



Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign
(IWID) Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

**zur Erlangung des Grades „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik**

Thema: Messtechnische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Datenrate in WLAN-Netzen und der Auslastung des Funkkanals in verschiedenen Wohnumgebungen

Eingereicht von: Marcel Hartmann

Angefertigt für: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Sonderstelle Itzehoe

Matrikel: 20143043

Ausgabetermin: 20. März 2018

Abgabetermin: 31. März 2018

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr Dipl.-Ing. (FH) Felix Schad

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

Danksagung

Meine ersten Danksagungen gehen an Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher und Herr Dipl.-Ing. (FH) Felix Schad, die meine Bachelorarbeit betreut und begutachtet haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Korrektorin Franziska Kuhlee und den Korrekturen, Alexander Schlaps und Werner Gehlhar, für die investierte Zeit beim Korrigieren der Arbeit bedanken.

Kurzfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit untersucht den Zusammenhang zwischen der erzielbaren Datenrate zwischen zwei auf einem gemeinsamen Funkkanal betriebenen IEEE 802.11-WLAN und dem Auslastungsgrad dieses Kanals im Laborbetrieb, um Rückschlüsse einer Belegungssituation in ländlichen, vorstädtischen und städtischen Gebieten (rural, suburban, urban) in der Praxis zu erhalten. Die Belegungsmessungen sind hierbei nicht auf einen Kanal beschränkt, sondern untersuchen den gesamten 2,4 GHz ISM-Bereich.

Das Ziel besteht darin, eine Aussage zur maximalen Auslastung eines Funkkanals zu treffen und ob im 2,4 GHz – Bereich eine Erweiterung erforderlich ist.

Abstract

This bachelor thesis examines the relationship between the achievable data rate between two IEEE 802.11 WLANs running on a common radio channel and also the utilization rate of this channel in laboratory, in order to draw conclusions about occupancy situations in rural, suburban and urban areas (rural, suburban, urban) in practical scenarios. The occupancy measurements are not limited to one channel, but examine the entire 2.4 GHz ISM range.

The goal is to make a statement about the maximum utilization of a radio channel and to check whether an extension is needed in the 2.4 GHz range.

Aufgabenstellung

- Einarbeitung in die Thematik Belegungsmessung und WLAN/IEEE 802.11
- Erarbeitung und Programmierung eines Messkonzepts für die Belegungsmessung unter Zuhilfenahme des neuen Empfängersystems RFeye im Frequenzbereich von 2,399 GHz – 2,485GHz
- Durchführung, Analyse und Bewertung der Resultate

Abkürzungsverzeichnis

BPSK	Binary Phase Shift Keying
CRFS	Compact Radio Frequency System
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FDM	Frequency Division Multiplexing
GM	General Motors
IBM	International Business Machines
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
PHY	Physical Layer
PSK	Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

Inhaltsangabe

<u>Danksagung</u>	I
<u>Kurzfassung</u>	II
<u>Aufgabenstellung</u>	III
<u>Abkürzungsverzeichnis</u>	IV
<u>Inhaltsangabe</u>	V
<u>1 Einleitung</u>	1
<u>2 Theorie</u>	2
2.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers 802	2
2.1.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.11	3
2.1.2 Zugriffsverfahren Carrier Sense Multiple Access (CSMA)	3
2.1.3 Modulations- und Übertragungsverfahren	4
2.1.4 Frequenzen und Kanäle	7
2.2 Belegungsmessung	8
2.2.1 Parameter einer Belegungsmessung	8
2.2.2 Messproben	9
2.3 Messempfänger RFeye Node	11
2.3.1 Server	12
2.3.2 Programmierung	13
<u>3 Laboruntersuchung Wireless Local Area Network</u>	15
3.1 Untersuchung 1 – Träger-Rausch Verhältnis	15
3.1.1 Messmittel	15
3.1.2 Messaufbau	16
3.1.3 Messablauf und Auswertung	16
3.1.4 Auswertung der Belegungsdaten	25
3.2 Untersuchung 2 – Träger-Interferenz Verhältnis	30
3.2.1 Messmittel	30
3.2.2 Messaufbau	31
3.2.3 Messablauf und Auswertung	31

Inhaltsangabe	VI
4 Belegungsmessung	34
4.1 Messmittel	37
4.2 Messaufbau	37
4.3 Messergebnisse und Auswertung	37
4.3.1 Standort 1 Hohenaspe (rural)	38
4.3.2 Standort 2 Itzehoe (suburban)	41
4.3.3 Standort 3 Hamburg (urban)	44
Zusammenfassung und Ausblick	VII
Anhang	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Spektrenverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XI
Quellenverzeichnis	XII
Eidesstattliche Erklärung	XVI

1 Einleitung

Seit Einführung der drahtlosen Übertragungstechnik Wireless Local Area Network (WLAN) steigt der Bedarf an Übertragungsbandbreite. Eine große Anzahl von Anwendern und deren Endgeräte müssen sich somit die beschränkte Ressource (Frequenz) teilen. Hierzu sind in der [IEEE 802.11] die Frequenzbereiche in Funkkanäle unterteilt. Das Übertragungsverfahren verfügt zwar über Möglichkeiten zur Kollisionserkennung und -vermeidung, dennoch sind die Kanalnutzungen untereinander in der Regel nicht koordiniert. Jeder Anwender kann sich frei den Funkkanal wählen, auf dem er sein WLAN betreibt. Zudem befinden sich die verschiedenen Netze oft räumlich in unmittelbarer Nähe und werden zu ähnlichen Tageszeiten genutzt. Dadurch entstehen Konfliktsituationen beim Zugriff auf den Funkkanal. Diese Konflikte äußern sich in der Reduktion der verfügbaren Datenrate und können im schlimmsten Fall zu Verbindungsabbrüchen führen.

Der Prüf- und Messdienst (PMD) der Bundesnetzagentur erhält zunehmend Störungsmeldungen, die diese Problematik beschreibt. Die Tatsache, dass der WLAN Bereich in Deutschland allgemein (siehe [Vfg35_02] und [Vfg10_13]) zugeteilt ist und somit kein Anrecht auf Entstörung bei Gleichkanalnutzung besteht, stößt bei dem Verbraucher auf Unverständnis. Da die Bundesnetzagentur die höchste Instanz im Bereich Frequenzverwaltung ist, sieht sie sich in der Pflicht Ursachenforschung zu betreiben. Unter dem Begriff „Gesamtschau“ (Begriff der Störungsbearbeitung in PMD) wird das Thema aus verschiedenen Sichtweisen, z.B. aus Sicht des Kunden, bearbeitet. Bei der Gesamtschau in dieser Arbeit muss die Sicht des Kunden im Laborversuch simuliert werden.

Zu Beginn dieser Arbeit werden theoretische Grundlagen in den Bereichen WLAN und Belegungsmessung vermittelt. Für die Belegungsmessung (Sicht des PMD) muss untersucht werden, wie sich WLAN-Geräte (Sicht des Kunden) unter realen Bedingungen verhalten, welche Datenraten wirklich erzielbar sind und was passiert, wenn ein Router mit einem Störer kollidiert. Hierzu werden im Abschnitt 3 unterschiedliche Untersuchungen an WLAN-Netzen durchgeführt. Untersuchungen, wie z.B. das Überlagern des Funkkanals mit einem Störsignal. Die Belegungsmessung im Punkt 4 wird auf Grundlage der gesammelten Daten konfiguriert und kann dann mit den Laboruntersuchungen verglichen werden.

2 Theorie

2.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers 802

Am 12. März 1980 genehmigte die „Institute of Electrical and Electronics Engineers“ die Arbeitsgruppe 802, mit dem Ziel eine Vereinheitlichung der Verbindungstechnik zu schaffen. Bis zu diesem Zeitpunkt entwickelten namenhafte Hersteller unterschiedliche Standards (z.B. GM den Token Bus und IBM den Token Ring) für ihre Netzwerktechnik. Schon der Standard 802.3 (Ethernet) erzielte große Beachtung in der Netzwerktechnik und wurde von unzähligen Herstellern implementiert, siehe Quelle [Li_2]. Der Standard IEEE 802 ist ein Netzwerkprotokoll, dass mit Hilfe des ISO/OSI-7-Schichtenmodells [ITU-T REC. X200] als eine Designvorlage für Kommunikationssysteme und dessen Protokolle beschrieben werden kann. Der Standard IEEE 802 wird in den Schichten 1 (Physical Layer) und 2 (Data Link Layer) des 7 -Schichtenmodells eingeordnet. Jede Schicht kann in weitere Instanzen unterteilt werden. Die Unterteilung in Medium Access Control (MAC) und Logical Link Control (LLC) im Standard IEEE 802 erfolgt in der Schicht 2 (2a MAC und 2b LLC), sodass zwischen dem Zugriffverfahren, der Verbindungsteuerung und Sicherung unterschieden werden kann.

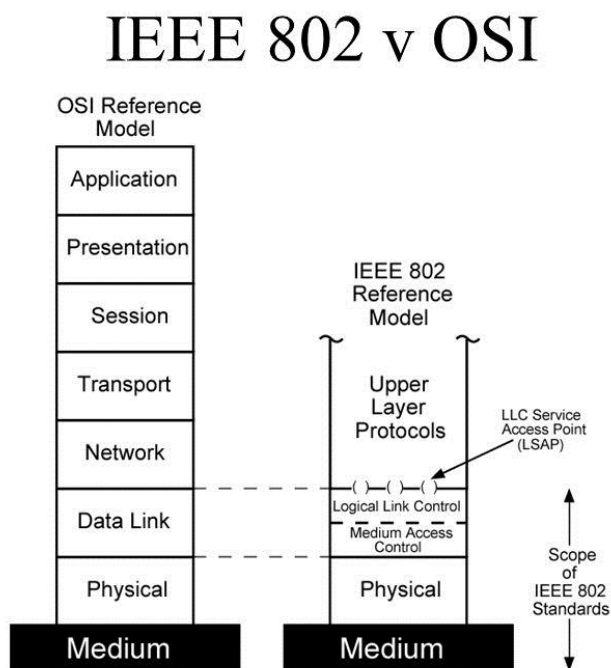


Abbildung 1: OSI-Referenzmodell u. IEEE 802, [Abb_1]

In der Abbildung 1 sind die Schichten der Referenzmodelle gegenübergestellt. Die logische Kommunikation wird in horizontaler und die tatsächliche Kommunikation in vertikaler Richtung geführt. Der LLC stellt dabei eine direkte Schnittstelle vom Übertragungsmedium zum Endgerät her und hat den Vorteil der Vereinheitlichung einer Schnittstelle, die eine hardwareunabhängige Funktion gewährleistet. Heute sind die Standards 802.3 (Ethernet/LAN), 802.11 (WLAN) und 802.15.1 (Bluetooth) fester Be-

standteil unserer Datenkommunikation, wobei in der Arbeit nur auf den [IEEE Std 802.11] WLAN eingegangen wird.

2.1.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.11

Ein Wireless Local Area Network bezeichnet ein räumlich begrenztes Netzwerk, in welchem Geräte der Informationstechnik drahtlos miteinander kommunizieren können. Dieser Standard [IEEE Std 802.11], ein Protokoll zur drahtlosen Datenkommunikation, wurde im Jahr 1997 eingeführt. Zu diesem Zeitpunkt war eine Übertragungsgeschwindigkeit von max. 2 Mbit/s möglich. Im den kommenden Jahren stieg das Kommunikationsverhalten drastisch an und das Protokoll wurde mehrmals erweitert. Hauptaugenmerk dieser Erweiterungen war die Erhöhung des Datendurchsatzes. Mit Hilfe besserer Zugriffsverfahren und höherwertigeren Modulationsverfahren konnte der maximale Durchsatz von 2 Mbit/s auf 600 Mbit/s [IEEE802.11, Klausel 17/18/19] erhöht werden.

2.1.2 Zugriffsverfahren Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

Jedes Netz benötigt einen physikalischen Verbindungskanal (z.B. Luft), um mit anderen Teilnehmern zu kommunizieren. Diese Kommunikation soll möglichst parallel erfolgen und muss geregelt sein. Zugriffsverfahren regeln die Art und Weise, wie die Kommunikation stattfinden soll. Diese Verfahren sind Protokolle der Bitübertragungs- und Sicherungsschicht (PHY- und MAC – Layer).

Das wichtigste Zugriffsverfahren in der IEEE - Familie ist das Carrier Sense Multiple Access (CSMA).

CSMA reduziert das Kollisionsrisiko, um den Durchsatz zu erhöhen. Dieses Zugriffsverfahren vergewissert sich vor dem Senden eines Datenpaketes, ob der Übertragungskanal frei ist.

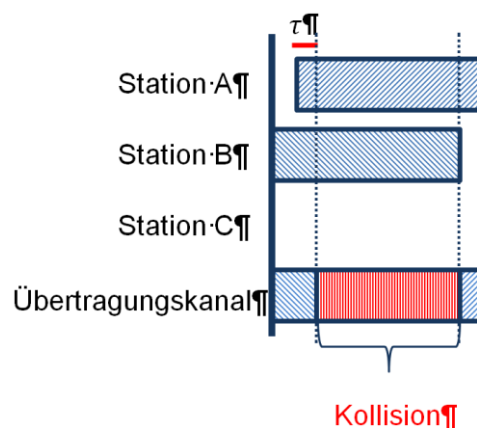


Abbildung 2: CSMA, [Abb_2]

Trotz Überprüfung des Übertragungskanals können, wie in Abbildung 2 zu sehen, Kollision durch Signallaufzeiten passieren. Nach dem Senden eines Paketes (Station A sendet) werden erst nach Verstreichen einer Signallaufzeit τ die anderen Stationen das Paket empfangen. Innerhalb dieser Zeit wird ein freies Medium erkannt und eine andere Station (Station B) beginnt seine Sendung. Nachdem eine Kollision ausgelöst wird, täuscht es dem Übertragungskanal (innerhalb der Laufzeit τ) vor er sei belegt, um an-

schließend das Medium für einen neuen Übertragungsversuch freizugeben. Die erneute Sendung erfolgt nach Ablauf einer zufälligen Zeit.

Im Bereich WLAN kommt das Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (CSMA/CA) zu tragen, denn nach Einführung der [IEEE Std 802.11] stellte man fest, dass die ursprüngliche Art des CSMA nicht funktionierte. Eine zuverlässige Kollisionserkennung ist nicht möglich, da die Dämpfung der Luftschnittstelle sehr hoch ist und nicht jede Station die Anderen erkennen kann. Die Einführung des CSMA/CA zur Verwendung in drahtlosen Übertragungstrecken erbrachte große Erfolge im Umgang mit WLAN.

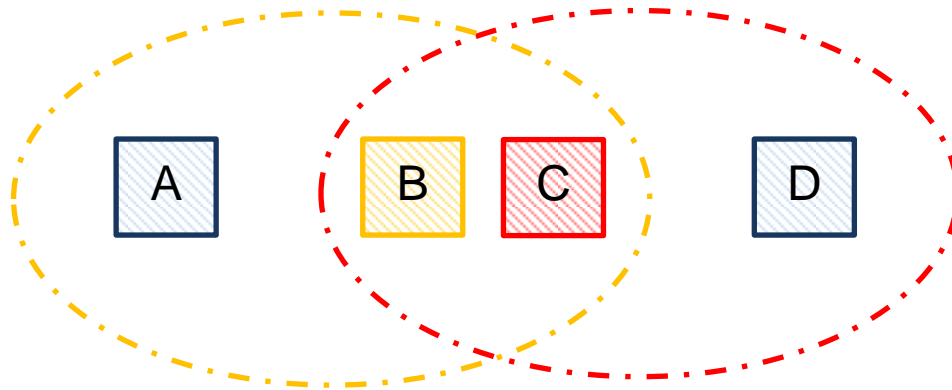


Abbildung 3: Reichweiten der Stationen im CSMA/CA, [Abb_3]

Bei der Abbildung 3 ergeben sich zwei Probleme, die unter den Begriffen „Hidden-Terminal“ und „Exposed-Terminal“ bekannt sind.

Betrachtet man die Stationen A-D und dessen Reichweiten, stellt man fest, dass nicht jede Station die Anderen erreichen kann. Sie ist vor den Stationen versteckt (engl. Hidden) und erkennt somit keine Kollision außerhalb ihrer Reichweite.

Mit dem Exposed (zu. dt. ausgesetzt) Terminal wird eine Station am Senden gehindert, obwohl die empfangende Station diese Sendung nicht erkennen kann. Ein Beispiel dieser Problemstellung ist: Die Station B sendet an A. C könne an D senden, wird aber von B daran gehindert zu senden, da der Übertragungskanal belegt ist.

Beide Probleme können mit dem CSMA/CA Verfahren minimiert werden.

2.1.3 Modulations- und Übertragungsverfahren

Um das Frequenzspektrum effektiv nutzen zu können, bedient man sich verschiedenster Übertragungs- und Modulationsverfahren.

Umgangssprachlich wird der Begriff Modulation für jegliche Art von Trägerveränderung verwendet. Dies ist jedoch nicht korrekt, denn nur bei einem analogen Signal spricht man von „Modulation“. Im digitalen Bereich ist es eine „Tastung“, so auch beim WLAN. Wichtige Modulationsverfahren der WLAN-Technologie sind die Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) und die Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, die im Punkt 2.1.3 beschrieben werden.

2.1.3.1 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

Spreiztechnologien haben ihren Ursprung beim Militär. Sie wurden eingesetzt, um den Übertragungskanal vom Abhören zu schützen. In der digitalen Datenübertragung verwendet man Spreiztechnologien, damit schmalbandige Störsignale die Datenübertragung nicht beeinflussen. Bei einer Spreizung wird das Signal mittels eines sehr breitbandigen Rauschsignals multipliziert. Die Entspreizung des Einzelsignals erfolgt im Empfänger durch Korrelation mit dem zur Spreizung genommenen Rauschsignal. Dies bedeutet, der Empfänger muss die Codierung des Spreizverfahrens kennen. Die bekannteste Codierung des Verfahrens ist der 11 Bit Barker, der in der Abbildung 4 dargestellt ist.

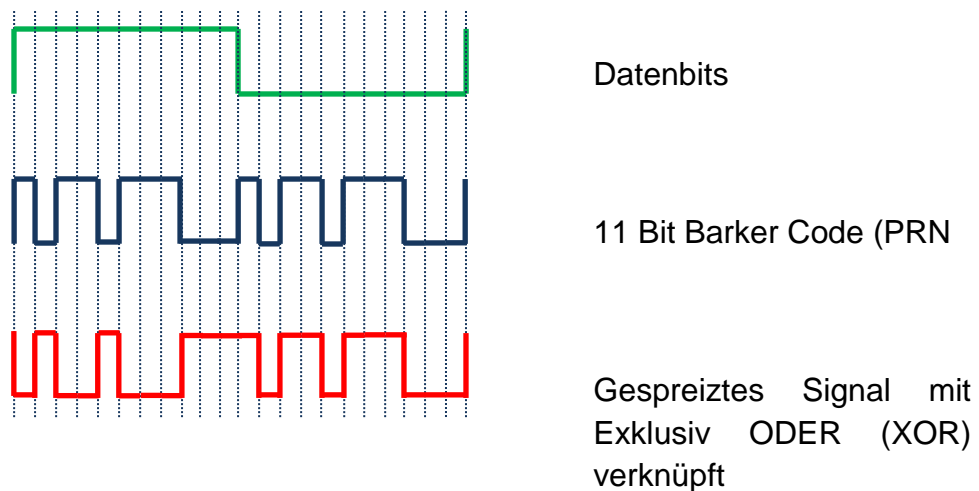


Abbildung 4: 11-Bit Barker Code DSSS, [Bu_3] Seite 63

Die Daten- und Code-Bits werden mit dem Logik Gatter XOR verknüpft und erhält das gespreizte Signal.

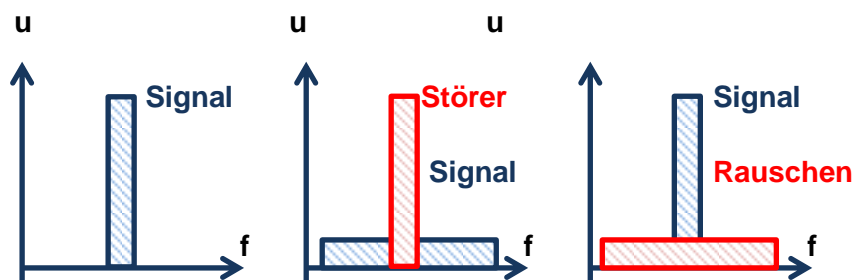


Abbildung 5: Störresistenz bei Spreiztechnologie DSSS, [Bu_3] Seite 64

Die Spreizung des Nutzsignals kann im Übertragungskanal mit einem schmalbandigen Störer kollidieren, ohne den Informationsgehalt der Nachricht zu verlieren. Durch Entspreizung wird das Störsignal als Rauschen erkannt, was in der Abbildung 5 verdeutlicht wurde. Im DSSS werden die Tastungen BPSK und QPSK verwendet.

2.1.3.2 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)

Die OFDM ist ein Vielträgerverfahren, mit dem es möglich ist, viele Daten über eine geringe Bandbreite zu übertragen. Dieses Verfahren ist, wie die Spreiztechnologie DSSS, sehr robust gegenüber schmalbandigen Störungen. Der Hauptträger wird auf viele Subträger (Bandbreite bestimmt die Anzahl der Subträger) aufgeteilt, damit ein Störer die Übertragung nicht gefährdet. Nur Datenpakete, die durch einen Störer unkenntlich gemacht wurden, müssen erneut angefordert werden. Basis der OFDM ist die FDM, die in Form der Abbildung 6 den Unterschied beider Multiplexverfahren darstellt.

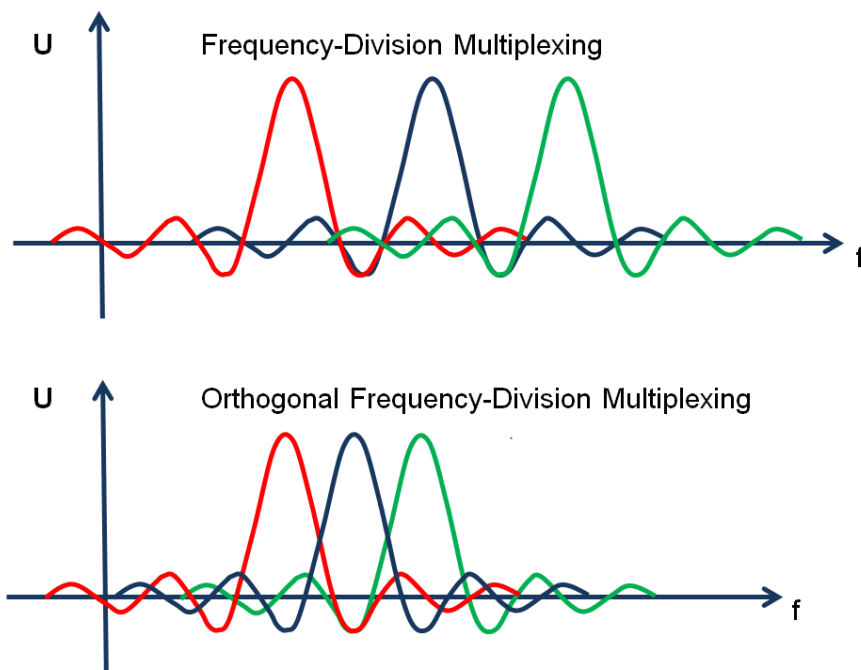


Abbildung 6: Vergleich FDM mit OFDM, [Bu_2] Kapitel 19 Seite 347-356

Prinzipiell verhalten sich beide Vielträgerverfahren identisch, jedoch benötigt die FDM aufgrund des größeren Schutzabstandes eine deutlich höhere Bandbreite. Unter der Orthogonalität beim FDM versteht man, dass jeder Spitzenwert eines Subträgers in den Nulldurchgang des benachbarten Subträger fällt. Die Abstände der Subträger werden durch den Parameter Symboldauer bestimmt.

In der Tabelle [IEEE Std 802.11n, Table 20-5, S. 265] werden weitere OFDM-Parameter definiert.

Kernparameter dieser Tabelle sind:

- Einzelbandbreite der Subträger mit 312,5 kHz
- Diskrete Fourier- Transformationsperiode bzw. Symboldauer von 3,2 μ s
- Schutzintervall von 0,8 μ s

Diese Parameter werden benötigt, um das Signal zu identifizieren und ggf. nachzubilden.

Die OFDM ist in der Lage, verschiedene Datenraten über die Tastung (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) der einzelnen Subträger zu erhalten.

Besonderheit dieses Standard [IEEE Std 802.11n] ist die nicht festgelegte Sendeleistung, trotzdem müssen die Vorgaben der Regulierungsbehörden eingehalten werden, siehe z.B. [Vfg10_13].

2.1.4 Frequenzen und Kanäle

Die für WLAN typischen Funkfrequenzen befinden sich sowohl im Bereich 2,4 GHz und 5 GHz, als auch im 1 GHz und 60 GHz Bereich. Diese Frequenzbereiche sind innerhalb Deutschlands allgemein zugeteilt (siehe [Vfg35_02] und [Vfg10_13]) und werden auf unterschiedliche Kanäle verteilt. Da sich die Arbeit auf das ISM-Band konzentriert, wird nur der 2.4 GHz -Bereich betrachtet.

Kanal	Trägerfrequenz	Frequenzbereich	Europa	USA	Japan
1	2412 MHz	2399,5 MHz - 2424,5 MHz	x	x	x
2	2417 MHz	2404,5 MHz - 2429,5 MHz	x	x	x
3	2422 MHz	2409,5 MHz - 2434,5 MHz	x	x	x
4	2427 MHz	2414,5 MHz - 2439,5 MHz	x	x	x
5	2432 MHz	2419,5 MHz - 2444,5 MHz	x	x	x
6	2437 MHz	2424,5 MHz - 2449,5 MHz	x	x	x
7	2442 MHz	2429,5 MHz - 2454,5 MHz	x	x	x
8	2447 MHz	2434,5 MHz - 2459,5 MHz	x	x	x
9	2452 MHz	2439,5 MHz - 2464,5 MHz	x	x	x
10	2457 MHz	2444,5 MHz - 2469,5 MHz	x	x	x
11	2462 MHz	2449,5 MHz - 2474,5 MHz	x	x	x
12	2467 MHz	2454,5 MHz - 2479,5 MHz	x		x
13	2472 MHz	2459,5 MHz - 2484,5 MHz	x		x
14	2484 MHz				x (11b)

Tabelle 1: Kanalliste 2,4 GHz, [Tab_3]

2.2 Belegungsmessung

Eine Belegungsmessung ist eine Untersuchung des Hochfrequenzspektrums. Da das Frequenzmanagement sowohl regulatorisch, als auch technisch organisiert ist, muss die reelle Frequenznutzung einzelner Technologien in bestimmten Zeitintervallen wiederholt werden. Diese Basisdatensammlung ermöglicht die effektive Ausnutzung des Frequenzspektrums und bietet den Regulierungsbehörden die Möglichkeit, das Aufkommen neuer Technologien und deren Nachfrage nach Radiofrequenzen gerecht zu werden.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Belegungsmessung: die Belegungsmessung über einen bestimmten Frequenzbereich und die Kanalbelegungsmessung. Ein Beispiel hierfür ist der analoge Polizeifunk (z.B. Wellenlänge 4 m / Frequenzbereich 74,215 MHz - 87,255 MHz Unter- und Oberband). Das Vier-Meter-Band besteht aus 163 Kanälen, die in 10 kHz Raster zueinander angeordnet sind. Die Vorgaben der Parameter sind unveränderlich, somit wird in diesem Beispiel die Kanalbelegungsmessung zum Tragen kommen. Wie der Tabelle 1 zu entnehmen, ist der WLAN-Bereich in Kanäle unterteilt und sollte einer Kanalbelegungsmessung durchgeführt werden. Dies ist jedoch schwer zu realisieren, da sich Kanäle im WLAN-Bereich überlappen und Kanalbandbreiten variieren. Aus diesen Gründen wird die Belegungsmessung im Versuch den gesamten Frequenzbereich 2,4 GHz untersuchen.

2.2.1 Parameter einer Belegungsmessung

Die Belegungsmessungen orientieren sich an den in der [ITU-Rec 1880] und der [ITU-Rep. 2256] beschriebenen Verfahren. Zur Messungen werden folgende Parameter des Reports [ITU-Rep 2256] verwendet:

a) Revisit Time (T_r)

to revisit - wieder besuchen

Die Zeit, die gebraucht wird, um alle Frequenzen zu durchlaufen

b) Duration of monitoring (T_T)

Die Überwachungsdauer ist die Gesamtzeit, in der die Belegungsmessung durchgeführt wird. Sie beträgt üblicherweise 24 Stunden oder die Arbeitszeit.

c) Preset threshold level

Der voreingestellte Schwellwertpegel gibt an, ab wann ein Signal als belegt gilt.

Beispiel: threshold = - 110 dBm und Signal = - 112 dBm. Da die Schwelle nicht erreicht ist, wird das Signal nicht als belegt wahrgenommen, obwohl eine Belegung vorhanden ist.

d) Busy hour

Busy hour ist die maximale Belegung einer Frequenz im Zeitraum einer Stunde.

e) Integration Time

Die Integrationszeit ist eine Mittelwertbildung über ein bestimmtes Zeitfenster, üblicherweise 5, 15, 30 und 60 Minuten.

2.2.2 Messproben

Die Genauigkeit einer Belegungsmessung hängt von dessen Messproben ab. Da diese Messung aus stochastischer Sicht eine Schätzung ist, unterliegt sie einer Fehler- bzw. einer Messabweichung. Somit ist vorab zu prüfen, was bei der Messung erwartet wird. Die Empfehlung [R-REC-SM.1880-2-201709] bietet verschiedene Tabellen an, um einen Überblick darüber zu erhalten, wie viele Messproben benötigt werden.

In der ersten Tabelle der [R-REC-SM1880-2-201709] wird ein Vergleich zwischen der unabhängigen und der abhängigen Stichprobe vorgenommen. Um den Unterschied zu veranschaulichen wird die Literaturquelle [Bu_1, Kapitel 2, Seite 21] verwendet. Man nehme eine Urne mit verschiedenen Kugeln (Schwarz und Weiß und gleiche Anzahl) und ziehe eine Kugel (z.B. Schwarz). Sobald man die Kugel in die Urne zurücksteckt, wird die nächste Ziehung wieder unabhängig sein. Lässt man die Kugel jedoch draußen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass man eine weiße Kugel zieht, höher und somit ist die Probe voneinander anhängig.

TABLE 1

Number of dependent and independent samples required to achieve 10% relative accuracy and a 95% confidence level at various occupancy percentages (assumes a –1 s sampling period)

Occupancy (%)	Number of required independent samples	Number of required dependent samples	Required hours of dependent sampling
6.67	5 368	16 641	4.6
10	3 461	10 730	3.0
15	2 117	6 563	1.8
20	1 535	4 759	1.3
30	849	2 632	0.72
40	573	1 777	0.5
50	381	1 182	0.32
60	253	785	0.22
70	162	502	0.15

Tabelle 2: Messprobentabelle im Vergleich zwischen un- und abhängiger Stichprobe [Tab_1]

Die Tabelle 2 gibt an, wie viele Messproben benötigt werden, um eine relative Genauigkeit von 10% und ein Konfidenzniveau (Vertrauensniveau) von 95% bei verschiedenen Belegungen (in Prozent) zu erhalten. Die relative Genauigkeit bzw. der relative Fehler stellt dabei eine Bezugsgröße zum wahren Fehler her, der in den meisten Fällen nicht vorhanden ist. Das Konfidenzniveau gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit das ermittelte Ergebnis zur Gesamtheit beiträgt.

Damit die Tabelle 2 richtig angewendet werden kann, wird ein Beispiel gezeigt:

Es wird eine WLAN - Belegungsmessung durchgeführt, in der eine Belegung von 15% erkannt wird. Um sicher zu gehen, dass diese 15 % auch dem Vertrauensniveau von 95% entsprechen, müssen mindestens 2117 unabhängige Proben bei einer Stichprobenperiode von einer Sekunde genommen werden.

Aus der Tabelle wird ebenfalls ersichtlich, dass man bei voneinander abhängigen Stichproben die dreifache Menge an Proben braucht.

2.3 Messempfänger RFeye Node

Ein großer Teil dieser Arbeit besteht darin, sich mit dem neuen Messempfänger RFeye zu befassen. Der Messempfänger wird kurz im Theorieteil vorgestellt, da er nicht intuitiv zu bedienen ist. Sein Haupteinsatzgebiet ist als Stand-Alone Messstation, wie in der Abbildung 7 zu sehen. Hersteller dieser kleinen Empfänger (20x15x5 cm) ist die Firma CRFS (compact radio frequency systems) aus Cambridge, England.



Abbildung 7: RFeye mit Outdoorkit [Abb_5]

Der RFeye ist eine Soft- und Hardwarelösung. Die Software SITE [CR-32] dient zur Überwachung des Spektrums und zur Auswertung der Messdaten. Das Node ist ein auf Linux basierender Rechner, der von 10 MHz – 6 GHz mit einer Echtzeitbandbreite von 20 MHz eingesetzt werden kann. Er benötigt für einen kompletten Scan (10 MHz-6 GHz) 100 ms und ist frei programmierbar.

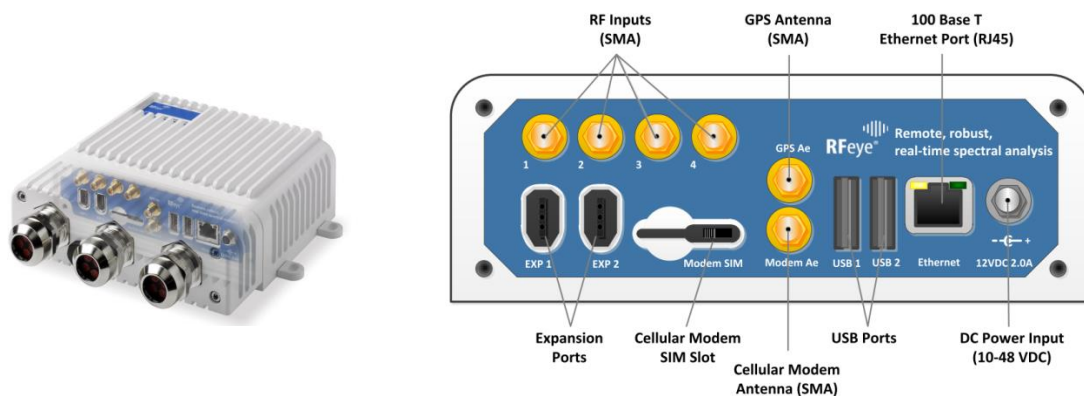


Abbildung 8: RFeye, [CR_264]

Das Node besteht aus 6 SMA Eingängen, 2 Firewire, 2 USB-Ports, ein LAN Anschluss und einen Simkartenslot, die in der Abbildung 8 zu sehen sind. Der Empfänger hat 4 Antenneneingänge aber nur einen Empfänger. Diese Eingänge werden genutzt, um mit verschiedenen Antennen einen großen Frequenzbereich zu überwachen.

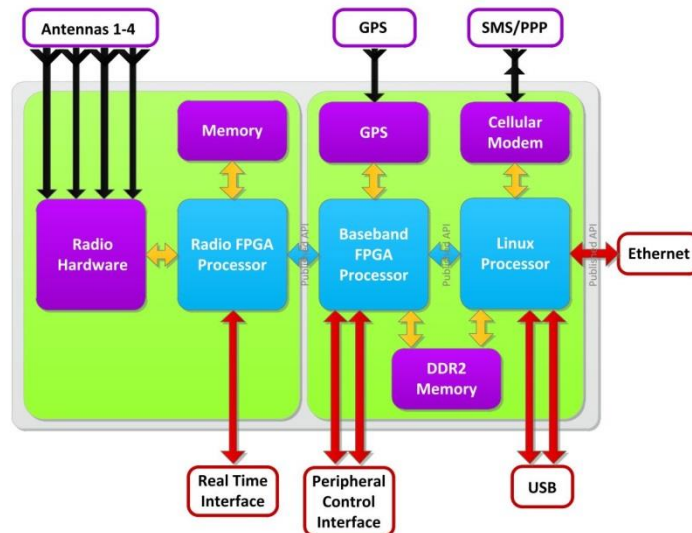


Abbildung 9: Blockschaltbild Rfeye [CR_264]

Mit dem Blockschaltbild (siehe Abbildung 9) wird deutlich, wie das Node aufgebaut ist. Mit der Ethernet Verbindung kann direkt in den Linux Prozessor eingegriffen werden. Alle Messdaten werden über Signalprozessoren dem Linux Rechner in Form einer .bin Datei übermittelt die anschließen auf ein Speichermedium zu übertragen ist.

2.3.1 Server

Der RFeye bietet keine grafische Oberfläche. Alle Befehle müssen dem Empfänger über die Konsole oder in Form eines Programmiercodes mitgeteilt werden.

Die einzigen grafischen Anwendungen beschränken sich auf zwei Server. Der erste Server ist der Informationsserver, der zur Steuerung des Nodes dient. Der zweite Server ist der Anwendungsserver für die Datensammlung (Logger-Software). Sie können mit der vorab eingestellten IP-Adresse über einen Webbrowser geöffnet werden. Nach Eingabe der IP-Adresse öffnet sich der erste Server. Der Anwendungsserver wird über den Informationsserver ein- und ausgeschaltet und ist dann mit derselben IP-Adresse unter Verwendung des Ports 8080 (z.B. 192.168.1.90:8080) erreichbar.

Status	Versions	Diagnostics	Configuration	Drops	Advanced	Live
CRFS Node Information						
CRFS						
RFEYE000286 : Status						
System Time	Fri Mar 2 03:34:47 2018					
Location	Fix	Satellites	Latitude	Longitude	GPS Date	
IP Address	192.168.1.90	0	53.545526	10.027441	06/01/80 00:04:56	
Free Memory	14016 kB					
Processes	Process	Description	State	Enabled		
	DHCP	Dynamic host configuration	●	<input type="checkbox"/>		
	DROPD	Drops manager	●	<input checked="" type="checkbox"/>		
	GPSD	GPS application	●	<input checked="" type="checkbox"/>		
	GPRSD	Cellular text message connectivity application	●	<input checked="" type="checkbox"/>		
	LOGGER	Logger application	●	<input checked="" type="checkbox"/>		
	NCPD	Control protocol server	●	<input checked="" type="checkbox"/>		
	PHD	Contact home application	●	<input type="checkbox"/>		
	PPP-TUNNELS	Cellular ethernet connectivity application	●	<input type="checkbox"/>		
	RRAPD	Internal protocol server	●	<input checked="" type="checkbox"/>		
	SSHD	Reverse tunnel application	●	<input type="checkbox"/>		

Identifier	OK	Running	GPS	Loops	Loop ms	Node Time	Error	Configuration	Clean	Updated
rfeye000286	●	●	●	600	115	2018-03-02 03:35:52	●	mmt/flashusr /cfr/rfeyed.cfg	●	2018-03-12 10:50:02
Type	Text									Updated
File	open error "mnt/1/Plugfunkmessung/2m/180302/rfeye_file_rfeye000286_180302_033547.bin": Read-only file system									2018-03-12 10:50:02
logging	Fri Mar 2 03:35:47 2018: com_rfeye_file.c: ERROR: Failed to open "mnt/1/Plugfunkmessung/2m/180302/rfeye_file_rfeye000286_180302_033547.bin": No such file or directory									2018-03-12 10:50:02
Type	Text									Updated
Logger paused										2018-03-12 10:50:02
Fix	Satellites	Longitude	Latitude	GPS Time	Updated					
0	0	10.027441	53.545526	1980-01-06 00:05:59	2018-03-12 10:50:02					

Abbildung 10: Informations- u. Anwendungsserver

Informationen, wie zum Beispiel der Ort, die Zeit, der Prozessstatus und der Versionsstand, können dem ersten Server entnommen werden. Im Anwendungsserver erhält man Informationen zum Status der Datenaufnahme. Die Datenaufnahme hängt von den jeweiligen Programmierungen ab, die im Punkt 2.3.2 erläutert werden.

2.3.2 Programmierung

Bevor der RFeye angesprochen wird, benötigt er eine IP Adresse. Diese Konfiguration erfolgt über eine startup.sh - Datei [CR_264], die in der einfachsten Form wie folgt aussehen kann:

```
IPADDR=          '192.168.2.1'
NETMASK=         '255.255.255.0'
BROADCAST=       '192.168.1.255'
```

Diese .sh- Datei wird über einen USB-Stick vom Gerät eingelesen und sollte anschließend in den zuständigen Pfad eingepflegt werden. Dadurch erhält das Node eine statische IP-Adresse, die bei Bedarf geändert werden kann.

Nachdem die Verbindung zum RFeye hergestellt wurde, fragt der Anwendungsserver einige Parameter des Informationsservers ab, die über eine ncpd-conf (NCP- Network Control Protocol) vorab festgelegt werden müssen.

Mit dieser Konfiguration ist es möglich, Peripherie anzuschließen (z.B. Logger Control Box, siehe Handbuch [CR_43] Seite 13) oder Feldstärken unter Berücksichtigung des K-Faktor-Files [CR_63] zu erhalten.

Sobald beide Konfigurationen (startup.sh und ncpd.conf) funktionieren, kann mit der Programmierung der Logger-Anwendung begonnen werden.

Alle Syntaxregeln sind im Logger-Handbuch [CR_43] beschrieben. Zur Programmierung wird das Tool „Notepad++“ verwendet, da keine Compiler bereitgestellt werden und viele verschiedene Programmiersprachen verwendet werden. Fehler bei der Programmierung können nur über den Anwendungsserver in Form eines NCPD Error Code [CR_59] erkannt werden. Diese Error-Codes dienen jedoch nur zur Orientierung und zeigen keine Syntaxfehler an.

Das Node sucht die Konfigurationsdatei (rfeyed.cfg) über zwei Wege, wie in der folgenden Abbildung zu erkennen ist.

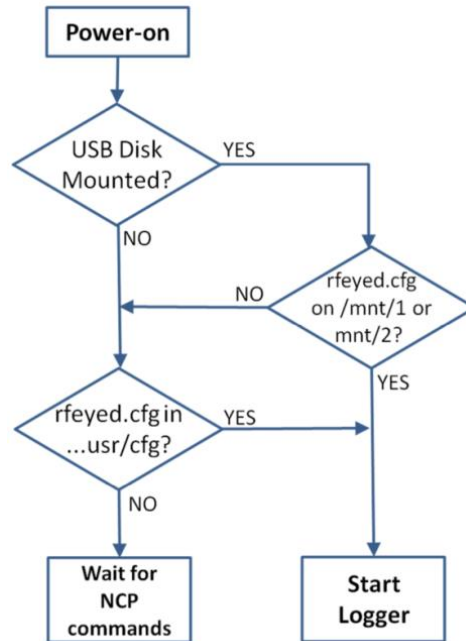


Abbildung 11: Ablaufplan rfeyed.cfg, [TN_5]

Der Logger ist für den mobilen Einsatz konzipiert, daher sollte die Konfigurationsdatei auf einen USB-Massenspeicher gespeichert werden, der so groß gewählt sein muss, dass alle Daten auf ihm Platz finden. Die Größe der Daten hängt stark von der Konfiguration ab und muss erprobt werden.

Die Programmierung und die einzelnen Codebeispiele werden im Punkt 4 erläutert.

3 Laboruntersuchung Wireless Local Area Network

Die Problematik einer Belegungsmessung ist, dass nur ein Bezug auf das HF-Spektrum genommen werden kann. Übertragungsprobleme bei hoher Auslastung des Kanals können nicht berücksichtigt werden. Um eine Verbindung zwischen der Belegung und der Übertragung zu schaffen, werden im Labor mehrere WLAN-Netze simuliert. Begleitend zur Simulation wird die Belegung der WLAN-Netze auf einem gemeinsamen Kanal aufgenommen.

Mit Hilfe der Untersuchung kann ein Bezug zur Belegungsmessung im Punkt 4 geschaffen werden.

3.1 Untersuchung 1 – Träger-Rausch Verhältnis

Gegenstand der Untersuchung ist es, einen Überblick zur maximalen Reichweite einer WLAN-Verbindung unter Berücksichtigung praktischer Bedingungen (z.B. einer Wand oder einem zweiten Teilnehmer) zu erhalten.

3.1.1 Messmittel

- 2 Terra Mobile 1541H
- 2 Lenovo Thinkpad E550
- 2 Lenovo Thinkpad T530
- 3 Router (FritzBox 7390 / 7590 und Asus RT-AC88)
- 3 Omni Antennen 3CWE591 6/8 dbi (2,4 – 5,8 GHz)
- R&S®ESPI
- R&S®ESR
- 3 LMR240 HF Kabel
- Diverse Anschluss.- und Netzwerkleitungen
- Software Iperf
- RFeye Node
- Iperf



Abbildung 12: Messaufbau Untersuchung 1 - WLAN Reichweite

3.1.2 Messaufbau

Im Versuch wird ein WLAN-Netz aus drei unabhängig voneinander agierenden Routern erstellt. Jeder Router wird mit zwei Laptops (ein über LAN und ein über WLAN) verbunden, um gezielt Daten miteinander auszutauschen. Alle Router sind fest auf die Frequenz 2,472 GHz (Kanal 13) eingestellt, um sich gegenseitig beeinflussen zu können. Der ESR soll den Frequenzbereich visualisieren und mit dem ESPI wird die Domain Power Messung durchgeführt. Im Hintergrund wird, wie in Abbildung 13 zu sehen, die Belegung gemessen.

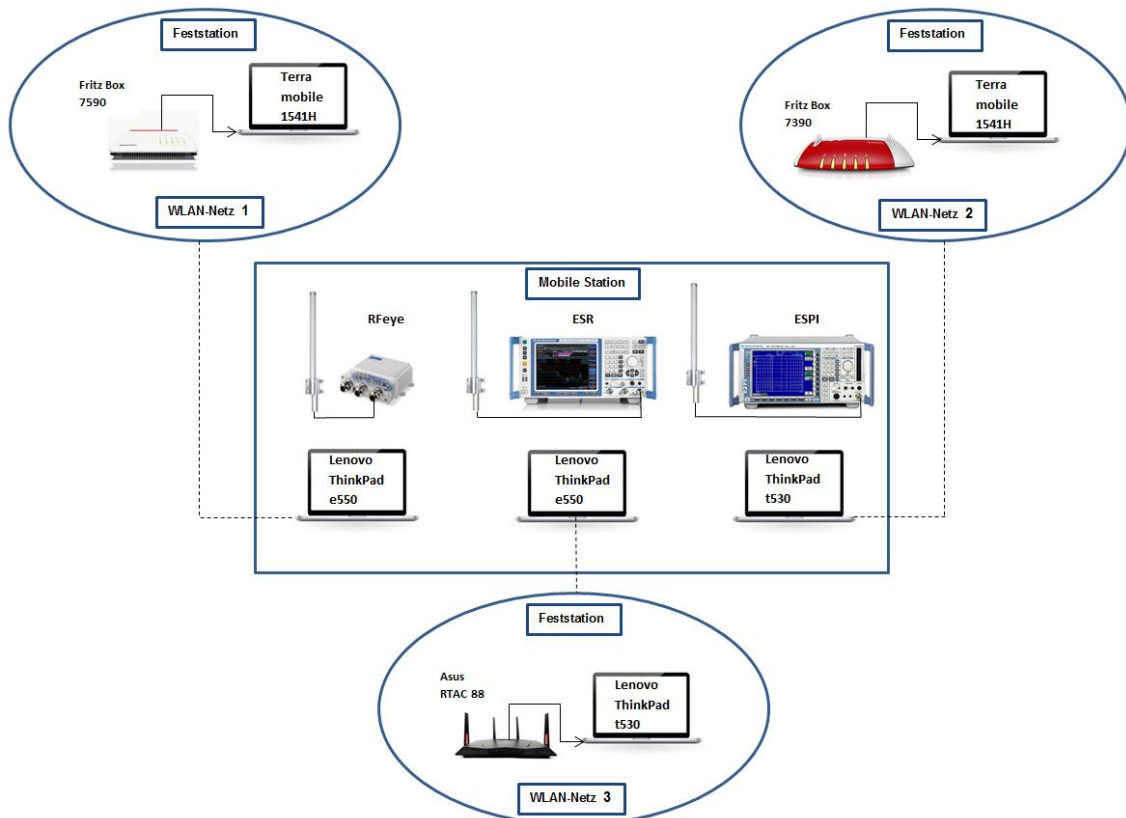
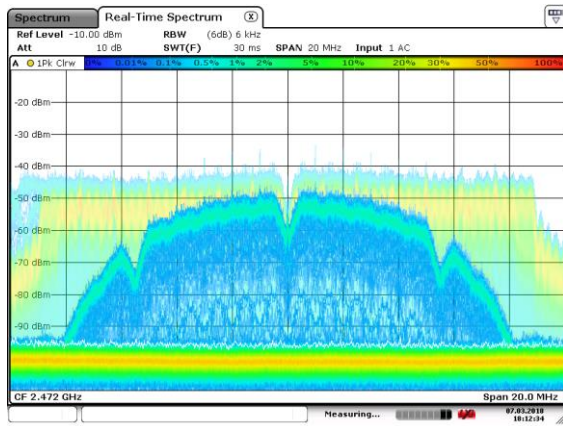
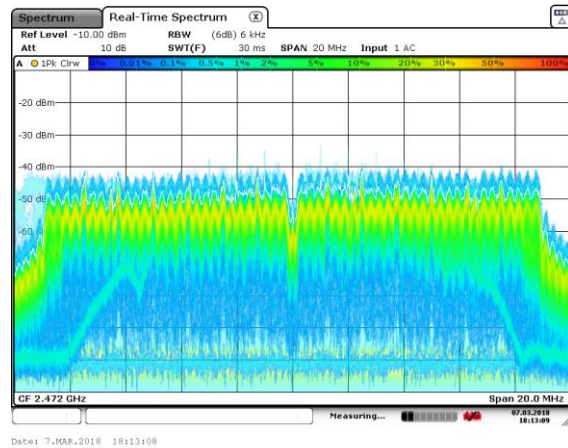


Abbildung 13: Schaltbild Zur Untersuchung 1 – WLAN Reichweite

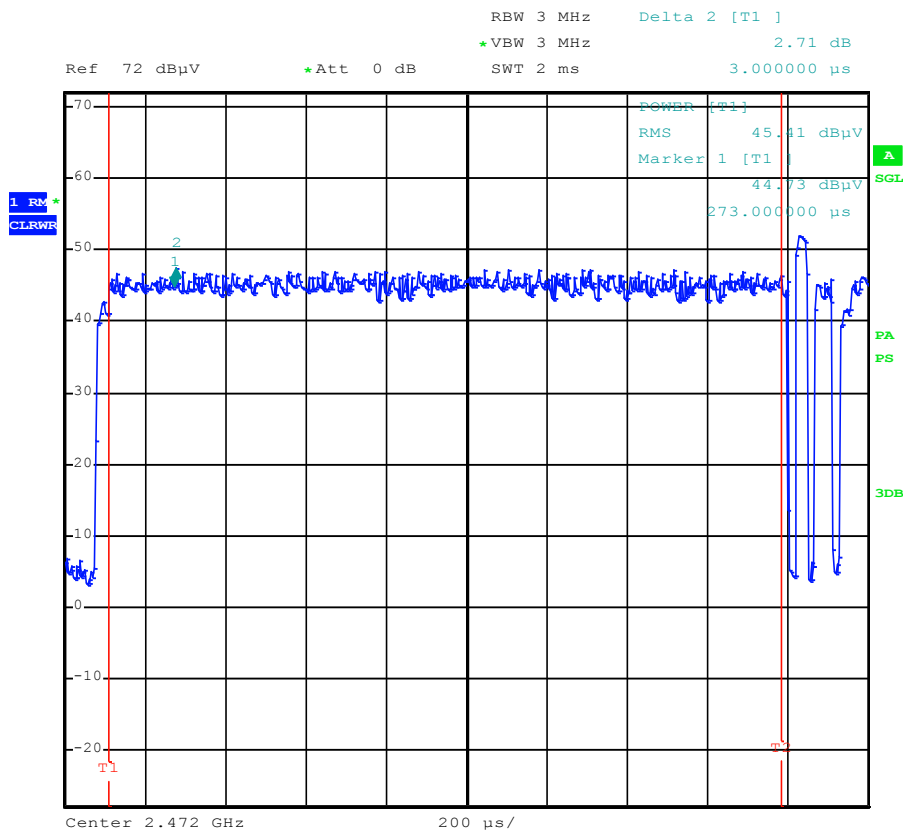
3.1.3 Messablauf und Auswertung

Jedes Übertragungssystem kann durch den Signal-Rauschabstand (signal to noise ratio S/N), dem Träger-Rauschabstand (carrier to noise ratio C/N) oder dem Träger-Störabstand (carrier to interference ratio C/I) beschrieben werden. Da bei der digitalen Übertragung kein Unterscheid zwischen Signal und Träger gemacht werden kann, sind in den Untersuchungen die Verhältnisse C/N und C/I ermittelt.

**Spektrum 1: DSSS - Empfänger****Spektrum 2: OFDM- Sender**

Im Punkt 2.1.3 werden Verfahren der Übertragung erläutert. Diese Verfahren haben charakteristische Hüllkurven, die in den Spektren 1 und 2 zu sehen sind.

Die Überlagerung zwischen Sender (Router) und Empfänger (Laptop), siehe Spektrum 2, führt zur Verfälschung der Verhältnisse. Um einen Unterschied zwischen Sender und Empfänger zu erhalten, ist im Zeitbereich eine Time Domain Power Messung anzuwenden. In der Time Domain Power Messung kann der Pegel des Senders ermittelt und ausgemessen werden.

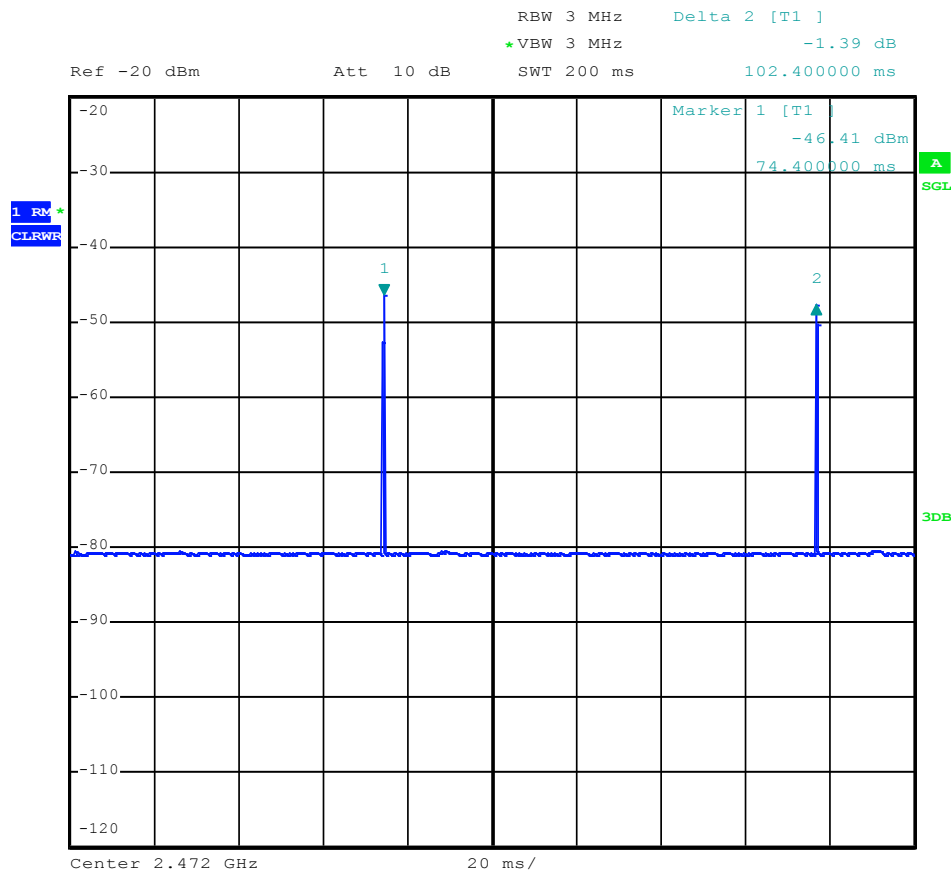


Date: 8.MAR.2018 15:31:47

Spektrum 3: Time Domain Power Messung

Über das Tool „Iperf“ werden Daten über den Router zum Client gesendet. Der erste 1,75 ms Block ist das Paket vom Router. Der Client sendet kurz nach Beendigung des Blocks die Empfangsbestätigung. Im Spektrum 3 ist außerdem die Kennung (Beacon) des Routers als dritter Block dargestellt.

Die Kennung wird alle 100 ms gesendet, damit Endgeräte sie ausgelesen können. Nach Beendigung des Sendevorgangs und Erhöhung der Sweep - Time auf 200 ms sind im Zeitbereich 2 Beacons erkennbar, die immer mit der maximalen Leistung (siehe Spektrum 4) abgestrahlt werden.



Date: 8.MAR.2018 16:46:42

Spektrum 4: Kennung Router

In den folgenden Messungen wird immer Bezug auf die Fritz Box 7590 genommen. Sie soll den reellen Fall nachbilden, um zu zeigen, wie sich der Datendurchsatz beim Zugriff unterschiedlicher Nutzer desselben Kanals äußert.

Im Anhang [An_01] ist einen Lageplan einsehbar, der Standortbeschreibungen beinhaltet. Dieser Lageplan soll drei Wohneinheiten simulieren.

a) Durchsatzmessung in Abhängigkeit der Reichweite ohne Fremdteilnehmer

Um eine quantitative Aussage der Ergebnisse zu erhalten, wird eine Clustermessung nach [TN MVF-01/1.2.1] (Messvorschrift der Bundesnetzagentur) durchgeführt. Auszug der Messvorschrift [TN MVF-01/1.2.1]:

„Damit eine Aussage über die Homogenität des elektromagnetischen Feldes an einem Meßort getroffen und ein ausreichend hohes Vertrauensintervall von möglichst 90 % für das Messergebnis angenommen werden kann, sind an einem Meßort mehrere Einzelmessungen nach dem unter „kontinuierliche Messungen“ beschriebenen Verfahren notwendig. Die erforderliche Anzahl der Meßpunkte innerhalb einer Fläche von ca. $40 \times 40 \lambda$ ist abhängig von der Streuung der Einzelmesswerte, d.h. die Standardabweichung σ , sollte wenigstens 5 Einzelwerte verteilt über die Fläche enthalten. ...“.

Aus der Vereinbarung [VE_1, Seite 10 des Anhangs 2 zu Anlage 7] geht eine Tabelle der erforderlichen Messproben hervor.

Zuverlässigkeit		ΔE (dB)			
Niveau %	Intervall \pm dB	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20
		Anzahl der benötigten Punkte			
90	1	3	11	24	43
	1,5	2	5	11	19
95	1	4	15	35	61
	1,5	2	7	15	27

Tabelle 3: Clustermessung, [VE_1]

Da das ΔE , siehe Tabelle 4, in der Messung unter 5 dB ist, kann von einem Vertrauensintervall von 90 % ausgegangen werden. Somit sind bei der Messung alle Störfaktoren (z.B. Auslöschung oder Reflektionen) einbezogen

Die Leistungspegel der Tabelle 4 entsprechen nicht der echten Pegel, da das 20 MHz große OFDM Signal nur mit einem 3 MHz Filter gemessen wird. Dies ist damit begründet, dass der ESPI kein größeres achsensymmetrisches Filter bereitstellt. Es kann somit nur 3 MHz von dem zu messenden 20 MHz großen Signal erfasst werden. Die echten Leistungspegel des Routers erhält man nur über eine Bandbreitenkorrektur, die z.B. in der [IEEE 10.1109/ISEMC.1999.812923, Seite 958 - 961] beschrieben ist.

$$\text{Korrekturfaktor} = 10 \log \left(\frac{\text{Signalbandbreite}}{\text{Messbandbreite}} \right) \quad (2)$$

Der Korrekturfaktor beträgt in diesem Fall 8,24 dB.

Eine Bandbreitenkorrektur ist nicht erforderlich, weil das Verhältnis C/N mit derselben Bezugsmessbandbreite gemessen wurde. Es gibt keinen Unterschied zwischen dem Verhältnis der relativen Pegel (mit 3 MHz Filter) und der echten Pegel.

Messergebnisse:

Technologie WLAN	Durchsatz in Mbit /s	Messwerte in dB μ V					$\Delta E =$ E_{\max} - E_{\min} in dB	C/N in dB
		MP_1	MP_2	MP_3	MP_4	MP_5		
Messort 5 Carrier im Abstand von 25 m + 3 Wände Abbruch	0,78	18,23	20,71	16,89	20,98	17,50	4,09	7,21
N		11,46	11,31	11,46	12,53	11,52	1,22	
Messort 5 Carrier im Abstand von 20 m + 3 Wände (eine Trockenbau) vom Router	4,88	21,56	21,87	20,63	22,23	24,01	3,38	12,16
Noise		9,76	10,34	10,08	9,57	9,73	0,77	
Messort 4 Carrier im Abstand von 15 m + 3 Wände (eine Trockenbau) vom Router	10,8	26,06	23,70	23,09	23,19	24,84	2,97	14,51
Noise		9,95	9,74	10,04	9,23	9,29	0,81	
Messort 3 Carrier im Abstand von 10 m + 2 Wände vom Router	30,2	37,69	36,63	38,18	34,59	35,50	3,59	27,49
Noise		8,33	8,70	8,54	10,06	9,50	1,73	
Messort 2 Carrier im Abstand von 5 m + 1 Wand vom Router	43,8	40,95	41,38	43,90	45,68	44,83	4,73	34,19
Noise		10,71	8,65	7,04	9,68	9,67	3,67	
Messort 1 Carrier im Abstand von 5 m vom Router	54,5	50,36	53,31	52,70	52,10	52,61	2,95	43,76
Noise		7,61	8,31	7,52	8,65	9,45	1,93	

Tabelle 4: Messergebnisse Reichweite ohne Fremdteilnehmer

Die Ergebnisse der Tabelle 4 sind nach dem Prinzip der im Spektrum 3 gezeigten Domain Power Messung (hier ohne Fremdteilnehmer) ermittelt.

Werte des ESPIs werden in dB μ V ausgegeben, somit ist die Berechnung über die folgende Formel geschehen.

$$\frac{C}{N} = \left(\left(\frac{1}{MP_C_n} \sum_{i=1}^n MP_C_i \right) - \left(\frac{1}{MP_N_n} \sum_{j=1}^n MP_N_j \right) \right) \quad (3)$$

Diese Formel bildet den Mittelwert aller Messwerte (Mittelwertsbildung vom Träger und vom Rauschen) in einem Messpunkt und kann nur mit dB-Werten verwendet werden. Dabei wird mit MP_C der Träger und MP_N das Rauschen im Messpunkt verstanden.

Obwohl der C/N nach der ersten Wand 10 dB abfällt, werden akzeptable Datenraten erzielt. Ausschlaggebend für den Datendurchsatz ist die Dicke der Wände, deren Zusammensetzungen (z.B. Stahlbeton entspricht einer hohen Dämpfung) und die Entfernung zum Router.

Die Sensibilität der Gerätekombination haben eine C/N - Grenze von 10 dB. Ab diesen Punkt ist eine Datenrate von maximal 2 Mbit/s möglich, wodurch eine vernünftige Verbindung nicht gewährleistet wird.

b) Durchsatzmessung mit Fremdteilnehmer

Die Standorte der Router sind dem Anhang [An_01] zu entnehmen.

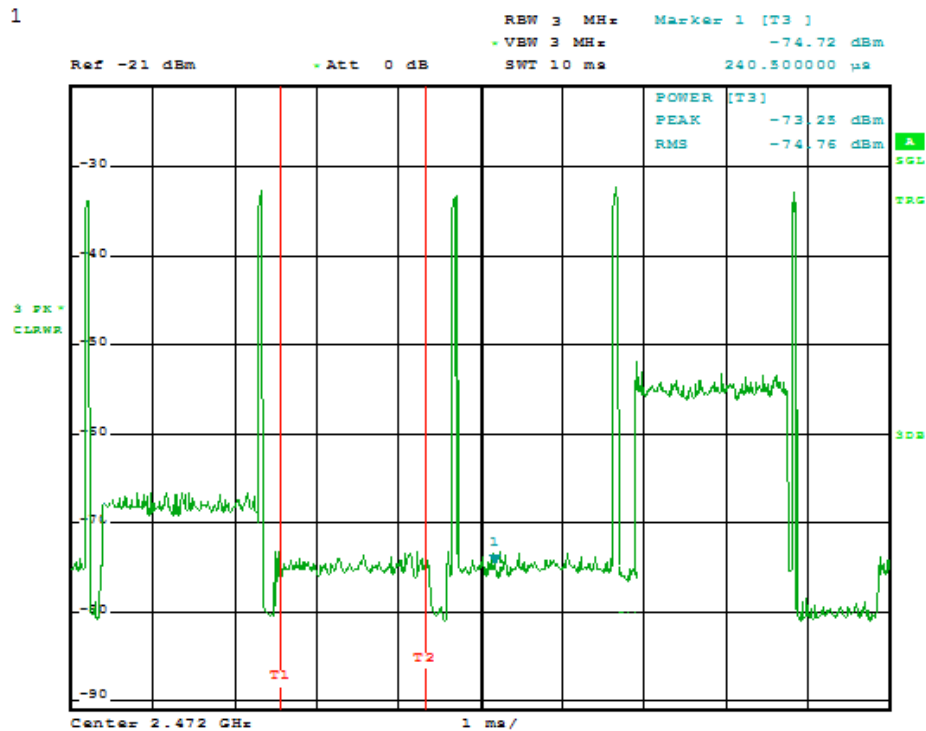
Messergebnisse:

Ort der Messung	Kombination Fremdteilnehmer	Durchsatz Fritz Box 7590 (R1) in Mbit/s	Durchsatz Fritz Box 7390 (R2) in Mbit/s	Durchsatz Asus RT-AC88 (R3) in Mbit/s
Messort 4	Ohne Fremdteilnehmer	10,8	33,6	43,9
- -	R1 / R2	4,2	21,4	/
- -	R1 / R2 / R3	1,6	15,1	18,8
Messort 3		30,2	28,4	75,2
- -	R1 / R2	12,8	18,8	
- -	R1 / R2 / R3	10,4	14,8	34,5

Tabelle 5: Messung Fremdteilnehmer

Anhand der Tabelle 5 wird deutlich, dass je mehr Teilnehmer auf den Kanal zugreifen, sich in der Datenrate große Unterschiede bemerkbar machen. Sie ist nicht nur abhängig von der Teilnehmeranzahl, sondern auch von der Entfernung zum Router und dessen Sendeleistung. Die 4 externen Antennen des Asus RT AC88 bewirken erhöhten

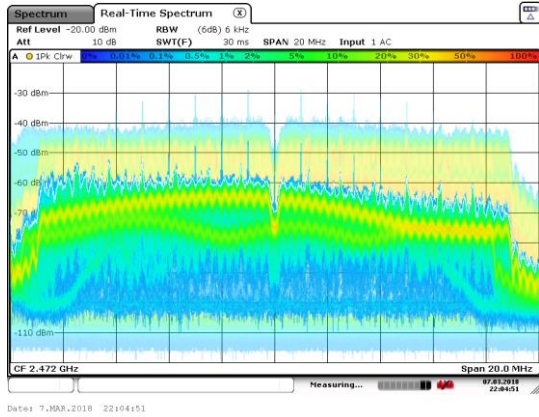
Datendurchsatz, weswegen die Messung prozentual besser war als bei den anderen Routern.



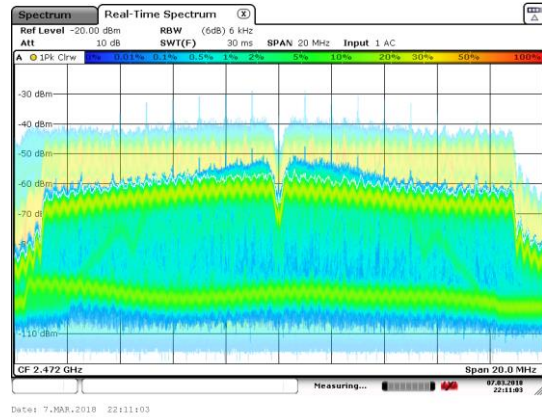
Date: 7.MAR.2018 14:25:18

Spektrum 5: Time Domain drei Router

Router kommunizieren nicht untereinander, deshalb entstehen viele Konfliktsituationen, die im Zeitbereich sichtbar sind. Das Spektrum 5 stellt scheinbar keine Kollisionsfreie Situation dar. Diese Messung wurde am Messort 4 (siehe [An_01]) aufgenommen. Aufgrund der Pegel (bezogen auf den Messort 4) ist zu vermuten, dass der niedrigste Pegel von der FritzBox 7590 und der größte Pegel von der Fritz Box 7390 kommt. Die Empfänger befinden sich alle im Messort 4 und bestätigen den Empfang mit derselben Leistung. Problem dieser Messung ist die Ermittlung des C/Ns, da die Eindeutigkeit der Pegel nicht gegeben ist.



Spektrum 6: Messort 4



Spektrum 7: Messort 3

Im Frequenzbereich wird exemplarisch dargestellt, wie sich der Pegel bei unterschiedlichen Abständen zum Router Fritz Box 7390 und 7590 äußert.

Die einzelnen Subträger in den Spektren 6 und 7 überlagern sich. Es kommt zu Trägerverzerrungen, die sich in Form von verminderten Datenraten zeigen. Die Fehlerkorrekturalgorithmen der Router versuchen die Verbindung aufrecht zu erhalten.

c) Durchsatzmessung mehrere Teilnehmer in einem WLAN

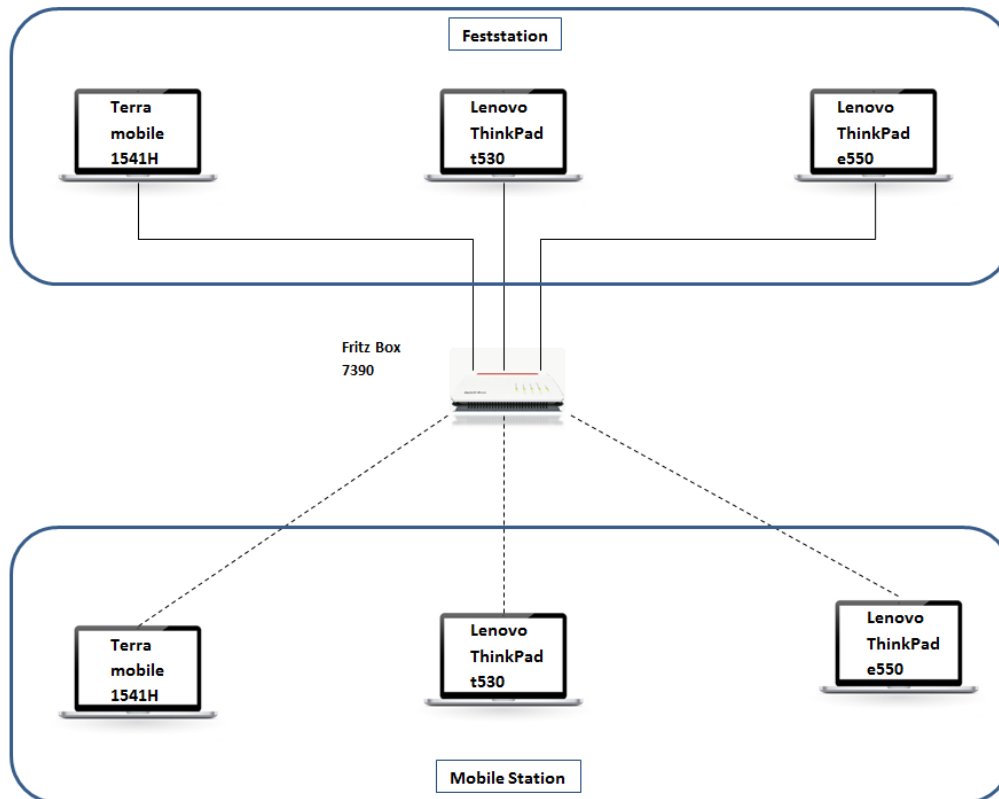


Abbildung 14: Schaltbild zum Untersuchung 1 - Durchsatzmessung eigenes WLAN

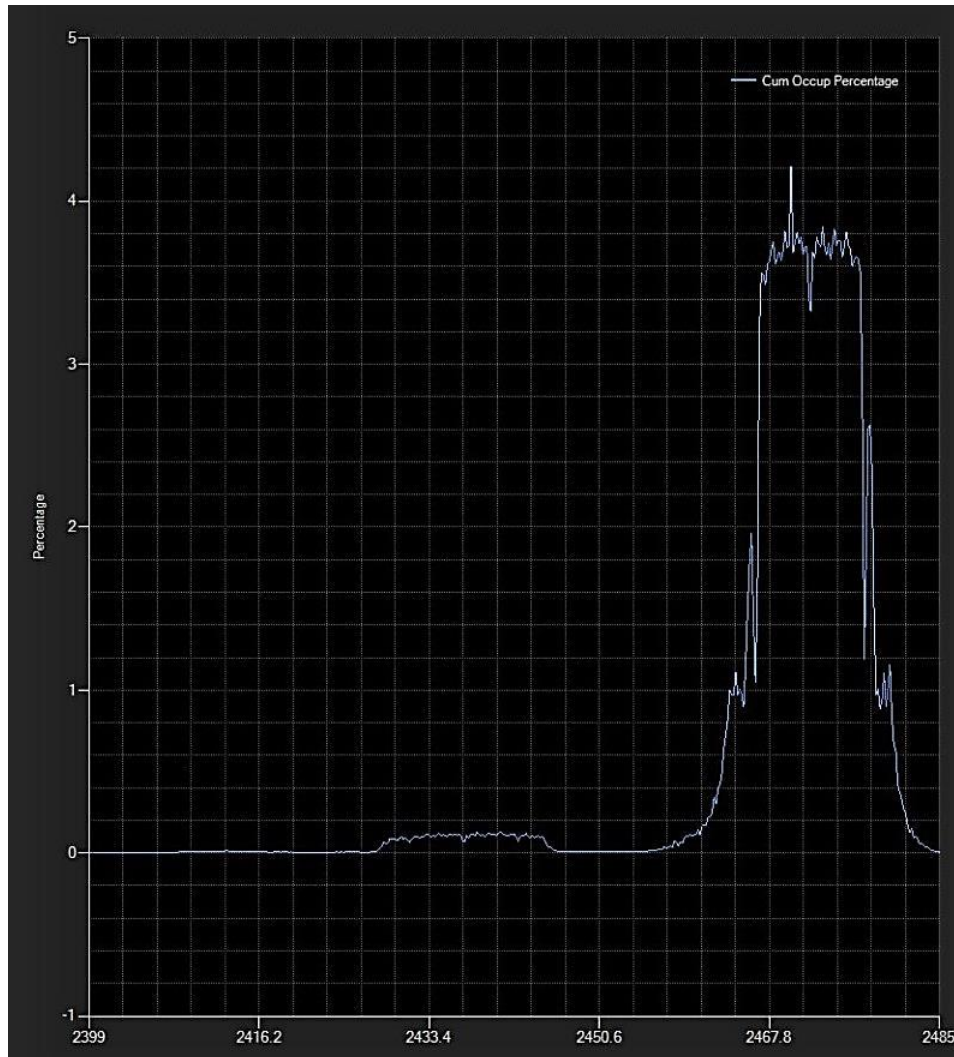
Um einen Vergleich zum Punkt 3.1.3 a zu haben, ist zu prüfen, wie sich die Datenaufteilung in einem Netzwerk beim Zugriff mehrerer Teilnehmer (siehe Abbildung 14) verhält. Der Router wird mit sechs Teilnehmern ausgestattet. Drei Notebooks werden via WLAN und die anderen über ein LAN Kabel mit der Fritz Box verbunden. Die Messung ergab eine Drittelung der Datenrate, was bedeutet, dass der Router über das CSMA/CA jedem Teilnehmer gewisse Sendezeiten zu Verfügung stellt. Diese Daten sind gleichmäßig an die Teilnehmer verteilt, hingegen der Werte aus Tabelle 5.

3.1.4 Auswertung der Belegungsdaten

Wie der Abbildung 13 zu entnehmen ist, wird die Belegung sekundär gemessen. Diese Daten werden zur Vorbetrachtung benötigt, um im Punkt 4 ein Messkonzept zur Durchführung der Belegungsmessung zu entwickeln.

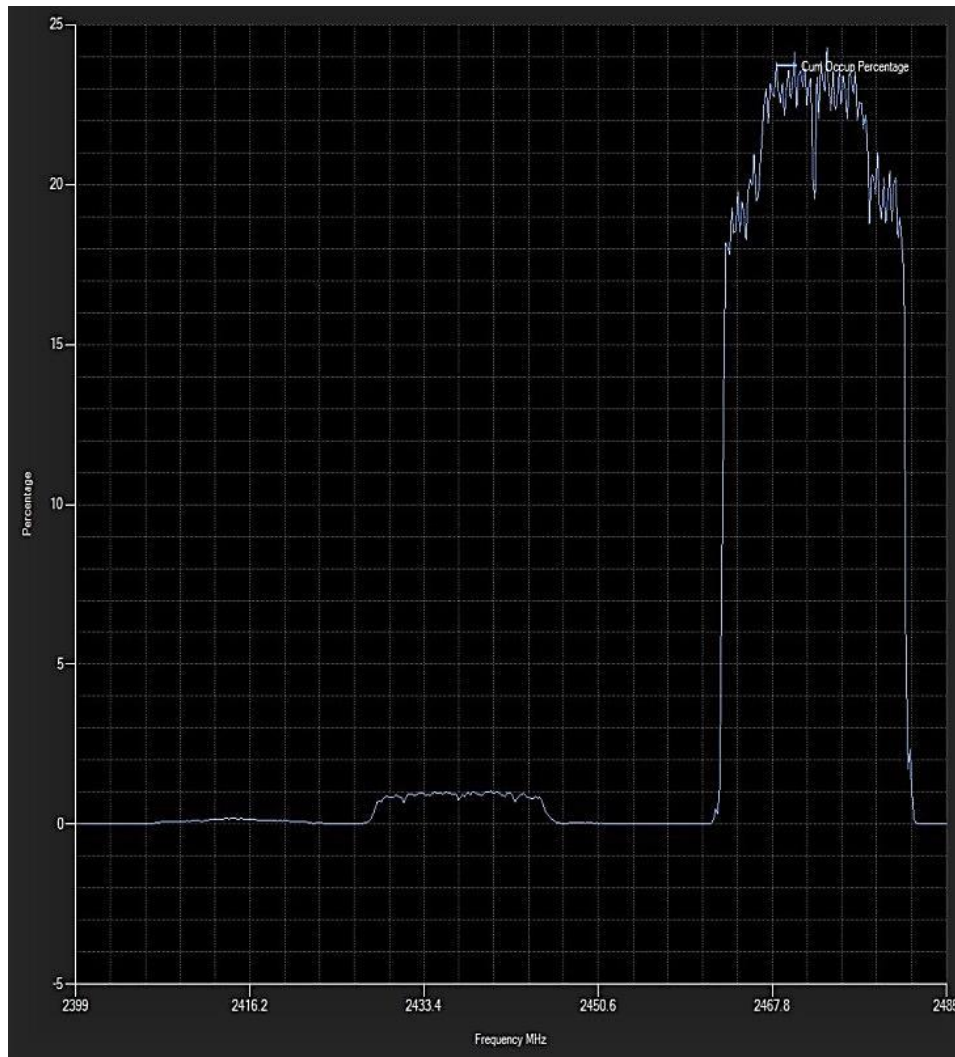
Beim Aufbau der Untersuchung 1 laufen die Router im Idle-Mode (Stand-by). Dies ermöglicht erste Einschätzungen hinsichtlich der Belegungsmessung. Im Punkt 3.1.3 wird zur Messung ein 3 MHz Filter verwendet, denn je größer das Filter gewählt ist, desto genauer wird der Pegelwert. Hingegen ist für die spektralrichtige Messung ein kleines Filter vorgesehen, andernfalls wird nur die Hüllkurve des verwendeten Filters dargestellt. Die Subträger der OFDM Signale sind 312,5 kHz breit und damit auch der einzelne Subträger spektralrichtig angezeigt wird, ist das 100 kHz Filter zu verwenden.

Außerdem muss die Belegungsmessung schnell genug sein, alle zu messenden Signale zu erfassen, jedoch so langsam, dass nicht unnötig viele Daten zur Auswertung generiert werden. In der Software Site [CR-32] können diese Parameter vorab getestet werden, um die Programmierung für die Messung anzupassen. Nach Eingabe aller Parameter ist ein Threshold zu wählen, der bei einer klassischen Belegungsmessung anhand des Nutzsignales eingestellt wird. In der WLAN-Messung stellt sich aber die Frage: „Wann wird eine Belegung als Störer beim Endgerät erkannt?“. Die Antwort: Jeder Zugriff auf den Kanal kann als Störer erkannt werden, deswegen wird eine Schwelle nahe dem Rauschen (3 dB und 6 dB) eingestellt.



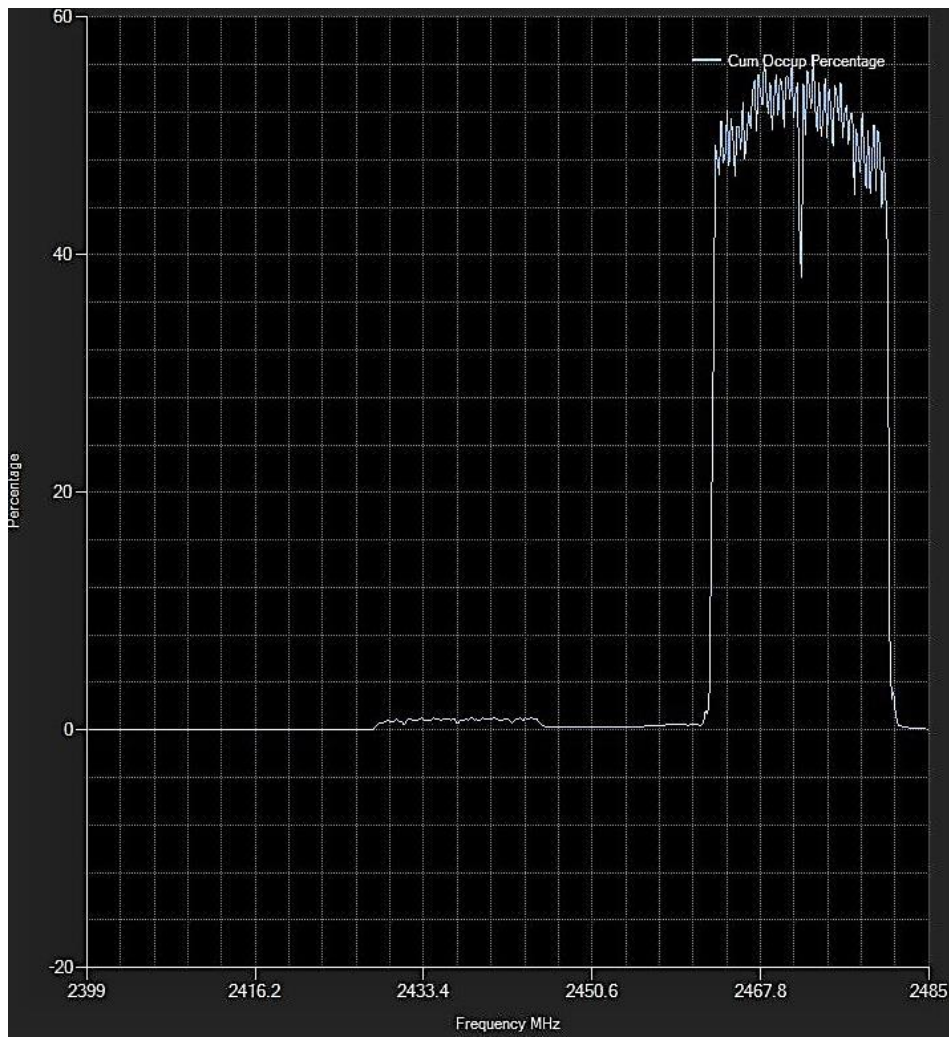
Spektrum 8: Belegungsmessung Kennung

Im Spektrum 8 ist die Belegung der Kennungen aller drei Router erfasst. Ohne Teilnehmer werden 4 % des Spektrums verwendet.



Spektrum 9: Belegung der Durchsatzmessung ohne Fremdteilnehmer

In der Untersuchung 1 werden fortwährend Pakete gesendet, die die Datenraten an den einzelnen Standorten zeigen. Oft muss ein längerer Datenstrom versendet werden, um einen aussagekräftiges Single-Sweep (Einfrierung des Bildschirms im Zeitbereich) für die Pegelmessung zu bekommen. Die Belegung des Kanals stieg somit um 20 % an, denn alle Router senden weiterhin ihre Beacons.



Spektrum 10: Belegung der Durchsatzmessung mit Fremdteilnehmer

Wie aus der Tabelle 5 zu entnehmen ist, werden von verschiedenen Teilnehmern Datenströme unterschiedlicher Länge generiert, Dies ist nötig damit die Belegungsmessung plausibel ist. Es wird z.B. davon ausgegangen, dass ein Teilnehmer einen Film anschaut und ein zweiter Teilnehmer im Internet surft. Die Belegungsmessung ergibt einen Anstieg (in Bezug zur Kennungsbelegungsmessung) um 50 %.

16:33:10.980388403	Omni (Peak)
16:33:11.011588335	Omni (Peak)
16:33:11.042788267	Omni (Peak)
16:33:11.073988438	Omni (Peak)
16:33:11.105188608	Omni (Peak)
16:33:11.136388540	Omni (Peak)
16:33:11.167588711	Omni (Peak)
16:33:11.198788643	Omni (Peak)
16:33:11.229988813	Omni (Peak)
16:33:11.261188745	Omni (Peak)
16:33:11.292388678	Omni (Peak)
16:33:11.323588848	Omni (Peak)
16:33:11.354789019	Omni (Peak)
16:33:11.385989189	Omni (Peak)
16:33:11.417189121	Omni (Peak)
16:33:11.448389053	Omni (Peak)
16:33:11.479589224	Omni (Peak)
16:33:11.510789156	Omni (Peak)
16:33:11.541989088	Omni (Peak)
16:33:11.573189259	Omni (Peak)
16:33:11.604389429	Omni (Peak)
16:33:11.635589600	Omni (Peak)
16:33:11.666789532	Omni (Peak)
16:33:11.697989464	Omni (Peak)
16:33:11.729189634	Omni (Peak)
16:33:11.775989532	Omni (Peak)
16:33:11.838389635	Omni (Peak)
16:33:11.885190010	Omni (Peak)
16:33:11.916389942	Omni (Peak)
16:33:11.947589874	Omni (Peak)
16:33:11.978790045	Omni (Peak)
16:33:12.009989977	Omni (Peak)

Abbildung 15: Livedaten des Loggers

In der Überschrift der Tabelle 2 wird für die Stichprobenperiode 1 s angenommen. Da ein Bezug bei der Auswertung im Punkt 4.3 hergestellt werden soll, wird ebenfalls in der Belegungsmessung eine Periode von 1 s verwendet. Bei den Livedaten (siehe Abbildung 15) des RFeyes werden innerhalb 1 s 28 Datensätze abgespeichert. Die Revisit Time beträgt somit 35,71 ms und ist ausreichend klein, um alle Signale des WLAN-Bereichs zu erfassen.

3.2 Untersuchung 2 – Träger-Interferenz Verhältnis

In der ersten Untersuchung bricht die Verbindung am Messpunkt 5 ab. Es kann nicht ermittelt werden, ob der Sender oder der Empfänger die Verbindung verliert. In dieser Untersuchung wird auf kurzer Distanz der Funkkanal mit einem Störsignal überlagert. Eine strahlungsfreie Umgebung wird durch eine GTHEM-Zelle, eine Schirmkammer, die elektromagnetisch von der Umgebung entkoppelt ist, sichergestellt. Da der Erreger der GTHEM CELL 1500 nur in einem Bereich von 80 MHz bis 1000 MHz arbeitet, konnte der Einspeisepunkt nicht verwendet werden. Aufgrund dessen ist eine Sendeantenne in den Fußpunkt der Schirmkammer installiert, damit die Eigenschaften der GTHEM- Zelle erhalten bleiben.

3.2.1 Messmittel

a) Zellen innere

- Router Asus RT-AC88 (siehe Abbildung 5)
- 1 WLAN-Rundstrahlantennen (Empfänger)
- 1 USLP Antenne für den Störerträger
- Laptop Lenovo Thinkpad E550 mit der Software Iperf

b) Außerhalb der Zelle

- Signalgenerator R&S®SMU200A (Störsignal: OFDM 64QAM Signal)
- R&S®ESPI
- R&S®ESR
- Laptop Terra Mobile 1541H mit der Software Iperf



Abbildung 16: GTHEM

Obwohl hier keine absoluten Werte gemessen werden, wird das Messkabel Low Loss LMR240 verwendet, um die Dämpfung auf dem Kabel zu minimieren. Der Router sendet über die Software Iperf permanent Daten vom Terra zum Lenovo. Das OFDM-Störsignal vom SMU200 wird vom Rauschen immer weiter erhöht.

3.2.2 Messaufbau

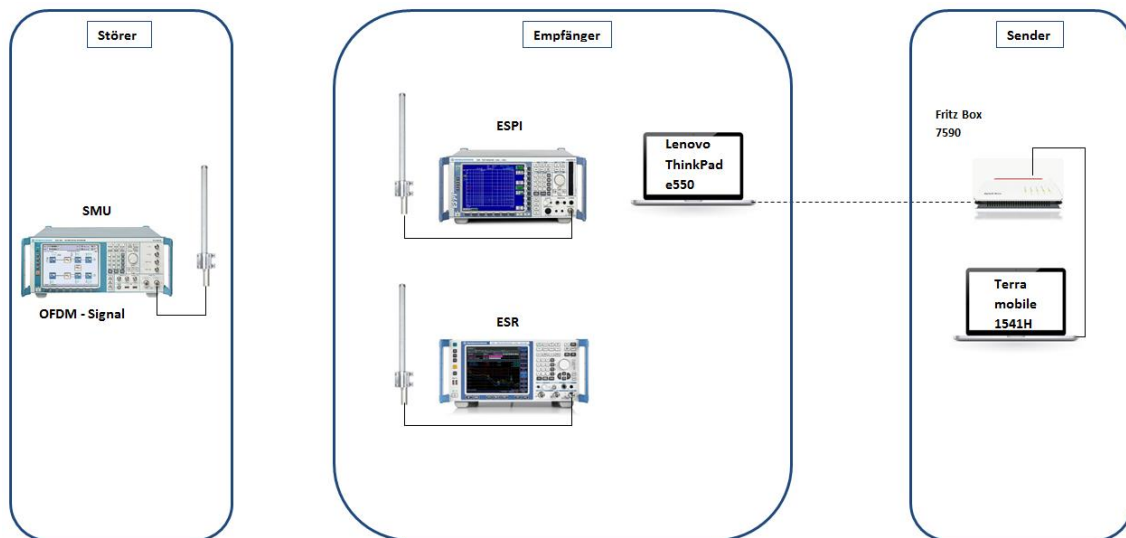


Abbildung 17: Schaltbild Untersuchung 2

Der Aufbau fügt sich zusammen aus den drei Komponenten Störer, Empfänger und Sender. Der Störer besteht aus dem Signalgenerator SMU 200A und einer Sendeanenne, der Empfänger aus einem ESPI und einem ESR, der die Empfängerantenne des Laptops nachbilden soll und der Sender aus Router und Laptop. Das Lenovo ist über WLAN und das Terra über ein Ethernet Kabel mit der Fritz Box verbunden.

3.2.3 Messablauf und Auswertung

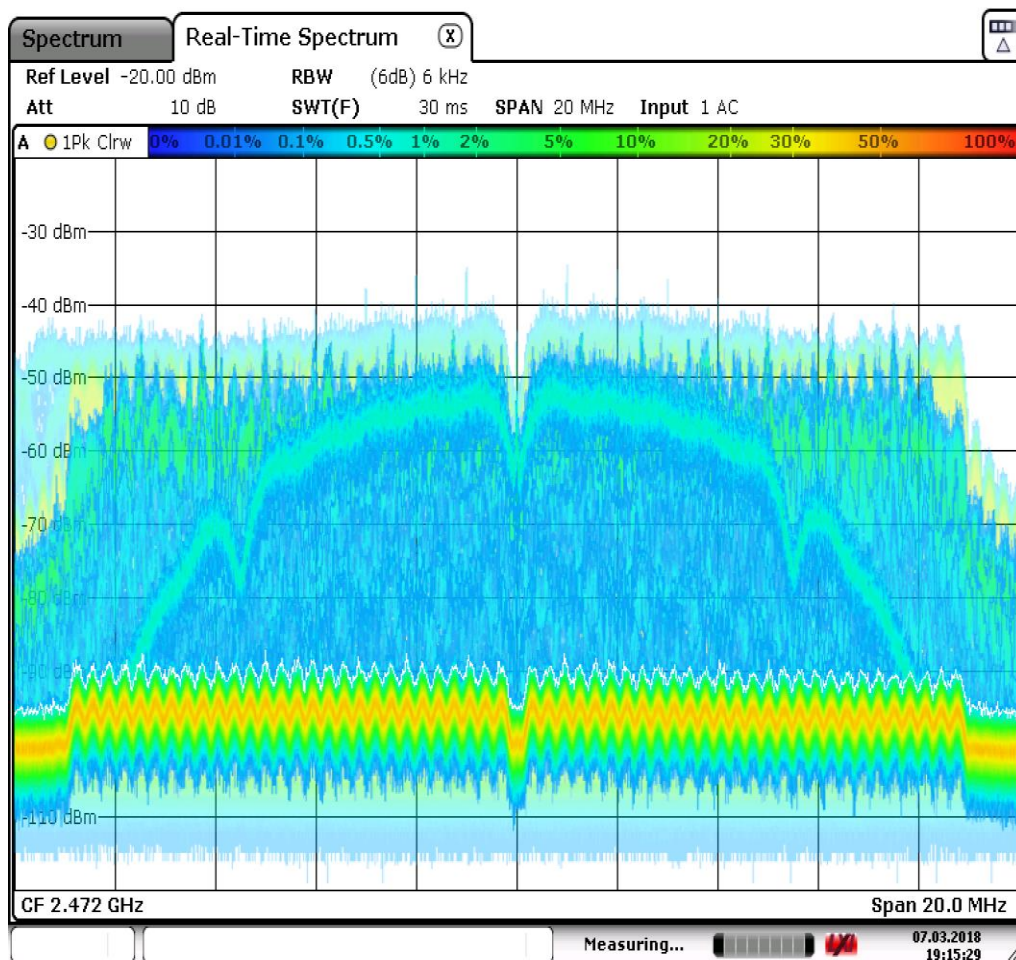
Schon bei der Installation des Messaufbaus in der GTHEM Zelle zeigte sich, dass die Datenrate deutlich geringer ist als in der Untersuchung 1. Vermutet werden destruktive Reflektionen oder Minderung der Leistungen (Sender und Empfänger) durch die Absorber.

Da in der Untersuchung die Geschwindigkeit nicht im Vordergrund steht, wird mit der Messung des Carrier to Interference begonnen.

Störpegel in dBm am SMU 200	Sender in dBm,	Rauschen in dBm	Träger - Störabstand C/I in dB	Datenrate in Mbit/s
-40	-20,39	-77,9	57,51	22,9
-35	-20,46	-74,52	54,06	22,1
-30	-20,02	-70,97	50,95	22,7
-25	-20,26	-66,49	46,23	22,2
-20	-19,27	-60,95	41,67	22,9
-15	-20,14	-54,6	35,44	20,3
-14	-19,16	-53,99	34,83	20,4
-13	-20,6	-53,6	33	0

Tabelle 6: Messergebnisse GTHEM

Am SMU200 wird ein Pegel von -40 dBm (unterhalb des Rauschens) eingestellt. Im ersten Bereich wird der Störer in 5 dB Schritten erhöht. Bei einem Pegel von -10 dBm bricht die Verbindung zusammen, sodass der Empfänger die Kennung des Routers nicht mehr empfangen kann. Auch im Spektrum bleibt die Sendung des Beacons aus. Nachdem am Störsender der Pegel auf -15 dBm gestellt wird, baut sich die Verbindung wieder auf. Obwohl der C/I 33 dB beträgt, konnte der Router die Verbindung nicht aufrechterhalten. Im direkten Vergleich der Tabellen 4 und 6 wird festgestellt, dass bei einem C/N von 33 dB eine Übertragungsgeschwindigkeit von 43,8 Mbit/s möglich ist.



Date: 7.MAR.2018 19:15:29

Spektrum 11: Untersuchung 2 - GTHEM

Der Messaufbau (siehe Abbildung 17) zeigt, dass der Empfänger zwischen Sender und Störer ist. Die Störleistung am Empfänger sollte daher höher sein als am Router, dennoch bleibt der Empfänger im Spektrum messbar. Das Spektrum 11 zeigt den Verbindungsabbruch. Nur das Empfängersignal und das OFDM-Störsignal bleiben im Spektrum erhalten. Im Hintergrund des Empfängersignals wird das Nachleuchten des Routers dargestellt. Der Versuch wird abgebrochen und unter realen Bedingungen wiederholt so durchgeführt.



Abbildung 18: Untersuchung 2 _ Messhalle

Im zweiten C/I – Messversuch sind identische Werte bei der Messung entstanden und nur die Datengeschwindigkeit stieg auf 95,8 Mbit/s.

In der Abbildung 18 ist der Empfänger noch nicht zwischen Störer und Router positioniert. Normalerweise sollte der Störer durch den Router als breitbandiges Rauschen erkannt werden. Hier wird er scheinbar als 100 % Belegung des Spektrums gewertet, sodass der Router die WLAN-Funktion abschaltet. Womöglich hängt es auch mit der Fehlerkorrektur zusammen. Bei der Fehlersuche ist das Problem der Datenraten festgestellt worden, doch der Totalausfall des Routers konnte nicht begründet werden. Bei Messaufbau in der GTHEM Zelle ist das Terra über ein längeres Patchkabel mit dem Router verbunden. Dieses Patchkabel konnte keine höhere Datenrate ermöglichen und somit ist auch die WLAN Übertragung davon betroffen. Da die Problematik und das Verhalten des Routers unklar sind, wird dieser Versuch abgebrochen.

4 Belegungsmessung

Wie im Abschnitt 2.3.2 wurde die Messroutine nach Auswertung der Belegungsdaten (siehe Punkt 3.1.4) programmiert.

Parameter der Programmierung:

- Revisit Time = 35,4 ms bei einer Stichprobenperiode von 1 s
- Duration of monitoring = 24 h
- Preset threshold level = Einstellung wurde an Grundrauschen des jeweiligen Ortes angepasst (100 khz Messbandbreite)
- Busy hour wird in der Auswertung betrachtet
- Integration Time = 5, 15, 30, 60 min; 12 und 24 h

a) startup.sh Datei (siehe [CR 264])

```
1 #Startdatei Linux
2
3 sleep 30 # Warte 30 Sekunden um Bootsequenz abzuwarten
4
5 # Parameter der IP-Verbindung
6
7 IPADDR= "192.168.1.90"
8 NETMASK= "255.255.255.0"
9 BROADCAST= "192.168.1.255"
10
11 # Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) Funktion abschalten
12 /sbin/respawn-off udhcpc
13 killall udhcpc
14
15 # Umschreibung die Ethernet(eth0) - Schnittstelle mit den neuen Parameter
16 /sbin/ifconfig eth0 $IPADDR netmask $NETMASK broadcast $BROADCAST
17
18
19 # Schreibe Textdatei, dass die Umschreibung erfolgreich war
20 touch /mnt/external/startup-erfolgreich.txt
21
22 # Ausgabe an logMonitor
23
24 /mnt/flash/bin/logMonitor
25
```

Abbildung 19: startup.sh - Datei

In der .sh Datei sind nicht nur die IP Konfigurationen hinterlegt, sondern auch, dass er alle Prozesse abschalten soll, die versuchen eine andere IP-Adresse zu erhalten. Die Umschreibung soll bestätigt und die Informationen der .sh Datei, dem Informationsserver, angezeigt werden. Mit der .sh Datei können alle Parameter der Startroutinen geändert werden, wie z.B. das Starten oder Beenden einer Anwendung oder eines Prozesses.

b) nconf.conf Datei (siehe [CR 69])

```
1  {
2    "version":1,
3    "information":
4      {
5        "node_name": "RFEYE00270",
6        "node_description": "Node für Belegungsmessung",
7        "update_user": "Marcel Hartmann",
8        "update_time": "01.03.2018"
9      },
10   "settings":
11     {
12       "real_time_clock":"gps",
13       "reference_clock":"gps",
14       "gps_time_offset":0
15     },
16   "peripheral":
17     [
18       {
19         "uid": 1,
20         "type": "leds",
21         "port": 1
22       }
23     ],
24   "antennas":
25     [
26       {
27         "uid": 1,
28         "name": "3Com Corporattion 3CWE591",
29         "description": "High Gain Omni 2.4 GHz-5.8 GHz",
30         "rf": 1,
31         "range": {"min": 2400, "max":5800},
32         "type": "Omni",
33         "kfactor_file": "/etc/node/K-Factor-File.csv"
34       }
35     ]
36 }
```

Abbildung 20: ncpd.conf Datei

In der ncpd.conf Datei wird der Firewire Port 1 für die Logger Control Box und dessen LEDs freigeschaltet. Im Bereich „antennas“ wird die verwendete Antenne beschrieben.

c) rfeyed.cfg (siehe [CR 43])

Im Anhang 2 [An_2] befindet sich die gesamte Programmierung des Loggers. Hier werden die wichtigsten zwei Punkte betrachtet.

```

50  scan = 1 second,1,2399,2485,100,1
56  occ_05_min= 2, ad, 5 mins, "Belegungsmessung - 5 min", -107
57  occ_05_min= 3, ad, 5 mins, "Belegungsmessung - 5 min", -104
58  occ_15_min= 4, ad, 15 mins, "Belegungsmessung - 15 min", -107
59  occ_15_min= 5, ad, 15 mins, "Belegungsmessung - 15 min", -104
60  occ_15_min= 6, ad, 30 mins, "Belegungsmessung - 30 min", -107

```

Abbildung 21: rfeyed.cfg Datei

Der Scan kann aus insgesamt 11 Parametern bestehen:

```

[run scan 0]
scan = <interval>, <antenna>, <start>, <stop>, <resn_khz>, <re-
peats>,<decimate=3>, <reflev=4>, <agc=5>, <table=6>, <dBuVm=7>

```

Da weder die Messbandbreite geteilt, noch ein Referenz Pegel fixiert oder eine Feldstärke gemessen wird, ist die Programmierung auf 6 Parameter gekürzt. Hier nur die Stichprobenperiode von 1 s; Nutzung des Antenneneingangs 1; Frequenzmessung von 2399 MHz – 2485 MHz, 100 kHz Messbandbreite und es wird eine Messung (eine Messung = 28 Datensätze) durchgeführt und abgespeichert.

Die Belegungsmessung besteht aus 7 Parametern:

```

occ<number> = <threadid>, <streamid>, <condition>, <desc>, <thresh-
old>,
<trigger=17>, <group=18>,

```

Alle Daten werden in eine .bin Datei geschrieben. Um in der Auswertung unterschiedliche Datensätze zu erhalten, muss eine Threadid vergeben werden. Anschließend wird der zu verwendende Stream (z.B. Belegungsmessung) ausgewählt. Die Integrationszeiten werden gemäß der [ITU-Rec 1880] Vorgaben verwendet. Zuletzt der Thread beschrieben und der Threshold an den einzelnen Standorten der Messung festgelegt.

Bei der Wahl des Threshold werden zwei Werte angegeben. Die erste Schwelle wird 3 dB und die andere 6 dB über den Grundrauschpegel eingestellt. Diese Schwellen werden gewählt, da sich die Grundrauschbedingungen ändern können und die Belegungsmessungen verfälschen. Stichwort hierfür wäre ein dynamischer Threshold (passt sich eigenständig dem Rauschpegel + einen festen Wert an), jedoch ist dies, nach Anfrage des Herstellers, in der Programmierung des Loggers nicht vorgesehen. Der Threshold ist so klein gewählt, da im Labor festzustellen ist, dass jeder Fremdteilnehmer zum potenziellen Störer unabhängig dessen Sendeleistung wird.

4.1 Messmittel

- Empfänger: RFeye
- Antenne: 3Com Omni Antenne von 2,4 – 5,8 GHz
- HF-Kabel: LMR240 (N to N)
- Adapter SMA to N
- Huber und Suhner Abschlusswiderstände 50 Ohm
- Terra Mobile 1541H mit der Software Acrylic WI-FI Professional um die SSID auszulesen.

4.2 Messaufbau

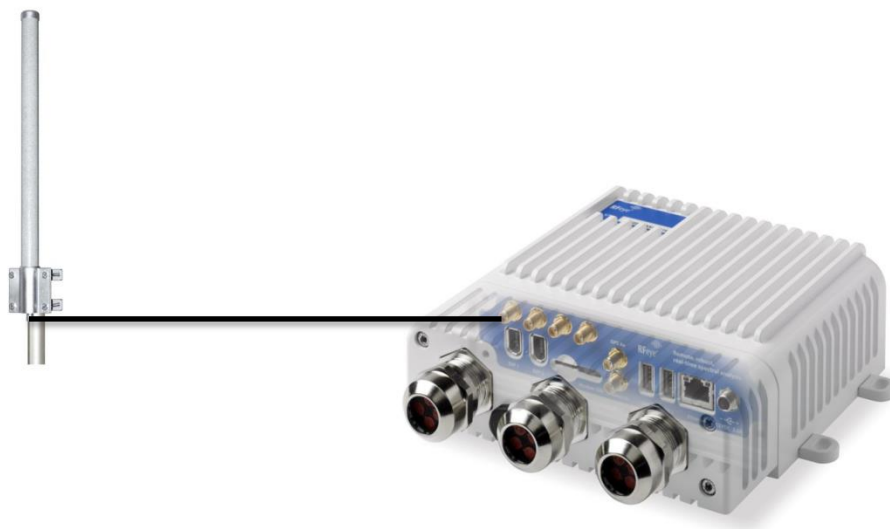


Abbildung 22: Schaltplan Belegungsmessung

Der Messaufbau besteht aus dem RFeye und der Messantenne, dadurch ist er überall installierbar.

4.3 Messergebnisse und Auswertung

Bei der Wahl der Standorte wird darauf geachtet, dass die Kategorien Land, Vorort und Stadt einbezogen werden. Im Anhang 3 [An_3] sind alle Messdaten der Belegungsmessung enthalten. Die binären Rohdaten liegen als Textdateien und die Listen der SSIDs für jeden Standort als .csv bereit.

4.3.1 Standort 1 Hohenaspe (rural)

Mit dem Standort Hohenaspe wird der Bereich Land verkörpert.

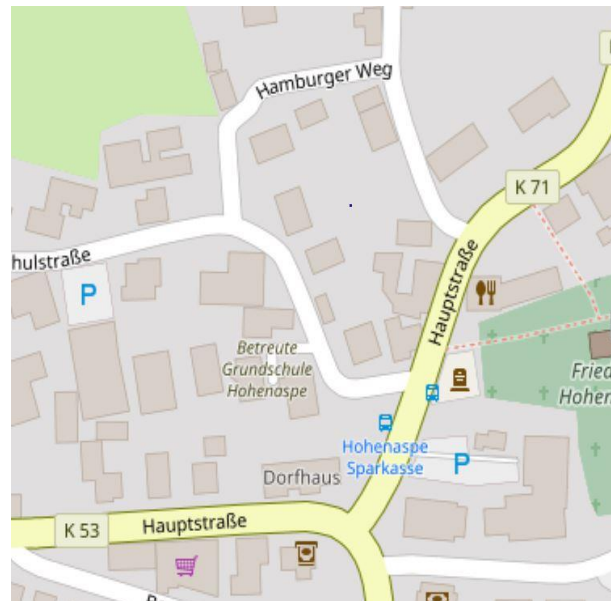


Abbildung 23: Bereich Hohenaspe, [Li_6]

Im Messbereich befindet sich eine Schule und eine Reihe von Einfamilienhäusern. Der Ort ist über Glasfaser erschlossen. Einige Einwohner werden somit einen WLAN-Accesspoint bereitstellen. Zum Zeitpunkt der Messung sind über das SSID Sniffing Tool Acrylic WI-FI Professional drei Accesspoints zu sehen. Die Accesspoints befinden sich auf den Kanälen 1 und 6.

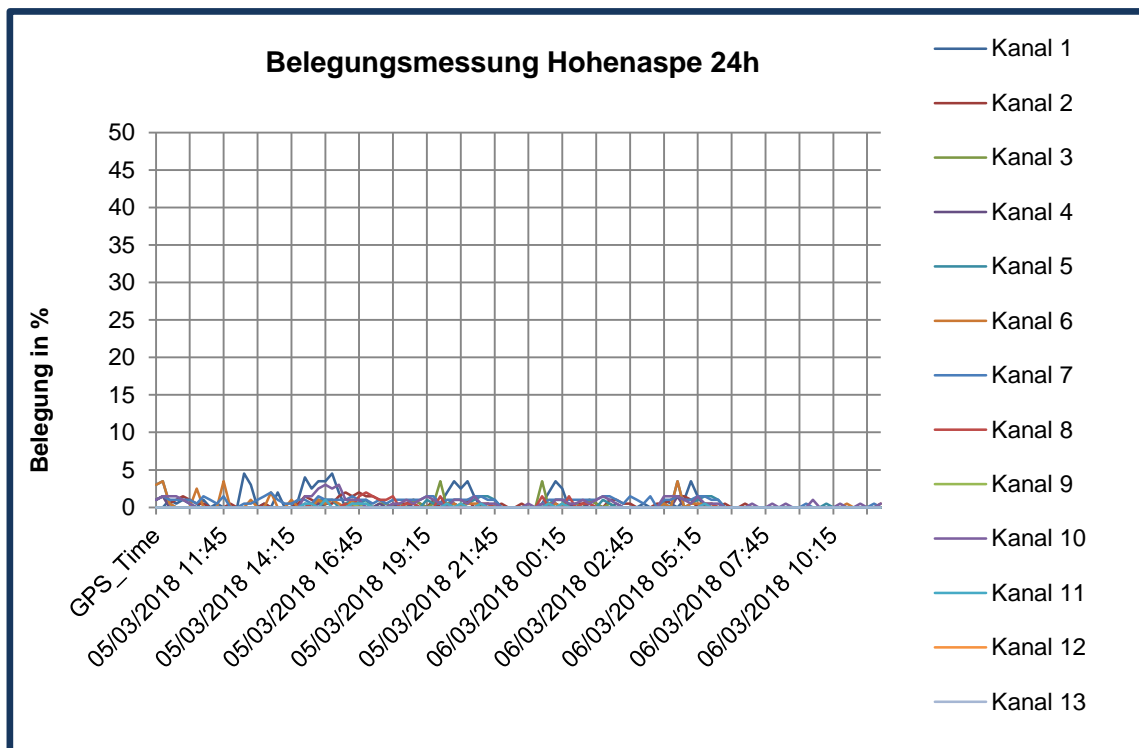
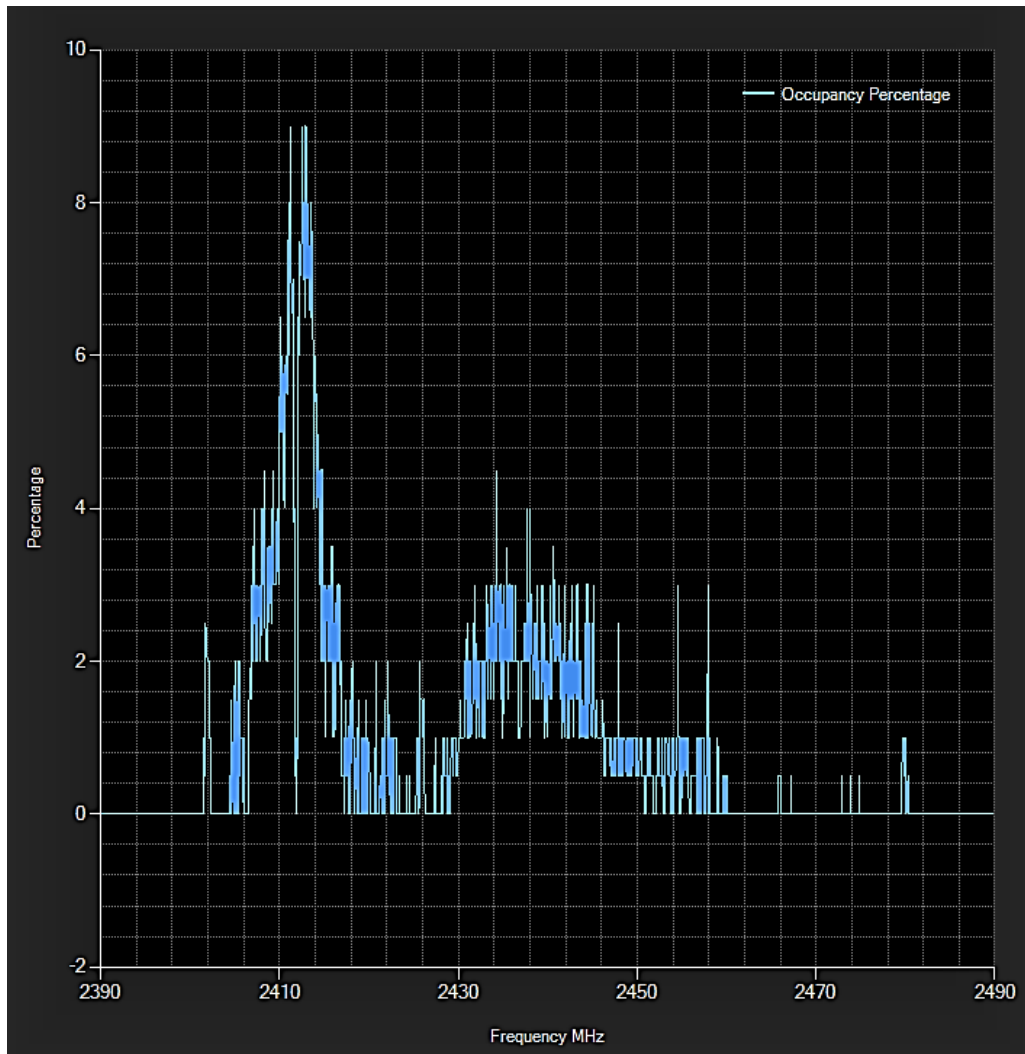
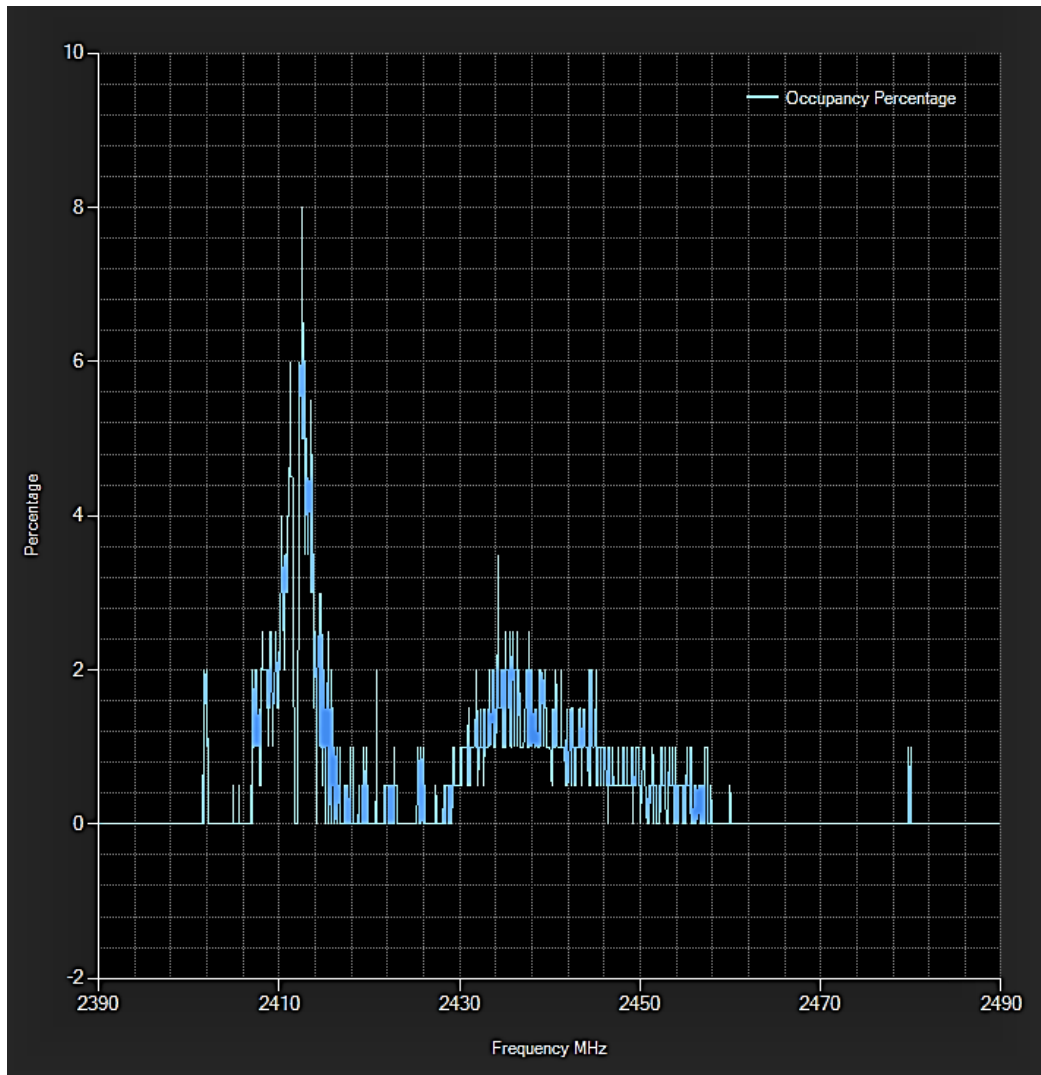


Diagramm 1: Belegungsmessung Hohenaspe

Die Nutzung des Spektrums ist sehr eingeschränkt. Die Belegung wird durch drei Accesspoints erzeugt. Es kann davon ausgegangen werden, dass keine große Datenmenge heruntergeladen wird.



Spektrum 12: Busy hour, Threshold -107 dBm



Spektrum 13: Busy hour, Threshold -104 dBm

Die Spektren 12 und 13 beschreiben die maximale Belegung unterschiedlicher Schwellwerte einer Stunde (Maximalbelegung 12:00 Uhr) innerhalb der 24 Stunden Messung. Hier wird deutlich, was bei der Wahl der falschen Schwelle passiert. Der Unterschied beträgt etwas mehr als 2 %, da mehr Rauschanteile bei der -107 dBm Schwelle gemessen wurden.

Die Auswertung im Punkt 3.1.4 hat gezeigt, dass die Kennung von drei Geräten das Spektrum zu 4 % belegt. Die Kanalnutzung beträgt hier ungefähr 8 %. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass keine Beeinträchtigung beim Zugriff auf den Kanal stattfindet.

4.3.2 Standort 2 Itzehoe (suburban)

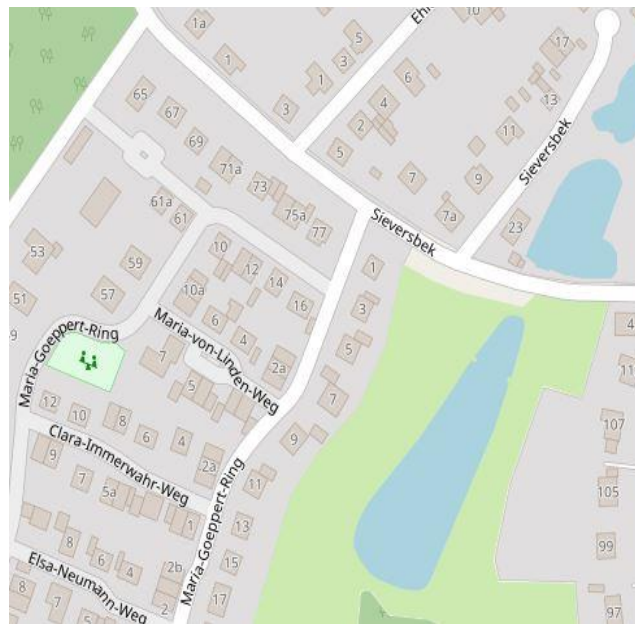


Abbildung 24: Bereich Itzehoe [Li_6]

Itzehoe ist eine Kleinstadt, die den Bereich Vorort bedient. Der Messort befindet sich in einem Neubaugebiet (viele Einfamilienhäuser), in dem viele Familien wohnen.

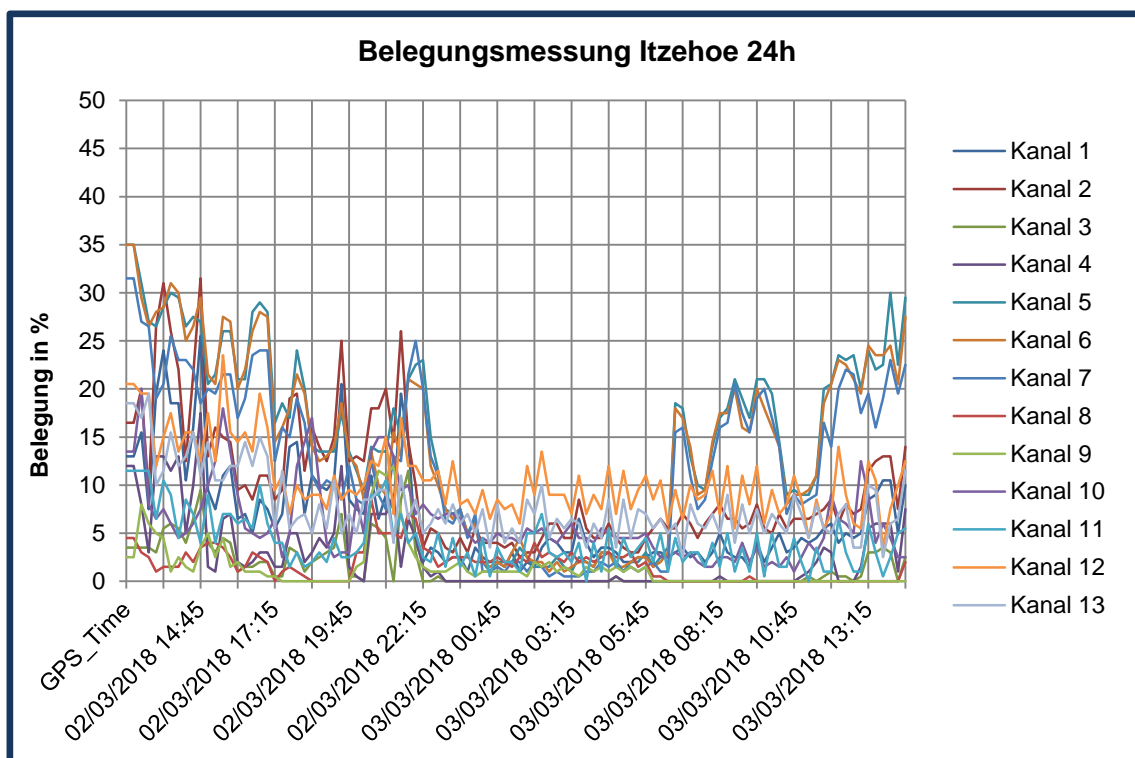
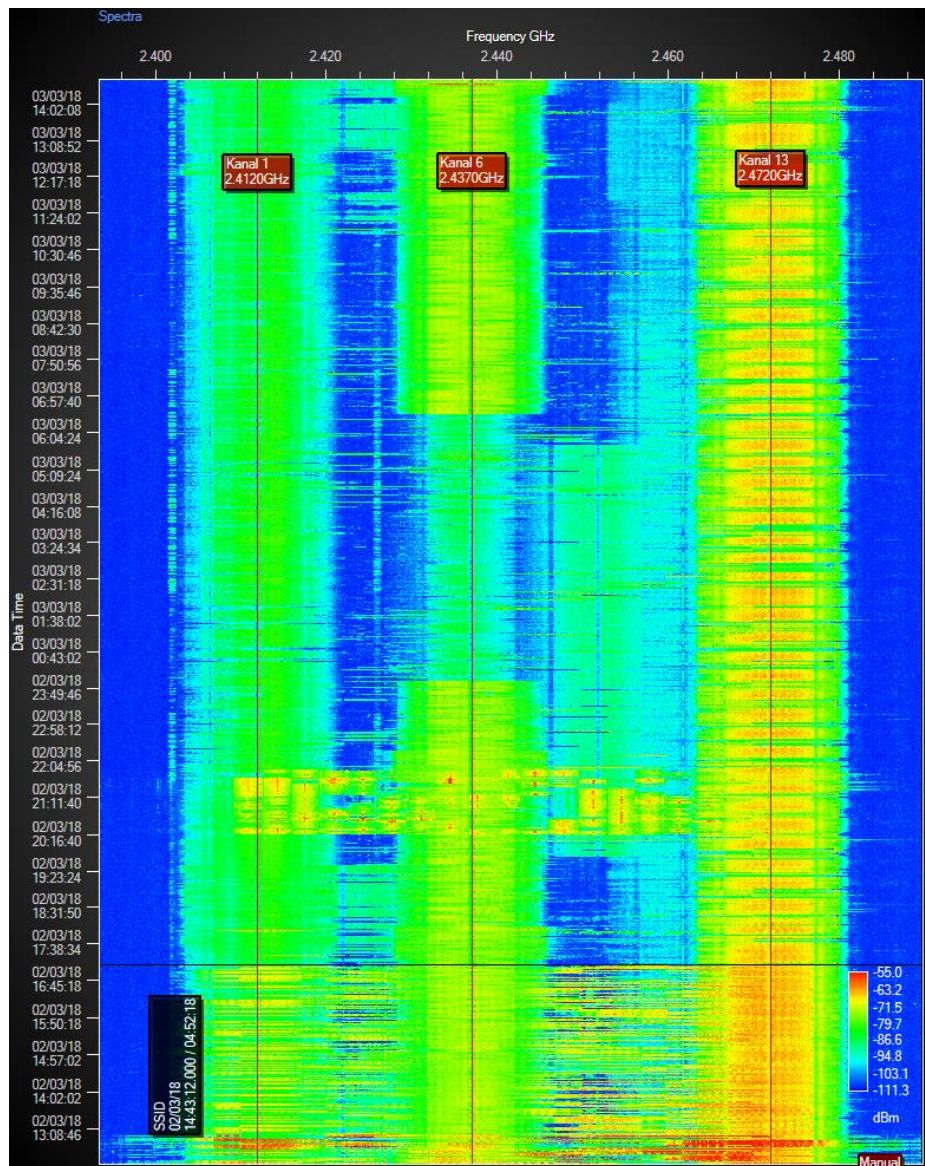


Diagramm 2: Belegungsmessung Itzehoe

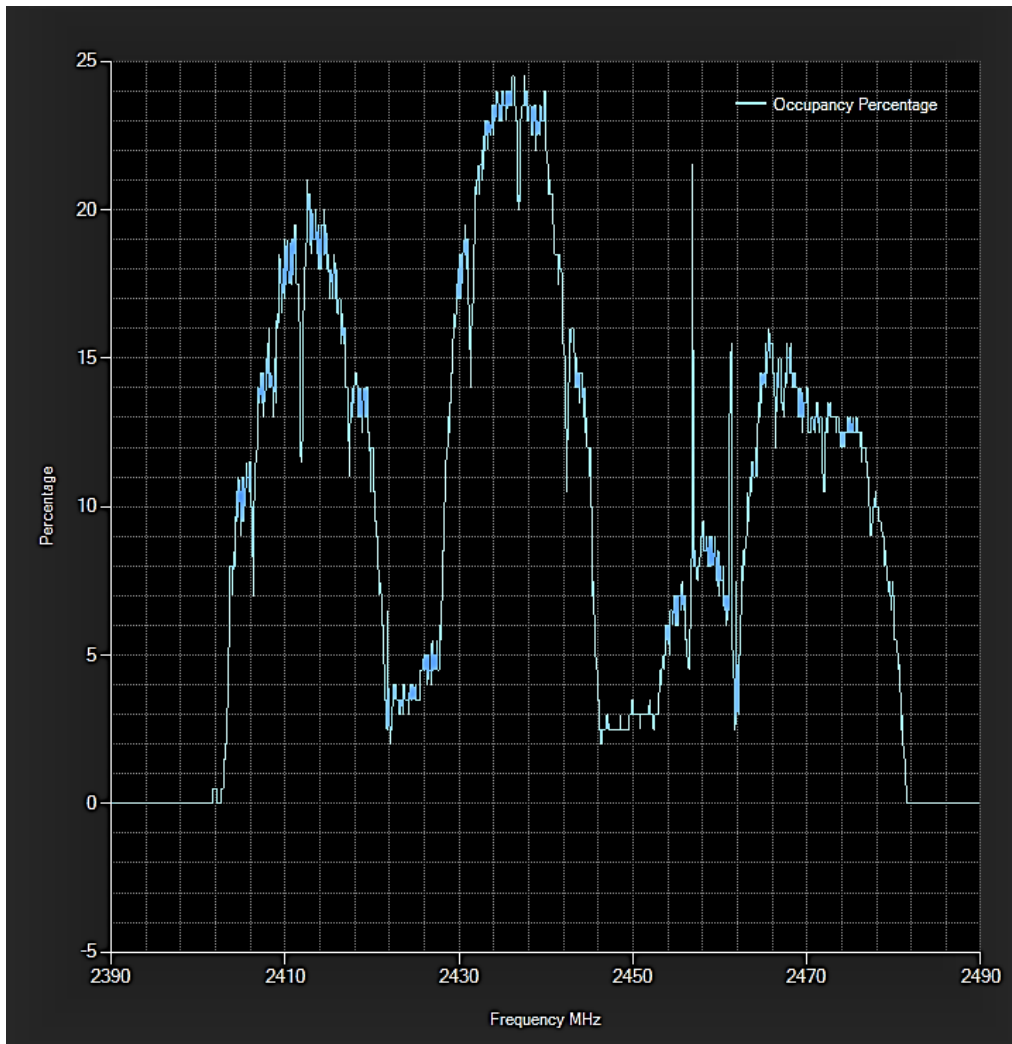
Im Diagramm 2 ist das belegte Spektrum deutlich höher als in Hohenaspe. 27 Teilnehmer darunter auch Fahrzeuge (z.B. VW_WLAN_333002 oder Audi_MMI:9327) be-

legen die Kanäle 1, 6 und 13. Die Belegung des Spektrums sinkt ab 22:00 Uhr stark ab. Im Bereich 3:00 Uhr steigt die Belegung, womöglich weil viele Windows-Rechner ihre Updates installieren. Ab 6:00 Uhr steigt die Belegung, da viele Teilnehmer aufstehen.



Spektrum 14: Wasserfall Itzehoe

Im Diagramm 2: **Belegungsmessung Itzehoe** ist die Belegung anfangs höher, als im restlichen Teil der Messung. Dies wird im Spektrum 14 deutlich. Zur Messung der SSIDs (Service Set Identifier ist der Netzwerkname des Accesspoints) wird eine aktive Sniffing-Software verwendet, die ständig abfragt, welche Accesspoints sich im Empfangsbereich befinden. Dabei springt sie von Kanal zu Kanal. Diese Sprünge sind von 13:00 – 17:00 Uhr aufgezeichnet. Die Software ist durch ein Windows-Update beendet wurden, sodass ab 17:00 Uhr die Belegung ohne Fehler weiterlaufen konnte. Aus dem Pegel des Kanals 13 kann angenommen werden, dass ein Repeater (Verstärker) zur Reichweitenerhöhung genutzt wurde.



Spektrum 15: Belegung Itzehoe 24h

Die Belegung entspricht der Messung im Labor (siehe Spektrum 9). Hierbei ist zu beachten, dass die Laboruntersuchung nur auf eine Stunde bezogen ist. Die Busy hour der Messungen in Itzehoe ergeben Maximalwerte von 28 % für den Kanal 1, 32,6 % für den Kanal 6 und 23 % für den Kanal 13. Im Wohngebiet sind die Häuser in einem Bereich von 5 – 25 m (siehe [Li_6]) zueinander angeordnet. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass es nur in Spitzenzeiten auf den Kanälen 1 und 6 zu verminderten Datenraten kommen kann. Diese Verminderung der Datenraten wird wahrscheinlich von den meisten Teilnehmern nicht bemerkt, da die Häuser und die dort vorhandenen Endgeräte weit genug voneinander entkoppelt sind. Bei einer ungünstigen Position kann es zu Störungen führen.

4.3.3 Standort 3 Hamburg (urban)

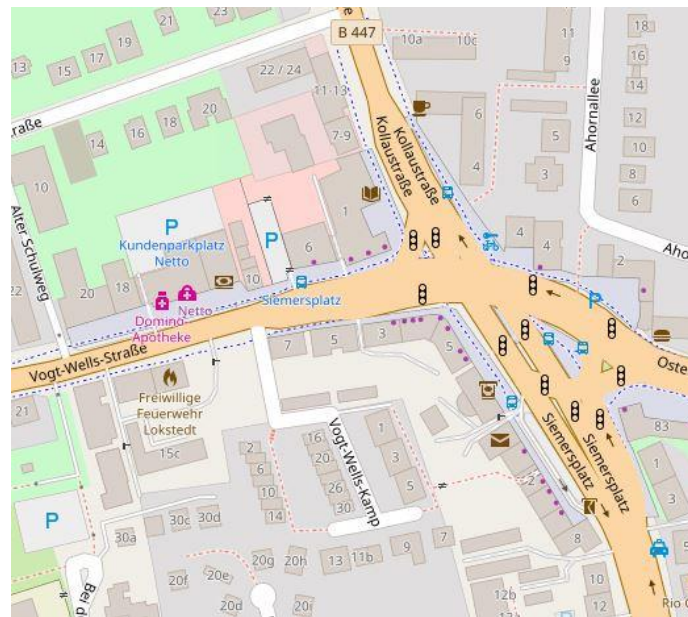


Abbildung 25: Bereich Hamburg [Li_1]

Der Bereich Hamburg ist eine Großstadt, die in viele Stadteile unterteilt ist. Der Stadtteil Lokstedt befindet sich 7 km nördlich vom Zentrum der Stadt.

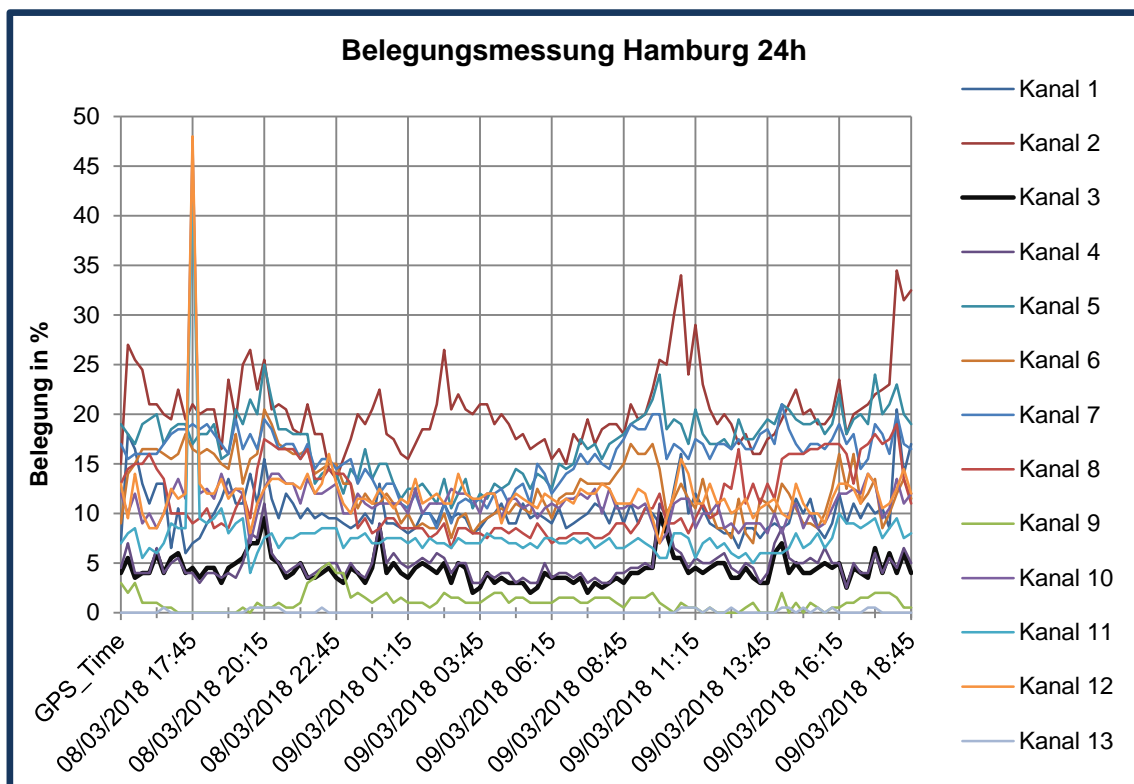
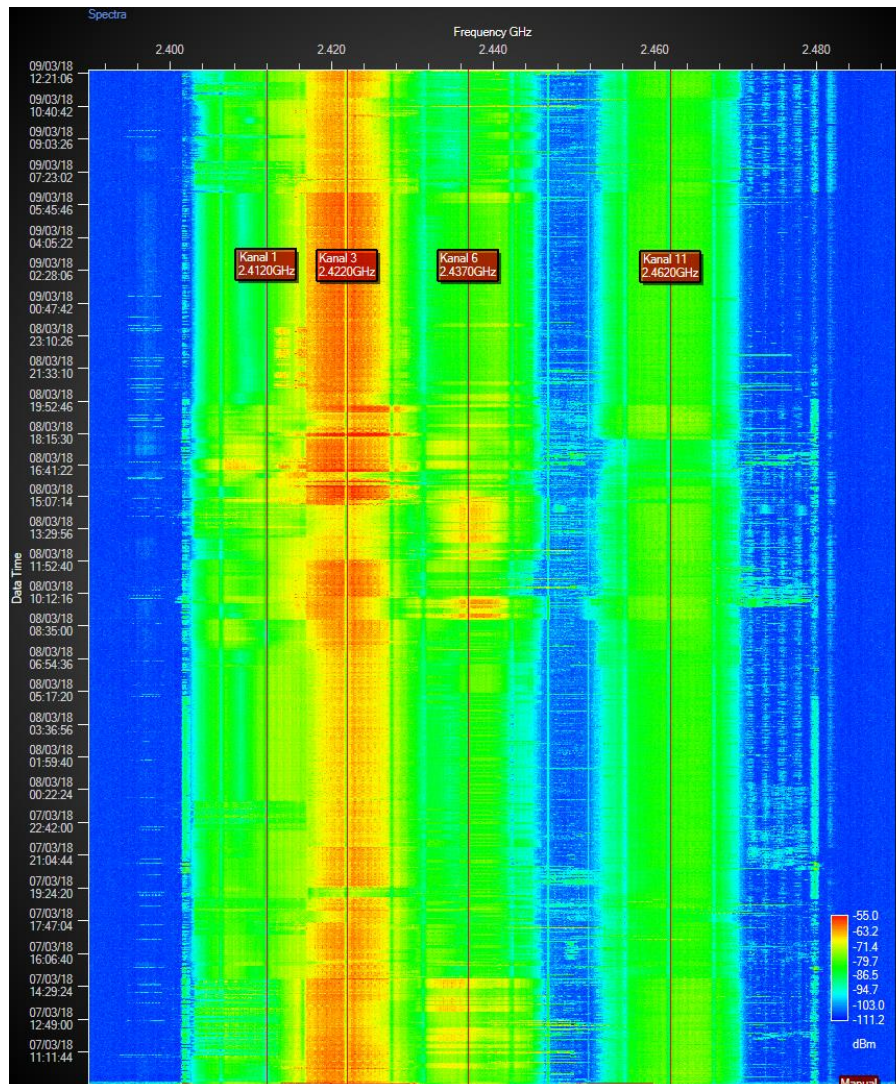


Diagramm 3: Belegung Hamburg 24h

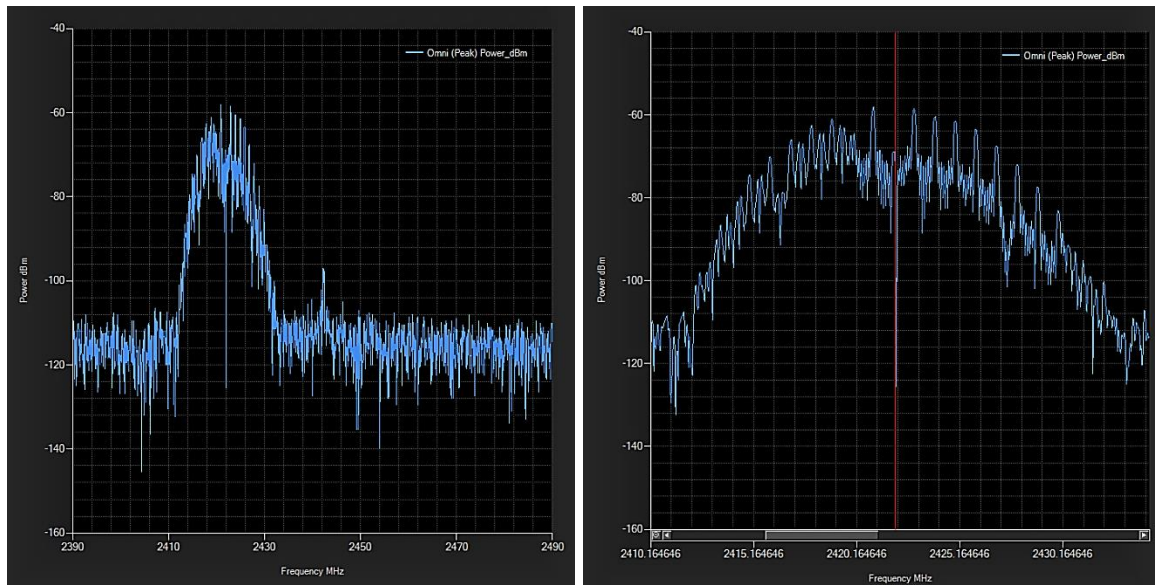
In Hamburg ist die Grundbelegung aufgrund der Teilnehmer höher als in Itzehoe. Die Belegung weist in der Nacht keine großen Einbrüche auf und im Kanal 1 werden die ganze Nacht Daten (siehe Diagramm 3, rote Linie) heruntergeladen. Schon hier sind deutliche Unterschiede ersichtlich. Im Empfangsbereich der Messung sind 15 offene Homespots bzw. Hotspots der Firma Vodafone auf den verwendeten Kanälen 1, 6 und 11 zu sehen. Die Begründung dafür ist, dass Kabel Deutschland und Vodafone fusioniert sind. Kabel Deutschland hat ein sehr gut ausgebautes Netz (Geschwindigkeiten bis 400 Mbit/s) in Hamburg, somit wechseln viele Privatpersonen zu Vodafone und stellen ihr WLAN für andere Teilnehmer zur Verfügung. Außerdem ist das firmeneigene Hotspot-Netz auch vertreten.



Spektrum 16: Wasserfall Hamburg

Interessant bei dieser Auswertung ist, dass im Spektrum 16 der Kanal 3 einen sehr hohen Pegel aufweist. Jedoch ist die Belegung nicht sehr hoch und auch die bestehenden SSIDs verwenden den Kanal 3 nicht. Im Diagramm 3 ist dieser Kanal besonders hervorgehoben (schwarz). Bei einer Belegungsmessung spielt der Pegel eine untergeordnete Rolle und nur Thresholdüberschreitungen werden dokumentiert, dies bedeutet das dieses Signal sehr kurze aber starke Impulse sendet. Im WLAN Bereich können nur 3 Kanäle überlappungsfrei. Da-

her sind auch in den vorherigen Auswertungen immer nur drei Kanäle zu sehen. Da es keine Überlappung geben soll, ist Vermutung ein weit entfernter Repeater zu dem Kanal 3.



Spektrum 17: Repeater Kanal 3

Da der RFeye sehr schnell ist, kann zu jedem Zeitpunkt das Spektrum (siehe [An_2], rfeyed.cfg, Zeile 71, vorher programmiert) wiedergegeben werden. Im Spektrum 17 sieht man einen Impuls des vermuteten Repeaters, der sich tatsächlich genau im Kanal 3 befindet und einen Pegel von über -60 dBm aufweist.

Anhand der Teilnehmeranzahl (37 Teilnehmer einer 5 minütigen Überwachung) ist zu sagen, dass es zu großen Problemen bei der WLAN Übertragung kommt. Nicht nur die Hotspots werden von vielen „Gästen“ verwendet, auch die Teilnehmer wohnen räumlich näher (Vergleich z.B. zu Itzehoe) zusammen. Die busy hours betragen 36,5 % im Kanal 1, 30,8 % im Kanal 2 und 44,5 % im Kanal 3. Im Spektrum 10 ist eine Belegung von 55 % dargestellt, die im Labor eine maximale (je nach verwendeten Endgerät) Datenrate von 34,5 Mbit/s erzeugte. Datenraten in Zeiten der „Busy hour“ sind deutlich reduziert und können im schlimmsten Fall zu Abbrüchen führen.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Untersuchungen im Labor konnten die Daten der Belegungsmessungen vor Ort sauber ausgewertet und Rückschlüsse daraus gezogen werden. Ohne diese Vorbetrachtungen könnte man annehmen, dass der Funkkanal kaum genutzt werden würde, jedoch zeigen die Ergebnisse etwas Anderes.

Die Auswertung der Daten ergibt, dass die Datenraten stark abhängig davon sind, wie viele Teilnehmer auf den Kanal zugreifen und nicht, wie viele Router in Betrieb sind.

Die Belegungsmessungen bilden das Verhalten der Menschen ab: Sie stehen beispielsweise morgens ab 6:00 Uhr auf, gehen dann zur Arbeit, kommen gegen 16:30 Uhr nach Hause und werden gegen 22:00 schlafen gehen. Dies ist auch in den Kurvenverläufen der Belegungsmessung zu sehen. Im Bereich Itzehoe ist dies zwar stärker als im Bereich Hamburg ausgeprägt, dennoch ist eine Tendenz erkennbar. Die Belegung des Kanals ist somit stark zeit- und nutzabhängig. Die Angaben der Routerhersteller können in den wenigsten Fällen eingehalten werden, denn sobald zwei Teilnehmer sich einen Kanal teilen müssen, halbieren sich die Datenraten, sofern sie räumlich nicht weit genug getrennt sind.

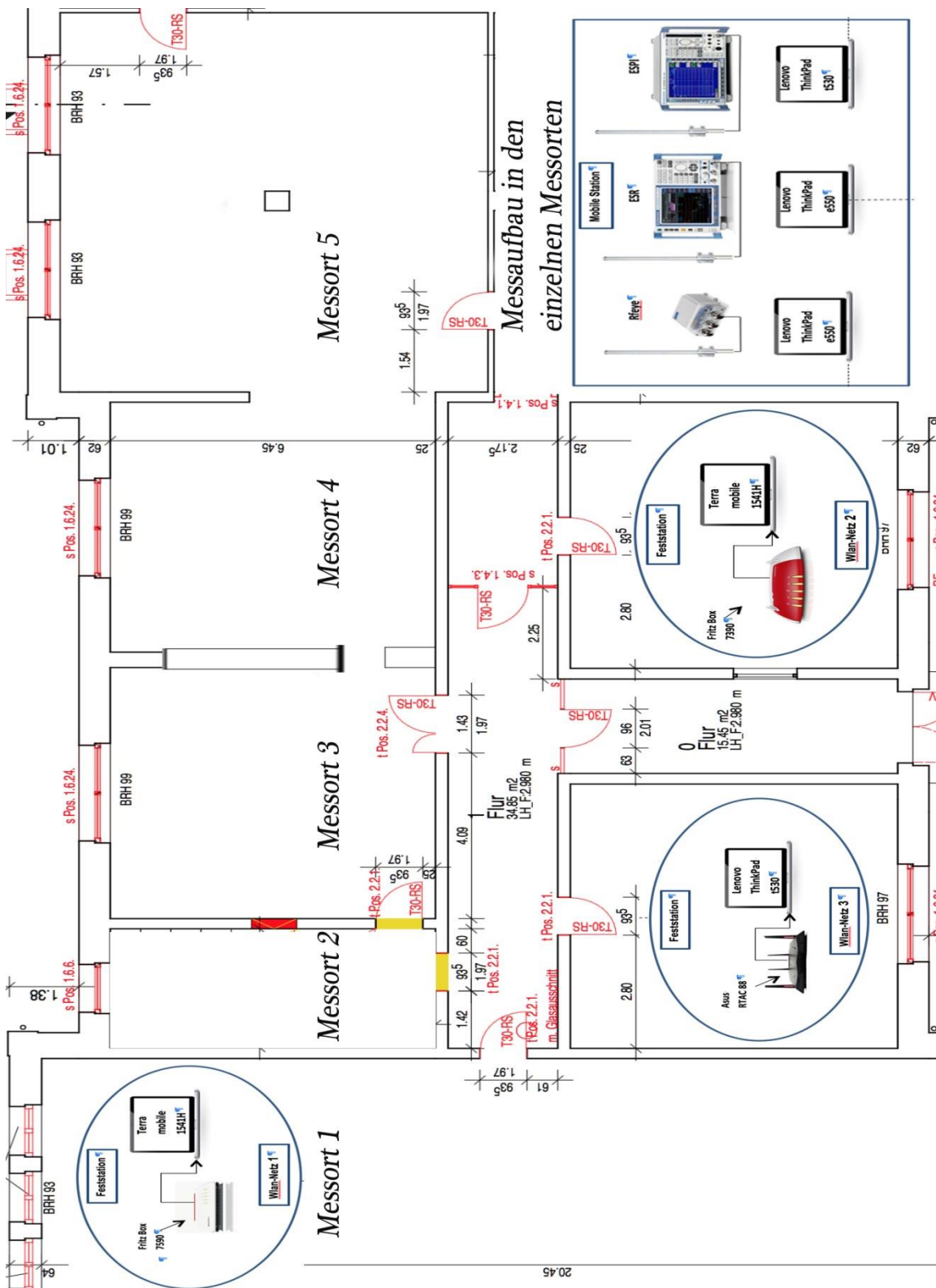
Die Erkenntnis zur maximalen Auslastung eines Funkkanals ist, dass er deutliche Reserven hat. Somit muss eine Erweiterung des Frequenzbereiches nicht erfolgen.

Das Thema Datendurchsatz sollte stärker in den Fokus gerückt werden. Kanäle müssen besser koordiniert werden und Router untereinander nach dem Prinzip CSMA/CA arbeiten. Dadurch werden gleichzeitige Zugriffe minimiert, die zu verminderten Datenraten führen.

Zukünftig muss das Spektrum langfristiger untersucht werden. Dies ermöglicht eine Tendenz für die kommenden Jahre zu erhalten. Der 2,4 GHz Bereich ist durch seine erhöhte Reichweite für den Nutzer interessant, dennoch stellen viele Personen ihr Netz auf 5,1 GHz um. Somit ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Teilnehmer im WLAN 2,4 GHz in den nächsten Jahren weniger werden.

Anhang

[An_01]



Weitere Anhänge (z.B. [An_02] und [An_02]) befinden sich auf dem mitgelieferten DVD-Träger.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: OSI-Referenzmodel u. IEEE 802, [Abb_1]	2
Abbildung 2: CSMA, [Abb_2]	3
Abbildung 3: Reichweiten der Stationen im CSMA/CA, [Abb_3]	4
Abbildung 4: 11-Bit Barker Code DSSS, [Bu_3] Seite 63.....	5
Abbildung 5: Störresistenz bei Spreiztechnologie DSSS, [Bu_3] Seite 64	5
Abbildung 6: Vergleich FDM mit OFDM, [Bu_2] Kapitel 19 Seite 347-356	6
Abbildung 7: RFeye mit Outdoorkit [Abb_5]	11
Abbildung 8: RFeye, [CR_264].....	11
Abbildung 9: Blockschaltbild Rfeye [CR_264]	12
Abbildung 10: Informations- u. Anwendungsserver	13
Abbildung 11: Ablaufplan rfeyed.cfg, [TN_5].....	14
Abbildung 13: Messaufbau Untersuchung 1 - WLAN Reichweite	15
Abbildung 12: Schaltbild Zur Untersuchung 1 – WLAN Reichweite.....	16
Abbildung 14: Schaltbild zum Untersuchung 1 - Durchsatzmessung eigenes WLAN	25
Abbildung 15: Livedaten des Loggers	29
Abbildung 17: GTHEM	30
Abbildung 16: Schaltbild Untersuchung 2	31
Abbildung 18: Untersuchung 2 _ Messhalle	33
Abbildung 19: startup.sh - Datei	34
Abbildung 20: ncpd.conf Datei	35
Abbildung 21: rfeyed.cfg Datei.....	36
Abbildung 22: Schaltplan Belegungsmessung	37
Abbildung 23: Bereich Hohenaspe, [Li_6].....	38
Abbildung 24: Bereich Itzehoe [Li_6]	41
Abbildung 25: Bereich Hamburg [Li_1].....	44

Spektrenverzeichnis

Spektrum 1: DSSS - Empfänger.....	17
Spektrum 2: OFDM- Sender	17
Spektrum 3: Time Domain Power Messung	18
Spektrum 4: Kennung Router	19
Spektrum 5: Time Domain drei Router	23
Spektrum 6: Messort 4.....	24
Spektrum 7: Messort 3.....	24
Spektrum 8: Belegungsmessung Kennung	26
Spektrum 9: Belegung der Durchsatzmessung ohne Fremdteilnehmer.....	27
Spektrum 10: Belegung der Durchsatzmessung mit Fremdteilnehmer	28
Spektrum 11: Untersuchung 2 - GTHEM	32
Spektrum 12: Busy hour, Threshold -107 dBm.....	39
Spektrum 13: Busy hour, Threshold -104 dBm.....	40
Spektrum 14: Wasserfall_Itzehoe	42
Spektrum 15: Belegung_Itzehoe 24h	43
Spektrum 16: Wasserfall_Hamburg.....	45
Spektrum 17: Repeater Kanal 3	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kanalliste 2,4 GHz, [Tab_3].....	7
Tabelle 2: Messprobentabelle im Vergleich zwischen un- und abhängiger Stichprobe	9
Tabelle 3: Clustermessung, [VE_1]	20
Tabelle 4: Messergebnisse Reichweite ohne Fremdteilnehmer	21
Tabelle 5: Messung Fremdteilnehmer	22
Tabelle 6: Messergebnisse GTHEM.....	31

Quellenverzeichnis

a) Skripte

[Skript_1] Vorlesungsskript Kommunikationstechnik Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher, 2014

[Skript_2] Vorlesungsskript Kommunikationstechnik Prof. Dr. Dieter Schwarzenau, 2014

[Skript_3] Vorlesungsskript Nachrichtentechnik Prof. Dr. Dieter Schwarzenau, 2015

[Skript_4] Vorlesungsskript IT-Netze und Protokolle Prof. Dr. Olaf Friedewald, 2015

b) Bücher

[Bu_1] Andrei Andrejewitsch Markow, Wahrscheinlichkeitsrechnung, 1912

[Bu_2] Walter Fischer, Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in Theorie und Praxis, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

[Bu_3] Wireless Lan, Addison-Wesley Verlag, ISBN 3-8273-1917-X

c) Abbildungen

[Abb_1]

<https://www.google.de/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiDnPfF3cnZAhWMb1AKHSjDAMYQjRx6BAgAEAY&url=http%3A%2F%2Fslideplayer.com%2Fslide%2F4271877%2F&psig=AOvVaw1t3R1XkFrNNbOyxLd8Rw0T&ust=1519945735228181>, [01.03.2018 00:13]

[Abb_2] Vorlesungsskript Kommunikationstechnik Prof. Dr. Schwarzenau – Hs-Magdeburg, 2014

[Abb_3] Vorlesungsskript Kommunikationstechnik Prof. Dr. Schwarzenau – Hs-Magdeburg, 2014

[Abb_4] Vorlesungsskript Nachrichtentechnik Prof. Dr. Schwarzenau – Hs-Magdeburg, 2014

[Abb_5] <https://www.crfs.com/all-products/hardware/nodes/node-20-6/> 11.03.2018 23:36

d) Tabellen

[Tab_1] R-REC-SM.1880-2-201709

[Tab_2] IEEE STd 802.11n

[Tab_3] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1712061.htm> 11.03.2018 23:37

e) Normen und Standards

[ITU-Rec 1880]: International Telecommunication Union, ITU: Recommendation ITU-R SM.1880-2 Spectrum occupancy measurements and evaluation; 09/2017.

[ITU-Rep 2256] International Telecommunication Union, ITU: Report ITU-R SM.2256 Spectrum occupancy measurements and evaluation; 09/2012.

[IEEE STd 802.11] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE STd 802.11, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirement, 1999

[IEEE STd 802.11b] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE STd 802.11, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirement, 1999

[IEEE STd 802.11g] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE STd 802.11, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirement, 2003

[IEEE STd 802.11n] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE STd 802.11, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirement, 2009

[IEEE 10.1109/ISEMC.1999.812923] Understanding Impulse Bandwidth Specification of EMI Receivers, 2-6.08.1999

f) Links

[Li_1] <https://www.ijser.org/paper/UHF-700-MHz-Spectrum-Band-Occupancy-Measurements-Analysis-and-Considerations.html> [19:20 19.02.2018]

[Li_2] <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Vor-30-Jahren-IEEE-802-nimmt-Arbeit-auf-957820.html> 21.02.2018 17:35

[Li_3] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1712061.htm> 26.02.2018 00:54

[Li_4] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1304151.htm> 26.02.2018 18:10

[Li_5] http://erendemir.weebly.com/uploads/4/8/5/0/4850484/qpsk_and_16_qam_digital_modulation.pdf 26.02.2018 20:08:17

[Li_6] <https://www.openstreetmap.org/#map=6/51.330/10.453> 12.03.2018 22:25

[Li_7] <https://www.linguee.de/>

Links für die Abbildungen:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=vjSwWua7CYrWwAKQt5jgDw&q=fritzbox+7390+fron&oq=fritzbox+7390+fron&gs_l=psy-ab.3...14733.15481.0.15672.5.5.0.0.0.0.77.291.5.5.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.3.185...0j0i24k1.0.IBICPUrcc0#imgrc=FdmMNzgp_tReNM:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=vjSwWua7CYrWwAKQt5jgDw&q=fritzbox+7590&oq=fritzbox+7590&gs_l=psy-ab.3..0l10.1782.1979.0.2090.2.2.0.0.0.60.115.2.2.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.2.115...0i7i30k1j0i24k1.0.Qc9_LYmmtXU#imgrc=pFQEwX4kelmnOM:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=_TSwWurvK4bewAKSyljQCQ&q=asus+rt+acc+88+front&oq=asus+rt+acc+88+front&gs_l=psy-ab.3...17101.22481.0.22624.20.20.0.0.0.0.99.1188.20.20.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.12.710...0j0i30k1j0i13k1j0i13i30k1j0i13i10i30k1.0.PDEfx-tRSkE#imgrc=R5cy0unUQXTc5M:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=FDWwWruyOoSiwAL62pDYDw&q=smu+200a&oq=smu+200a&gs_l=psy-ab.3..0i19k1.19987.23432.0.23512.8.8.0.0.0.82.500.8.8.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.8.497...0j0i67k1j0i30k1j0i13k1j0i13i30k1j0i5i30k1j0i8i30k1j0i5i30i19k1.0.WDN7yt6iCFc#imgrc=FLvVkp8oEMAvwM:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=LTWwWtP3EtHMwQLDkoyYCA&q=espi&oq=espi&gs_l=psy-ab.3..0l10.32537.33333.0.34788.4.4.0.0.0.65.224.4.4.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.4.222...0i67k1.0.7eICVx2rh4Y#imgrc=T3ktccbXc6_WcM:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=czWwWtz6NJH6wALNjbeIDQ&q=esr+rohde+und+scvhewart+emi&oq=esr+rohde+und+scvhewart+emi&gs_l=psy-ab.3...1739.11431.0.11519.28.26.2.0.0.0.125.1587.25j1.26.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.3.187...0j0i67k1j0i30k1j0i13k1.0._ZwXibFVfBA#imgrc=Ph1NletswQhYWM:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=ljWwWs7OEo-kwAKoq6SgBw&q=laptop+grafik&oq=laptop+grafik&gs_l=psy-ab.3..0l10.6133.9337.0.9465.11.7.2.2.0.65.390.7.7.0...0...1c.1.64.psy-ab..0.10.350...0i67k1.0.FoKDrgWtc_4#imgrc=mQupbGSmHUJlgM:

https://www.google.de/search?rlz=1C1VSNG_enDE710DE710&biw=1110&bih=724&tbm=isch&sa=1&ei=tTWwWtyKODHdwQLvtKyADQ&q=wlan+stab+antenne+n+anschluss&oq=wlan+stab+antenne+n+anschluss&gs_l=psy-ab.12...0.0.0.19181.0.0.0.0.0.0.0.0.0...0...1c..64.psy-ab..0.0.0...0.drOZTmiQV9U#imgrc=ZdDRQ8BFzV24iM:

<https://www.crfs.com/all-products/hardware/nodes/node-20-6/>

g) Allgemeinzuteilungen und Messvorschriften

[Vfg35_02] Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Bereichen 5150 MHz – 5350 MHz und 5470 MHz – 5725 MHz für die Nutzung durch die Allgemeinheit in lokalen Netzwerken; Wireless Local Area Networks (WLAN-Funkanwendungen), 2002

[Vfg10_13] Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung in lokalen Netzwerken; Wireless Local Area Networks (WLAN- Funkanwendungen), 2400,0-2483,5 MHz, 2013

[TN MVF-01/1.2.1] Feldstärkemesstechnik, November 1999, Verfasser PMD-31 Reg TP, Außenstelle Itzehoe

[VE_1] Vereinbarung zwischen Fernmeldeverwaltungen von Belgien, der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Italien, Kroatien, Luxemburg, den Niederlanden, Österreich, Polen, der Schweiz, der Slowakischen Republik, Slowenien, der Tschechischen Republik und Ungarn, Wien 3 Dezember 1993

h) Handbücher RFeye

[CR_43] CR-000043-UG-3-Logger_Application, CRFS, 03.04.2013

[CR_69] CR-000069-TN-2-NCPD_Configuration_File_Format, CRFS, 09.05.2016

[CR_59] CR-000059-TN-3-NCPD_Error_Codes, CRFS, 10.05.2016

[CR_63] CR-000063-TN-3-Antenna_Factor_File_Format, CRFS, 32.01.2017

[CR_34] CR-000034-UG-10-User_Guide_Node_20-6, CRFS, 14.09.2017

[CR_52] CR-000052-TN-2-Node_Data_Storage_and_Retrieval_Methods, CRFS, 09.05.2016

[CR_56] CR-000056-TN-2-Power_On_Ethernet, CRFS, 09.05.2016

[CR_81] CR-000081-TN-2-Node_Linux_Boot_Scripts, CRFS, 09.05.2016

[CR_264] CR-000264-UG-2-Node_Axis, CRFS, 24.04.2009

[TN_30] Structure of a Data File, CRFS, 30.10.3013

[TN_5] RFeye Logger Scripts, CRFS, 30.10.2013

[CR-32] RFeye Site Manual, 06.04.2017

[D_4A27] CRFS RFeye node file storage specification, CRFS, 03.08.2009

[D_4] RFeye Node File Storage Specification, CRFS, 08.11.2013

.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der ausgewiesenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen gedruckten oder im Internet verfügbaren Werken entnommen sind, habe ich durch genaue Quellenangaben kenntlich gemacht.

Irxleben, den 22.03.2018

Marcel Hartmann