer Networks* 48 (2005), Nr. 1, S. 57 – 73. – ISSN 1389–1286. – Internet over MPEG-2 Transmission Networks
- [Lüd07] LÜDERS, C.: *Lokale Funknetze*. 1. Auflage. Vogel Buchverlag, 2007
- [MG05] MITTELBACH, F. ; GOOSSENS, M.: *Der Latex Begleiter*. Pearson Studium, 2005 (2., überarbeitete und erweiterte Auflage)
- [MLG07] MANDL, P. ; LEITGEB, E. ; GEBHART, M.: Verwendung von Lichtfunk, Glasfaser und WLAN als temporäre Installation für Multimediaanwendungen. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* Volume 124, Number 10 / October (2007), S. 346–350
- [MSL08] MANDL, P. ; SCHROTTER, P. ; LEITGEB, E.: Wireless Synchronous Broadband Last Mile Access Solutions for Multimedia Applications in License Free Frequency Spectrums. In: *Proc. 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing CNSDSP 2008*, 2008, S. 110–113
- [OP05] O'HARA, B. ; PETRICK, A.: *IEEE 802.11 Handbook - A Designer's Companion*. Standards Information Network IEEE Press, 2005
- [Ope09a] *OpenVPN GUI für Windows-Betriebssysteme*. <http://openvpn.se/>, aufgerufen im Juni 2009
- [Ope09b] *OpenVPN Windows HowTo*. <http://www.runpcrun.com/howtoopenvpn>, aufgerufen im Juni 2009
- [Rec08] RECH, J.: *Wireless LANs - 802.11-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co.KG, Hannover, 2008
- [Rei08] REIMERS, U.: *DVB - Digitale Fernsehtechnik - Datenkompression und Übertragung*. 3.Auflage, Springer, 2008
- [RFC09] *TCP Extensions for High Performance (Request for Comments 1323)*. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1323.txt>, aufgerufen im August 2009
- [Rom07] ROMANO, P.: *Interaktive Applikationen für DVB-T mit dem MHP Standard*. Projektarbeit, 2007

- [Sau08] SAUTER, M.: *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*. Friedr.Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2008
- [SFA⁺05] SOORIYABANDARA, M. ; FAIRHURST, G. ; ANG, A. ; COLLINI-NOCKER, B. ; LINDER, H. ; STERING, W.: A Lightweight Encapsulation Protocol for IP over MPEG-2 Networks: Design, Implementation and Analysis. In: *Computer Networks 48* (2005), S. 5–19
- [SH04] SZIGETI, T. ; HATTINGH, C.: *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs, and VPNs*. Macmillan Technical Publishing, 2004
- [Tru09] TRUMMER, J.: *Technologievergleich und Zuverlässigkeitsabschätzung von Funkübertragungssystemen in der Automatisierung*, Masterarbeit, 2009
- [Vlc09] *VLC Media Player Homepage*. <http://www.videolan.org/>, aufgerufen im September 2009
- [Wac07] WACLAWICZEK, C.: *Comparison of DMB and DVB-H Systems for prospective Broadcast Services*, Masterarbeit, 2007
- [Wik09a] *Wikipedia-Artikel: Bandwidth-Delay Product*. http://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth-delay_product, aufgerufen im August 2009
- [Wik09b] *Wikipedia-Artikel: DVB-T*. <http://de.wikipedia.org/wiki/DVB-T>, aufgerufen im Oktober 2009
- [Wsh09] *Wireshark Network Protocol Analyzer Webseite*. <http://www.wireshark.org/>, aufgerufen im Oktober 2009

Tabellenverzeichnis

2.1	Nutzdatenraten in MBit/s für ein DVB-T-System mit 8 MHz breitem Kanal [Rei08]	9
2.2	Übersicht der wichtigsten WLAN-Standards nach IEEE 802.11	13
2.3	Kanalaufteilung des 5-GHz-Bandes innerhalb der EU [Rec08] [OP05] . . .	14
2.4	Erlaubte Strahlungsleistungen im 5-GHz-Band innerhalb der EU [Rec08] [Ets07]	15
3.1	Eingestellte Parameter am DVB-T Modulator und resultierende Bitrate . .	25
4.1	UDP-Durchsatz des DVB-T-Vorwärtskanals (Labormesswerte)	36
4.2	UDP-Durchsatz des WLAN-Retourkanals (Labormesswerte)	36
5.1	Link Budget für den WLAN-Retourkanal in Anlehnung an [MSL08]	43
5.2	Zur Messung des Jitters simulierte VoIP-Codecs (in Anlehnung an [Fin08])	46
5.3	Zusammenfassung dreier VoIP-Gespräche und Wireshark VoIP-Statistik für RTP-Streams im Downlink	65

Abbildungsverzeichnis

1.1	Architektur der hybriden Internetanbindung mit DVB-T im Vorwärtskanal und WLAN im Retourkanal	5
2.1	Aufbau eines PES-Pakets [Fis06]	10
2.2	Struktur eines MPEG-2-TS-Pakets [Fis06]	11
2.3	Einkapselung eines IP-Datenpaketes in den MPEG-2-Transportstrom [Wac07]	12
2.4	Frequenzraster und nichtüberlappende Kanäle bei 2,4 GHz für 802.11b/g .	16
2.5	Ad-hoc-Netzwerk (Independent Basic Service Set)	16
2.6	Netzwerk im Infrastruktur-Modus (Infrastructure Basic Service Set)	17
2.7	Netzwerk im ESS-Modus (Extended Service Set)	18
3.1	Laboraufbau mit einem Client	21
3.2	Netzwerktopologie des Laboraufbaus mit kabelgebundenem Retourkanal . .	22
3.3	Ausschnitt aus dem Konfigurationsfile <i>netup</i>	24
3.4	Datenapplikation <i>DVB Data Control - Tuner Status</i>	26
3.5	Datenapplikation <i>DVB Data Control - Filter Options</i>	27
3.6	Antwort und RTT-Zeit bei kabelgebundenem Retourkanal	28
3.7	Laboraufbau mit WLAN im Retourkanal	29
4.1	Laboraufbau für Messungen	32
4.2	Verzögerungszeiten (RTTs) gemessen an Client 2 - Laboraufbau	34
4.3	TCP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal bei Einzelmessung (Labormesswerte)	37
4.4	TCP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal bei gleichzeitiger Messung (Labormesswerte)	38
4.5	Downlink-Datenraten im Vorwärtskanal mit entsprechenden Uplink-Datenraten im WLAN-Retourkanal (Labormesswerte)	38
4.6	TCP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal bei Einzelmessung (Labormesswerte)	39
4.7	TCP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal bei gleichzeitiger Messung (Labormesswerte)	39
5.1	Studienzentrum mit Blick auf die WLAN-Gegenstelle am Lustbühel (links), Observatorium Lustbühel (rechts)	41

5.2	Schematische Darstellung des Freifeldaufbaus	42
5.3	Verzögerungszeiten (RTTs) beider Clients im Freifeldaufbau	45
5.4	Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 27/90001 (0.03 %)	47
5.5	Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 961/90001 (1.1 %)	48
5.6	UDP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Langzeitmessung	49
5.7	TCP-Durchsatz im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Langzeitmessung	50
5.8	Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 0/90002 (0 %)	53
5.9	Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.729A, Paketverlustrate 1/90001 (0,0011 %) . . .	54
5.10	UDP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal gemessen mit Client 1 bei Langzeitmessung	55
5.11	TCP-Durchsatz im WLAN-Retourkanal gemessen mit Client 1 bei Langzeitmessung	56
5.12	TCP-Durchsatz bei Download einer Datei, Client 1 mit 4,06 MBit/s in 11,18 min (oben), Client 2 mit 3,92 MBit/s in 11,58 min (unten)	59
5.13	Dateiübertragung per FTP von Client 1 an den Test-Server	60
5.14	Geöffneter Netzwerkstream am Client 1	61
5.15	Streaming-Datenrate am Empfänger Client 1	61
5.16	Ping-Statistik für VPN-Verbindung zwischen Client 2 und Test-Server . . .	63
5.17	VoIP-Gespräch zwischen Teilnehmer A in Graz und Teilnehmer B in Belgien	64
5.18	Jitter im Downlink bei VoIP-Gespräch zwischen Teilnehmer A in Graz und Teilnehmer B in Belgien	65
A.1	Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 24/90001 (0.027 %)	77
A.2	Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 76/90001 (0.084 %)	77
A.3	Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 1/90002 (0.0011 %)	78
A.4	Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 0/90001 (0 %)	79
A.5	TCP-Durchsatz und Verfügbarkeit einer 2,7 km WLAN-Richtfunkstrecke im 5-GHz-Frequenzbereich	80

A Weitere Messergebnisse

A.1 Jittermesswerte für G.711 im DVB-T-Vorwärtskanal

Details zur Messung

Zur Erzeugung der Datenrate entsprechend eines G.711-VoIP-Gesprächs wurde iperf wie folgt am Client 1 und am Test-Server gestartet:

```
Client1>iperf.exe -s -u -i 1 -p 5001 -l 172
```

```
Test-Server>iperf.exe -c 192.168.3.21 -u -p 5001 -t 1800 -b 68800 -l 172
```

Für die Messung des Jitters an Client 2 wird lediglich die IP-Adresse am Test-Server zu 192.168.3.22 geändert.

Ergebnis der Jitter-Messungen im DVB-T-Vorwärtskanal für G.711

Abbildung A.1 zeigt das Ergebnis der Jittermessung für den G.711 Codec bei Einzelmessung an Client 1 für den DVB-T-Vorwärtskanal. Der Jitter ist während des gesamten Messintervalls zufällig verteilt. Im Mittel beträgt dieser 6,61 ms. Die Paketverlusterate beträgt für diese Messung 0,027 %.

Abbildung A.2 zeigt das Ergebnis der Jittermessung für den G.711 Codec bei Einzelmessung an Client 2 für den DVB-T-Vorwärtskanal. Auch hier bleiben die Jitterwerte stets deutlich unter der in Kapitel 5.2.1 genannten Grenze von 30 ms. Der Mittelwert des Jitters beträgt bei dieser Messung ebenfalls 6,61 ms. Mit 0,084 % zeigt sich die Paketverlustrate ähnlich niedrig wie jene bei Messung an Client 1.

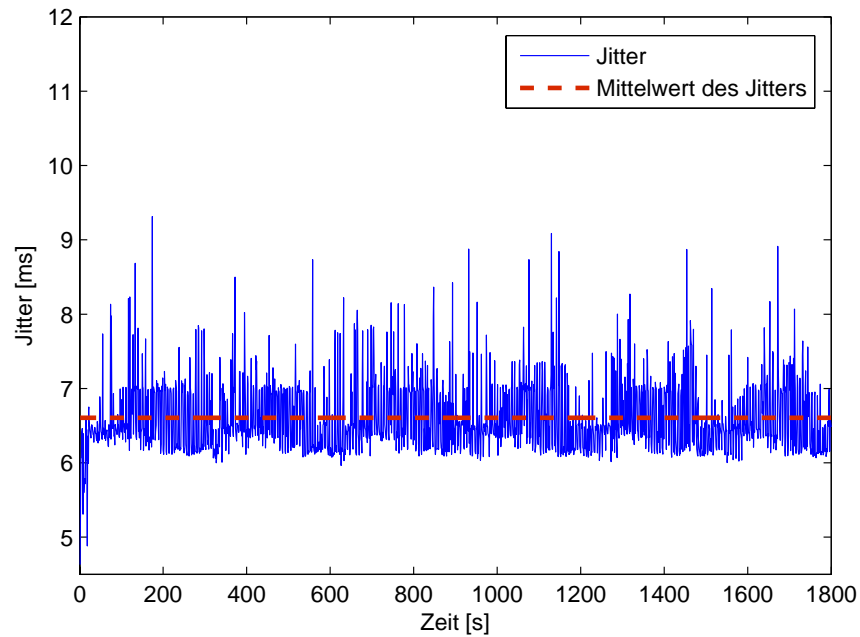


Abbildung A.1: Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 24/90001 (0.027 %)

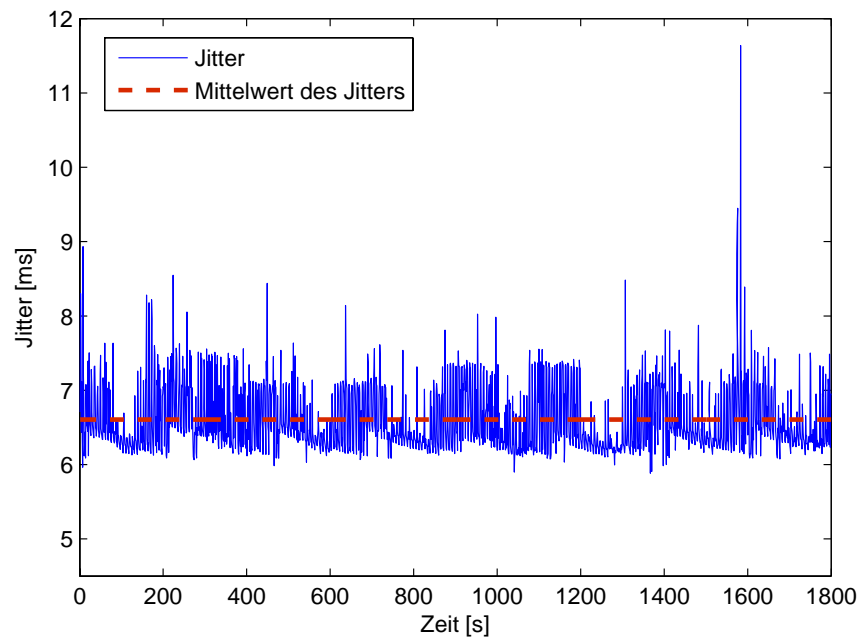


Abbildung A.2: Jitter im DVB-T-Vorwärtskanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 76/90001 (0.084 %)

A.2 Jittermesswerte für G.711 im WLAN-Retourkanal

Details zur Messung

Zur Erzeugung der Datenrate entsprechend eines G.711-VoIP-Gesprächs im WLAN-Retourkanal wurde iperf wie folgt am Client 1 und am Test-Server gestartet:

```
Test-Server>iperf.exe -s -u -i 1 -p 5001 -l 172
```

```
Client1>iperf.exe -c 192.168.1.90 -u -p 5001 -t 1800 -b 68800 -l 172
```

Ergebnis der Jitter-Messungen im WLAN-Retourkanal für G.711

Abbildung A.3 zeigt den Jitter im WLAN-Retourkanal, welcher an Client 1 bei Einzelmessung für den G.711 Codec gemessen wurde. Der Mittelwert des Jitters beträgt 4,71 ms. Wiederum gibt es in diesem Fall keine Ausreißer der Jitterwerte wie bei der Messung mit Client 2. Die Paketverlustrate ist 0,0011 % und bedeutet lediglich den Verlust eines Paketes.

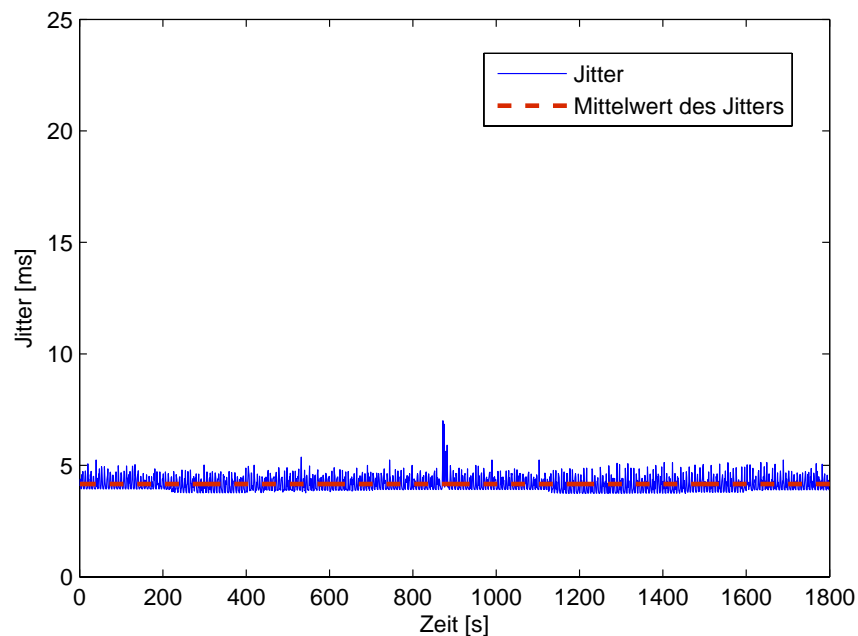


Abbildung A.3: Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 1 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 1/90002 (0.0011 %)

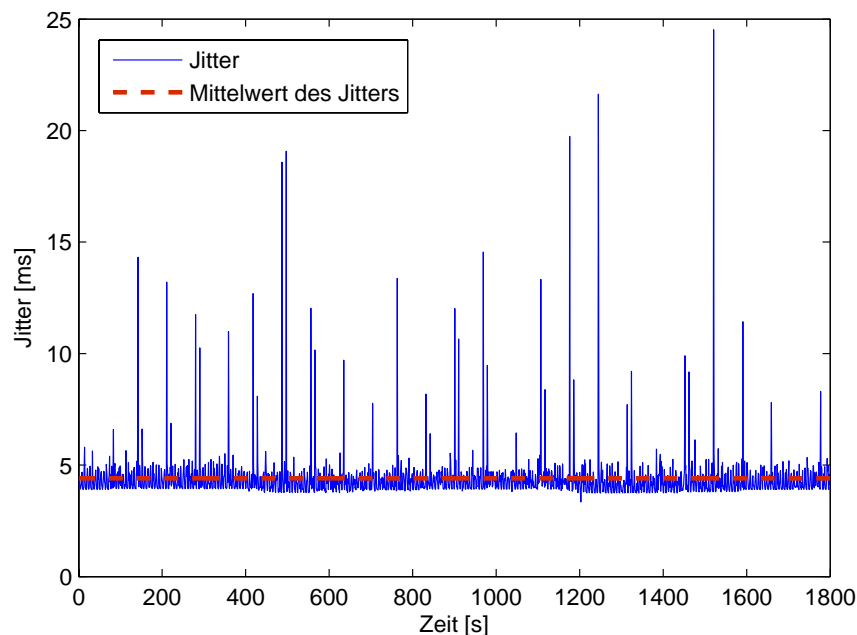


Abbildung A.4: Jitter im WLAN-Retourkanal gemessen an Client 2 bei Einzelmessung, simulierter VoIP-Codec G.711, Paketverlustrate 0/90001 (0 %)

Abbildung A.4 zeigt den Jitter im WLAN-Retourkanal, welcher an Client 2 bei Einzelmessung für den G.711 Codec gemessen wurde. Der Mittelwert des Jitters beträgt 4,41 ms. Es zeigen sich über die gesamte Messdauer von 30 Minuten Ausreißer des Jitters. Die Paketverlustrate bei dieser Messung ist 0 %.

A.3 TCP-Durchsatz einer WLAN-Richtfunkstrecke im 5-GHz-Frequenzbereich

Abbildung A.5 zeigt das Ergebnis einer TCP-Durchsatzmessung auf derselben Richtfunkstrecke zwischen dem Studienzentrum in der Inffeldgasse und dem Observatorium am Lustbühel (Graz). Die Entfernung zwischen den beiden Standorten beträgt 2700 m. Es wurden die gleichen WLAN-Aluminium-Gitterspiegel verwendet (siehe Datenblatt), lediglich die verwendete Hardware unterscheidet sich. Für die Messungen wurde ein sogenannter Single Board Computer (Alix.2C3 Board) verwendet. Dieser wurde per Mini-PCI-Steckplatz um eine WLAN-Karte des Typs Ubiquiti Networks XR5 basierend auf dem Atheros AR5414 Chipsatz erweitert. Für eine genauere Beschreibung der Hardware siehe [Hen09].

Ein TCP-Durchsatz von ca. 25 - 30 MBit/s konnte dabei über mehrere Tage gemessen werden. Dieser Durchsatz wurde rein auf der WLAN-Strecke im 5-GHz-Frequenzbereich gemessen, die Acknowledgements werden über dieselbe Strecke zurückgesendet. Bei der

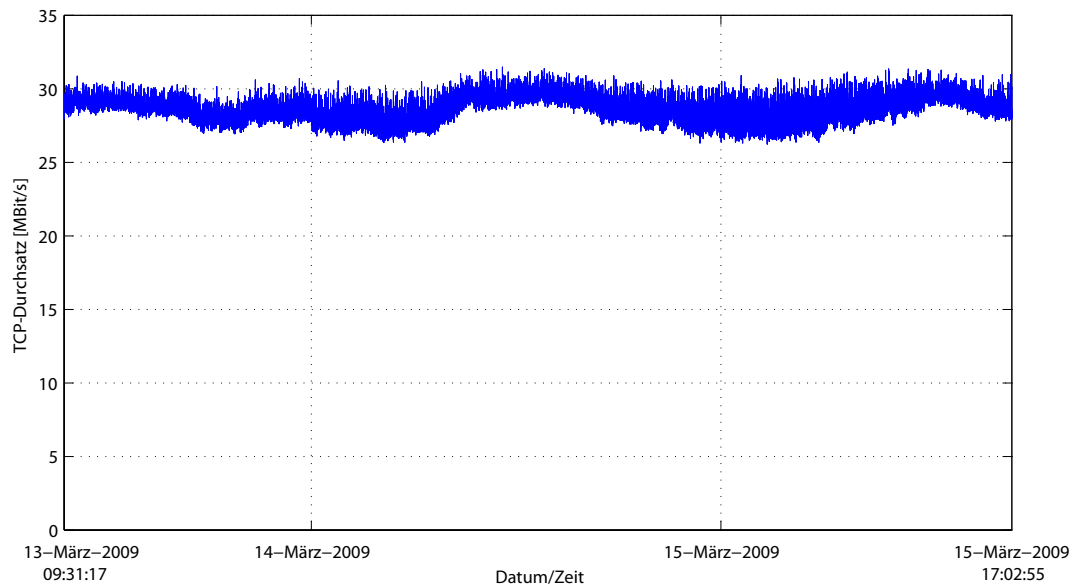
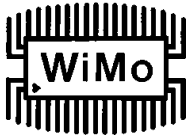


Abbildung A.5: TCP-Durchsatz und Verfügbarkeit einer 2,7 km WLAN-Richtfunkstrecke im 5-GHz-Frequenzbereich

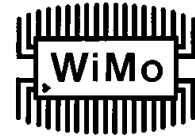
Messung wurde ebenso das Tool iperf verwendet. Die Messwerte stammen aus einem Bakkalaureatsprojekt [Hen09], welches im gleichen Zeitraum wie diese Masterarbeit am Institut für Breitbandkommunikation (IBK) durchgeführt wurde.

B Datenblätter



5-6 GHz Grid Antenna

order no. 18685.5



Robuste Alu-Gitterspiegel für 5-6 GHz WLAN.
Die WLAN-Gitterspiegel aus gegossenem Aluminium kombinieren sehr hohe Stabilität und geringe Windlast für lange Einsatzdauer der Antennen. Die speziell entworfenen Spiegelform bietet ca. 31dBi Gewinn! Im Gegensatz zu anderen Parabolantennen sind diese Antennen auch für das 5 GHz-Band auf die bestmögliche Leistung optimiert. Durch die geteilte Bauform des 90x70cm Spiegels ist das Packmaß besonders klein, das wirkt sich positiv auf die Versandkosten aus. Eine Neige/Schwenkhalterung für Mastmontage ist im Lieferumfang enthalten. Anschluß: N-Buchse.

Rugged WiFi grid dish antennas

The 90 cm x 70 cm grid reflector yields a 5 GHz grid with gain of 31 dBi which is about 3 dB higher than equivalent products. New parabolic 90 x 70 cm aluminium diecast grid, very rugged and insensitive to harsh weather conditions. The design is such that the grid is moulded in two halves (split-design) which results in a 65% reduction in packaging volume. The feed design also optimises aperture efficiencies which gives significantly higher gain when compared to similar grid antennas.

Features:

- UV Resistant powder coat finish
- Rugged outdoor construction
- Quick and easy installation
- Light weight and low wind resistance
- Azimuth and elevation continuous adjustment

Application:

- Ultra-secure wireless LAN point-to-point communication
- Can be used as client antennas in a wireless network or in similar proprietary standards operating in the 5– 6 GHz frequency band.
- Long range CPE installation
- Long range Point-to-Point Links

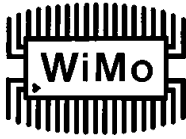


WiMo Antennen und Elektronik GmbH

Am Gäxwald 14, D-76863 Herxheim Tel. (07276) 96680 FAX 9668-11

<http://www.wimo.com>

e-mail: info@wimo.com



5-6 GHz Grid Antenna

order no. 18685.5



Specifications:

Electrical:

Gain (max) 31 dBi (+0.5 dB)

Frequency 5000 - 6000 MHz

VSWR < 2.0:1

Feed power handling 10 W

E-plane 3 dB beamwidth 12° (± 5°)

H-plane 3 dB beamwidth 15° (± 5°)

Nominal input impedance 50 Ohm

Polarisation Linear

Connector: N female

Environmental:

Wind Loading 160 km/h

Temperature Range - 20° C to +70° C

Shock 40G at 10 msec

Thermal Shock - 20° C to +70° C : 10 cycles

Water Ingress Rating IP65 (NEMA 4X)

Salt spray in accordance with test method No 72 Din 50021

Mechanical:

Actual reflector Dimension 90 cm x 70 cm

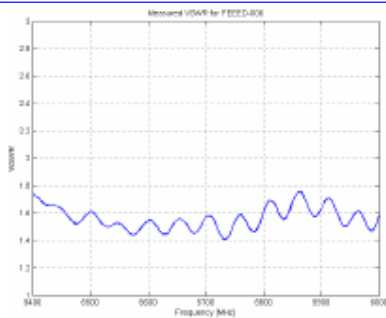
Dish focal length 30 cm

Weight 3.3 kg

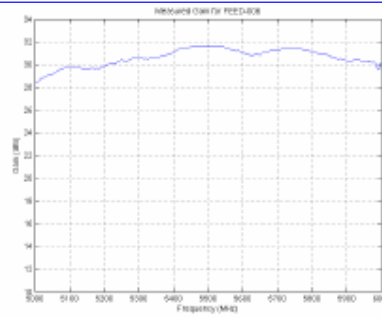
Dish Material Diecast Aluminium

Bracket High strength with elevation And Azimuth tilt

VSWR and Gain Pattern:

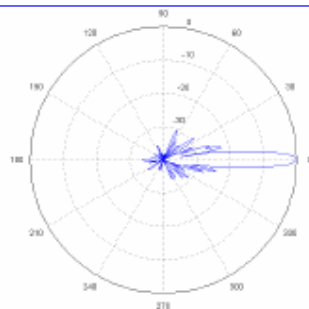


VSWR

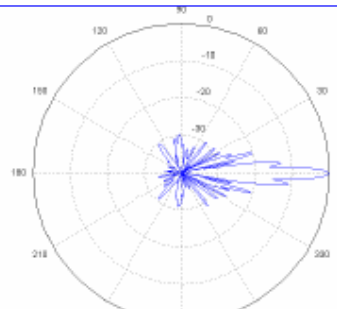


Gain

Radiation Patterns



E-Plane



H-Plane

WiMo Antennen und Elektronik GmbH

Am Gäxwald 14, D-76863 Herxheim Tel. (07276) 96680 FAX 9668-11

<http://www.wimo.com>

e-mail: info@wimo.com



iWavePort WP54AG

WIRELESS-AG 54Mbps XR™ ACCESS POINT

The **Complex WP54AG Wireless-AG 54Mbps XR™ Access Point** is a high-performance AP that is designed for enterprise and public access application. Atheros AG technology provides WP54AG with higher throughput at 802.11a (5GHz) vs 802.11g's congested 2.4GHz band and the ability to operate in more channels.

WP54AG is capable of operating in 7 different modes like Access Point Bridging, Access Point Client, Gateway, Wireless Routing Client, Wireless Ethernet Adapter, Point to Point and Point to Multipoint. The SNMP feature included in WP54AG provides easy user setup. Equipped with SMA antennas and Long Range Parameter Settings, WP54AG provides a wider coverage for your network. An integrated Power over Ethernet (PoE) allows WP54AG to be used in areas where power outlets are not readily available.

WP54AG also incorporates unique features such as – the Parallel Broadband feature that allows bandwidth aggregation and fail-over redundancy capability. Long-Range parameter settings provides WP54AG with the ability to auto-calculate parameters such as slot time, ACK time-out and CTS time-out on the wireless device based on range requirements entered to achieve a longer range. Spanning Tree Protocol (STP) that provides the wireless network with extra redundancy and reliability; the network will auto-reconfigure when there are changes to the network connections. The Pseudo VLAN feature enables the creation of wireless isolated nodes or workgroups between wireless clients to increase network privacy in a wireless LAN installation.

Fast and Reliable Transmission

Complex WP54AG delivers a speed of up to 54Mbps and provides reliable wireless transmission to all wireless users with automated fallback capability.

Power over Ethernet

Build-in Power over Ethernet feature eliminates the requirement for external power adapter.

Security

To protect your security and privacy, WP54AG is armed with many enhanced wireless security features such as Wi-Fi Protected Access (WPA), WPA2, MAC Address Filtering, IEEE 802.1x Authentication and 64/128-bit WEP (Wired Equivalent Privacy) to ensure privacy for the heterogeneous mix of users within the same wireless LAN, while maintaining full access to the establishment's resources. The Pseudo VLAN feature enables the creation of wireless isolated nodes or workgroups between wireless clients to increase network privacy in a wireless LAN installation.

Long Range Support

Complex WP54AG is suitable for long-range wireless deployment with Complex proprietary Long Distance Algorithm for ACK and CTS timeout adjustment support. Our proprietary algorithm also provides recommended values for the parameters and at the same time allows for manual fine-tuning for optimal performance. Practical uses of this improvement include the deployment of long-range point-to-point and point-to-multipoint wireless networks with a faster turn-around time.

Spanning Tree Protocol (STP)

Appropriate use of STP provides the wireless network with extra redundancy and reliability. The network will be able to auto-configure and re-configures when there are changes to the network connections.

- ◆ Atheros eXtended Range technology for wider wireless coverage
- ◆ Built-in PoE for easier deployment
- ◆ Enhanced security with Complex's exclusive Pseudo VLAN & WPA2
- ◆ WPA Support in Client Mode
- ◆ Supports up to 7 operating modes

iWAVEPORT WP54AG

TECHNICAL SPECIFICATIONS

STANDARDS

- IEEE 802.11a
- IEEE 802.11g
- IEEE 802.11b
- IEEE 802.11
- IEEE 802.3u

SPEED

Up to 54Mbps with eXtended Range

WIRELESS FREQUENCY RANGE

IEEE 802.11a	5 ~ 5.725 GHz
IEEE 802.11g	2.412 ~ 2.462 GHz
IEEE 802.11b	2.412 ~ 2.484 GHz

WIRELESS OPERATING RANGE

IEEE 802.11a	85m (54Mbps outdoor)
	20m (54Mbps indoor)
IEEE 802.11g	80m (outdoor)
	20m (indoor)
IEEE 802.11b	400m (outdoor)
	100m (indoor)

*Subjected to environmental conditions.

NETWORK INTERFACE

2* RJ45 10/100Mbps auto-negotiating with Auto MDI/MDI-X

DEVICE MANAGEMENT

- Web based – Internet Explorer v6 or later; Netscape Navigator v6 or later
- SNMP

MODULATION TECHNIQUES

OFDM (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM), DSSS (BPSK, QPSK, CCK)

RECEIVER SENSITIVITY

5 GHz Operation	
6 Mbps	-92dBm
54Mbps	-73dBm
2.4 GHz Operation	
CCK, 1Mbps :	-95dBm
CCK, 11Mbps :	-90dBm
OFDM, 6Mbps :	-92dBm
OFDM, 54Mbps:	-73dBm

OPERATING CHANNELS

US and Canada	11 Channels
Europe	13 Channels
Japan	14 Channels

ADVANCED FEATURES

- Wireless Distribution System (WDS)
- Long Range Parameter Settings (LDA)
- HTTP Web-Management for WP54G (1a) & (1b) only
- Parallel Broadband (in Gateway mode using WDS)
- SNMP
- MAC Address Filtering
- WPA support in Client mode
- Built-In PoE

SECURITY

- 64/128-bit WEP
- WPA/WPA2
- IEEE 802.1x Authentication
- Wireless Pseudo VLAN 64/ 128-bit WEP
- Tagged VLAN
- WPA support in Client mode

WIRELESS OPERATING MODES

- Access Point Bridging
- Access Point Client
- Gateway
- Wireless Ethernet Adapter
- Wireless Routing Client
- Point to Multipoint
- Point to Point

POWER OVER ETHERNET (PoE)

WP54AG (1a)	Compatible with only Compex Proprietary PoE injector
WP54AG (1b)	Compatible with any IEEE 802.3af PoE injector

ANTENNA TYPE

SMA, 2dBi Detachable Antenna

LED INDICATORS

Power, Diagnostic, LAN, WAN, Link

POWER REQUIREMENTS

Input Voltage: 9 VDC, 5 W (MAX)

WIRELESS TRANSMIT POWER

IEEE 802.11a	17dBm (+1.0dBm/ -1.5dBm)
IEEE 802.11g	19 dBm (+1.0dBm/ -1.5dBm)
IEEE 802.11b	20 dBm (+1.0dBm/ -1.5dBm)

SAFETY & EMISSIONS

Emissions: FCC Part 15 Sub Class B, CE R&TTE
Immunity: EN 55022 (CISPR 22)/ EN 55024 Class B, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3 CE Mark, EN 60950

TEMPERATURE

Operating -20°C to 70°C
Storage -65°C to 100°C

HUMIDITY

Operating 5% to 95% (non-condensing)
Storage 5% to 90% (non-condensing)

DIMENSIONS & WEIGHT

Dimensions	145 x 148 x 41 m (With Antenna)
Weight	260 grams



Compex Systems Pte Ltd
135 Joo Seng Road,
#08-01
PM Industrial Building
Singapore 368363

tel: (65) 6288 8220
fax: (65) 6280-9947
www.compex.com.sg

Compex Inc, USA.
840 Columbia Street,
Suite B Brea. CA 92821

tel: (714) 482 0333
fax: (714) 482-0332
www.cdx.com



12. Technische Daten

Allgemein

DVB Receiver nach DVB-t Standard ETSI 300 744
 Mehrsprachiges On Screen Display (OSD)
 Teletext Reinsertion in vertikale Austastlücke (VBI)
 Automatischer Sendersuchlauf
 Erweiterter EPG



Grundspezifikationen

COFDM 2k und 8k: 8 MHz Kanal Bandbreite
 Frequenz-Schrittweite: 167 kHz
 QPSK und QAM 16/64
 Unterstützung von Reed-Solomon Decoding
 Guard Interval Modes: 1/32, 1/16, 1/8, 1/4 active symbol duration
 FEC Modes: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
 Maximale Anzahl PID Filter: 32

Eingang RF System

Eingangsfrequenzbereich: 48 - 860 MHz
 RF-Anschluß: IEC female
 Eingangsimpedanz: 75 Ohm nominal
 Eingangsverlust: typ. 8 dB (75 Ohm)
 RF Eingangslevel: -90 dBm bis -20 dBm

Ausgänge

SCART (Euro TV) mit Composite Video, RGB oder Y/C (Einstellbar per Software), Audio L/R
 SCART Umschaltspannung: 0 / 6 / 12 V
 USB-Interface (Vers. 1.1) für Verbindung mit PC

Video/Audio Decoder (Betrieb am TV Gerät)

MPEG2 Transport: ISO/IEC 13818-1
 Input Rate / TS Parser: 72 Mbps
 Video Decoding (ISO/IEC 13818-2) per Hardware: MPEG2 MP@ML
 Video Ausgabeformat (SCART): PAL / NTSC
 Bildformat: 4:3, 16:9, 2.21:1 (nur PAL)
 Audio Decoding (ISO/IEC 13818-3) per Hardware: MPEG/MusicCAM
 Layer I & II

Audio Modus: Single, Dual Mono, Stereo und Joint Stereo

Sampling Frequenz: 32, 44.1 and 48 KHz

DAC Auflösung: 24 Bit

Spannungsversorgung:

DC 12 V \pm 10 %

Leistungsaufnahme: < 20 W

Abmessungen: ca. 204 x 148 x 37 [mm]

Temperaturbereich: +5°C bis +40 °C