



Großer Beleg

# **GENAUIGKEITSABSCHÄTZUNG FÜR WLAN-AUSLEUCHTUNGSMODELLE**

Lars Großmann  
Mat.-Nr.: 3243933  
Immatrikulationsjahrgang: 2005  
Fachsemester: 10  
Kontakt: s6585929@mail.zih.tu-dresden.de

Betreut durch:  
Dr. Dietbert Gütter  
Eingereicht am 29. April 2011



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
2.1	Motivation . . . . .	7
2.2	Einflüsse . . . . .	7
2.3	Wichtige Größen . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Störeinflüsse</b>	<b>11</b>
3.1	Technik und Aufbau bei eigenen Untersuchungen . . . . .	13
3.2	Physikalische Effekte . . . . .	14
3.2.1	Dämpfung . . . . .	14
3.2.2	Reflexion, Streuung, Beugung und Absorption . . . . .	15
3.2.3	Überlagerungen . . . . .	15
3.3	Feste Einflüsse . . . . .	16
3.3.1	Bausubstanz . . . . .	16
3.3.2	Ausstattung . . . . .	17
3.4	Veränderliche Einflüsse . . . . .	18
3.4.1	Menschen . . . . .	19

3.4.2	Technische Fremdeinflüsse . . . . .	22
3.4.3	Technische Eigeneinflüsse . . . . .	25
3.5	Funktionale Einflüsse . . . . .	27
3.5.1	Antennenausrichtung . . . . .	27
3.5.2	Kanalwahl . . . . .	30
3.5.3	Automatische Konfiguration . . . . .	32
3.6	Fazit . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Untersuchung vorhandener Planungstools</b>	<b>35</b>
4.1	Airmagnet Planner . . . . .	37
4.2	Psiber RF3D WifiPanner . . . . .	39
4.3	Aerohive Online WifiPlanner . . . . .	40
4.4	CANDY SiteFinder . . . . .	42
4.5	Fazit . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Berechnung</b>	<b>45</b>
5.1	Modelle . . . . .	47
5.1.1	Empirische Modelle . . . . .	47
5.1.2	Semi-empirische Modelle . . . . .	49
5.1.3	Strahlenoptische Modelle . . . . .	51
5.1.4	Feldtheoretische Modelle . . . . .	53
5.2	Optimierungen . . . . .	54
5.2.1	Abhängigkeit des Aufwands von der Genauigkeit . . . . .	54
5.2.2	Abschätzung von möglichem Gewinn . . . . .	55
5.2.3	Berechnungsoptimierung . . . . .	57

<b>6</b>	<b>Access-Point Positionierung</b>	<b>61</b>
6.1	Idee . . . . .	63
6.1.1	CANDY . . . . .	63
6.1.2	Einbindung . . . . .	64
6.1.3	Algorithmus . . . . .	64
6.2	Implementierung . . . . .	65
6.2.1	Technische Grundlagen . . . . .	66
6.3	Ausblick . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>71</b>
7.1	Gewonnene Erkenntnisse . . . . .	73
7.2	Weitergehende Betrachtungen . . . . .	73
<b>8</b>	<b>Abgabedatenträger</b>	<b>75</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>v</b>
	<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>vii</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xi</b>
	<b>Quellen- und Literaturverzeichnis</b>	<b>xiii</b>



# **1 AUFGABENSTELLUNG**







## AUFGABENSTELLUNG FÜR DEN GROSSEN BELEG

Name, Vorname: Großmann, Lars  
Studiengang: Informatik  
Matrikel-Nr.: 3243933  
Thema: **„Genauigkeitsabschätzung für WLAN-Ausleuchtungsmodelle“**

### ZIELSTELLUNG

Die WLAN-Planung nutzt in der Regel strahlenoptische Modelle zur Abschätzung der funktechnischen Ausleuchtung. Diese Modelle beinhalten naturgemäß erhebliche Vereinfachungen gegenüber den realen Verhältnissen. Der Rechenaufwand ist stark von der Rasterung der Umgebungsgeometrie abhängig. Da Modellvereinfachungen prinzipiell Ungenauigkeiten der Berechnungsergebnisse verursachen, soll im Rahmen dieser Arbeit der sinnvolle Rechenaufwand ermittelt werden. Speziell sollen die Einflüsse von veränderlichen Objekten, wie Menschen, Möbel, Technik abgeschätzt werden. Daraus sollen Vereinfachungen der Berechnung abgeleitet werden. Ergänzend sollen sinnvolle Aufschläge für berechnete Größen vorgeschlagen werden, um eine gute Planungsqualität zu erreichen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen Optimierungsvorschläge für das CANDY-Projekt abgeleitet werden.

Betreuende HSL: Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. Alexander Schill  
Betreuer TUD: Dr. rer. nat. Dietbert Gütter  
Beginn am: 01. November 2010  
Einzureichen am: 30. April 2011

---

Unterschrift des betreuenden Hochschullehrers



## **2 EINLEITUNG**



## 2.1 MOTIVATION

Bei der Planung von Local Area Networks (LANs) spielen schnurlose Technologien eine immer größere Rolle. Mit Wireless LAN (WLAN)-Planungs- und Ausleuchtungsmodellen können die Dämpfung von WLAN an den unterschiedlichsten Positionen in modellierten Gebäuden auf viele Nachkommastellen genau berechnet werden. Diese sehr genaue Berechnung benötigt bei größeren Projekten mit vielen Access Points (APs) viel Rechenleistung und entsprechend auch viel Zeit. Da die verwendeten Modelle aber bereits Vereinfachungen zur realen Welt aufweisen, enthalten die damit berechneten Ausleuchtungen gewisse Fehler.

In den Modellen wird außerdem in der Regel nur der Gebäudegrundriss, nicht aber zusätzliche dämpfende Objekte wie beispielsweise die Einrichtung oder gar durch den Raum laufende Menschen betrachtet. Diese verändern die berechneten Werte in unterschiedlichen starken Umfang.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Einflüsse zu untersuchen und aus den Ergebnissen eine sinnvolle Genauigkeit für die Berechnung der Modelle abzuleiten. So kann bei sinnvollen Ergebnissen Rechenleistung gespart werden und die Platzierung von APs in Modellen schneller verändert und neu berechnet werden.

## 2.2 EINFLÜSSE

Auf geplante WLANs wirken verschiedenste Einflüsse ein. So können sich diverse ortsfeste Einflüsse wie Möbel, Regale mit Büchern, Pflanzen, Computer oder einfache Mikrowellen negativ auf die real vorhandene WLAN-Leistung auswirken.

Aber auch sich ständig verändernde Einflüsse können Auswirkungen auf ein WLAN haben. So führen durch einen Raum laufende Menschen oder Handy-Gespräche unter Umständen zu einer erhöhten Dämpfung und somit zu einer schlechteren Empfangsleistung, die bei der Planung nicht betrachtet wurde.

Doch auch funktionale Probleme haben Einfluss auf die berechneten Modelle. So haben verschiedene APs die Eigenschaft, ihre Sendeleistung dynamisch an die Auslastung anzupassen. Diese dynamische Anpassung kann die berechneten Modelle komplett revidieren und deren Sinn in Frage stellen. Hier muss untersucht werden, inwiefern die Anpassung relevant ist. Auch die Wahl des Kanals kann zu verschiedenen Änderungen der Ergebnisse im Vergleich zur Planung führen.

Selbst feste statische Einflüsse wie Wände gehen mit verschiedenen Werten in die Berechnung ein und führen somit auch zu verschiedenen Ergebnissen. So geht beispielsweise die WLAN Planungssoftware *Psiber RF3D WifiPlanner*[Psi10] bei einer Ziegelwand von einer Dämpfung von 8dB bis 13dB bei einem 2,4GHz WLAN aus, während die Autoren von *802.11 Wireless Network Site Surveying and Installation*[Ale04] mit 4dB rechnen. Deutlich ist der enorme Unterschied zwischen den betrachteten Dämpfungen zu erkennen.

## 2.3 WICHTIGE GRÖSSEN

Bei den meisten Messungs- und Planungstools wird lediglich die Empfangsfeldstärke gemessen bzw. berechnet. Diese sagt allerdings nur bedingt etwas über die resultierende Signalqualität beim Empfänger aus. Denn von der Empfangsfeldstärke muss das Grundrauschen abgezogen werden.

Außerdem haben verschiedene WLAN-Empfänger auch verschiedene Empfangsempfindlichkeiten und Empfangseigenschaften. Allein hier zeigt sich schon der enorme Einfluss des verwendeten Empfangsgeräts - denn Ziel soll ja nicht ein guter Empfang für die verwendeten Messgeräte, sondern für die Anwender sein, die später das aufgebaute WLAN-Netz verwenden sollen.

Ein anderes Problem ist die automatische Herabsetzung der Zellgeschwindigkeit, sobald sich ein angemeldeter Nutzer im Randbereich einer Zelle befindet und nur noch mit verringerter Zellgeschwindigkeit Empfang hätte. Hier gilt die herabgesetzte Geschwindigkeit für alle Teilnehmer in der Zelle. So sind für WLAN nach dem Standard 802.11g die Geschwindigkeiten zwischen 1 und 54 Mbit/s mit verschiedenen Modulationsverfahren definiert [IEE03]. Ist nur ein Nutzer im Randbereich eines APs unterwegs, bricht die Geschwindigkeit für alle Nutzer also im schlimmsten Fall auf 1Mbit/s zusammen.

Als Maßeinheiten kommen in der Regel *dBm* bzw. *mW* und deren Äquivalente *dBW* bzw. *W* zum Einsatz [Mac10]. Die Umrechnung zwischen den logarithmischen Leistungspegeln und den Leistungsangaben erfolgt dabei nach folgender Vorgehensweise:

$$P_{dBm} = 10 \log(P_{mW}) \quad (2.1)$$

$$P_{mW} = 10^{\left(\frac{P_{dBm}}{10}\right)} \quad (2.2)$$

beziehungsweise entsprechend

$$P_{dBW} = 10 \log(P_W) \quad (2.3)$$

$$P_W = 10^{\left(\frac{P_{dBW}}{10}\right)} \quad (2.4)$$





## **3 STÖREINFLÜSSE**



Es gibt verschiedene Einflüsse, die sich auf ein geplantes WLAN auswirken. Hier kann man zwischen veränderlichen und festen Einflüssen unterscheiden. Typische veränderliche Einflüsse sind zum Beispiel durch den Raum laufende Menschen oder Mikrowellenherde, die nur unregelmäßig aktiv sind. Typische feste Einflüsse sind beispielsweise Schränke oder Regale mit Akten oder Büchern. Diese ändern sich in der Regel eher selten, werden aber bei der Planung normalerweise nicht berücksichtigt.

Die Frage lautet nun: wie intensiv wirken sich diese Einflüsse auf die Empfangsfeldstärke aus und welche Genauigkeit für die Berechnung eines WLANs ist in der Konsequenz sinnvoll.

### 3.1 TECHNIK UND AUFBAU BEI EIGENEN UNTERSUCHUNGEN

In den folgenden Abschnitten untersuche ich die verschiedenen Einflüsse jeweils zuerst theoretisch und daraufhin in einigen Fällen auch experimentell. Die Ergebnisse werte ich daraufhin entsprechend aus. Dafür nutze ich verschiedene Geräte. Als WLAN-AP kommt ein Router *T-Com Sinus 154 DSL Basic 3* zum Einsatz. Zum Messen des Empfangs nutze ich ein *Lenovo Thinkpad Edge 13*, welches eine *Intel WifiLink 1000 bgn* Netzwerkkarte nutzt. Der jeweilige Aufbau der Geräte ist dabei immer gleich. Als Software zum Messen der Empfangsstärke wird *InSSIDer 2*<sup>1</sup> eingesetzt.

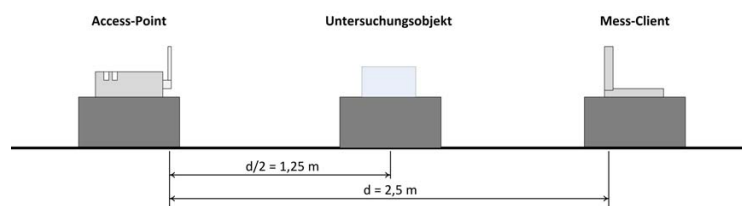


Abbildung 3.1: Allgemeiner Aufbau der Experimente

Ich werde experimentell nur die Einflüsse beim in Deutschland am weitesten verbreiteten Standard 802.11g mit Frequenzen um 2,4GHz ermitteln. Die Antenne des Routers ist wie in Abbildung (Abb.) 3.1 für alle Experimente senkrecht ausgerichtet (Details siehe Kapitel 3.5.1). Der Abstand zwischen Router und Notebook liegt bei 2,5 Meter. Auf dem Router wird der Kanal 13 verwendet. Für den Kanal 13 habe ich mich entschieden, da, wie in Abbildung 3.2 zu sehen, dort die wenigsten Überlagerungen mit anderen WLANs auftreten und dort somit am ehesten störungsarm getestet werden kann.

<sup>1</sup>Version: 2.0.7.0126 [Met11]

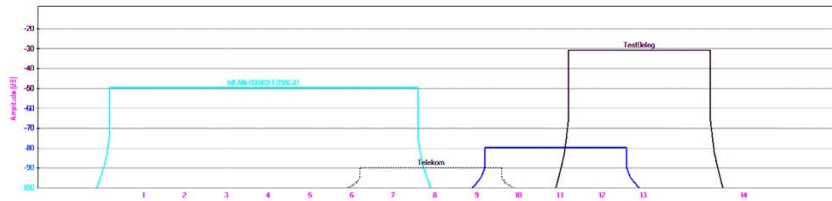


Abbildung 3.2: Kanalbelegung anderer WLANs während der Experimente (Bildquelle: inSSIDer 2)

## 3.2 PHYSIKALISCHE EFFEKTE

Neben den ab Kapitel 3.3 genannten Einflüssen auf die WLAN-Ausbreitung spielen auch physikalische Effekte eine Rolle. So wirken sich Reflektion (Abbildung 3.3(a)), Streuung (Abbildung 3.3(b)), Absorption (Abbildung 3.3(c)), Beugung und Mehrfachbeugung (Abbildung 3.3(d) und 3.3(e)) sowie Wellenführung (Abbildung 3.3(f)) auf das Ergebnis jeder realen Wellenausbreitung aus. Das Ziel der verschiedenen Modelle ist es nun möglichst nah an die realen, durch physikalische Effekte und Regeln erzeugten Abdeckungs-Ergebnisse, heranzukommen, ohne die dafür notwendigen aufwändigen Berechnungen durchzuführen.

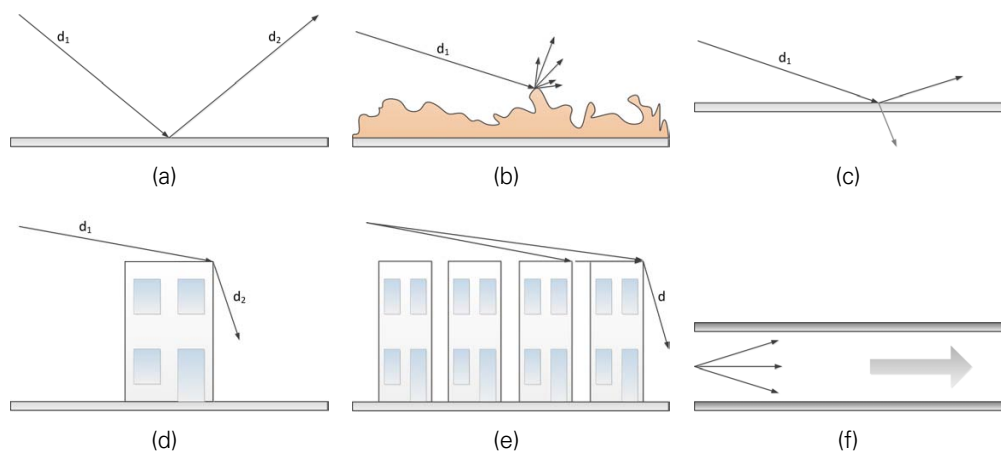


Abbildung 3.3: Physikalische Effekte bei der Wellenausbreitung

### 3.2.1 Dämpfung

Dämpfung ist der Energieverlust von elektromagnetischen Wellen bei deren Ausbreitung. Ursachen für Dämpfung können Hindernisse jeglicher Art sein, aber auch die Freiraumdämpfung (Kapitel 5.1.1), bei der bei größerer Entfernung zwischen Sender und Empfänger die Energie, die noch direkt beim Sender ankommt, immer weniger wird.

### 3.2.2 Reflexion, Streuung, Beugung und Absorption

Einen weiteren Einfluss auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen haben Reflexion, Streuung, Beugung und Absorption. Wenn dabei elektromagnetische Wellen auf ein Objekt treffen, werden sie zum Teil reflektiert und je nach Objektmaterial auch Teile der Energie der Welle absorbiert und nicht reflektiert.

An Kanten tritt auch Beugung auf. Hier wird die Welle in eine andere Richtung umgelenkt. Bei entsprechend groben Oberflächen kommt es damit zur Kombination von Beugung und Reflexionen und die Welle wird in alle Richtungen gestreut. Dabei entstehen im Zusammenhang mit Absorption viele neue Wellen, die sich mit jeweils weniger Energie in alle Richtungen ausbreiten.

### 3.2.3 Überlagerungen

Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen erfolgt, wie der Name bereits sagt, wellenförmig. Dabei kann es im Zusammenhang mit den genannten physikalischen Effekten zu Überlagerungen kommen. Diese können sich sowohl positiv als auch negativ auf die resultierende Welle auswirken. In Abbildung 3.4 kann man beispielhaft die Ausbreitung einer Welle direkt von Sender zu Empfänger und reflektiert sehen.

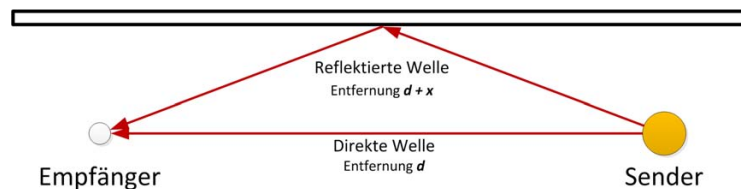


Abbildung 3.4: Überlagerung von Wellen durch Reflexion

Die Wellenlänge von WLAN 2,4GHz liegt bei circa 12,5 Zentimeter, bei WLAN 5GHz bei circa 6 Zentimeter. Sollte also beispielsweise die Entfernung zwischen Sender und Empfänger direkt  $d = 200$  Zentimeter betragen (rot) und sich Sender und Empfänger jeweils 36 Zentimeter von der Wand, an der die Welle reflektiert wird, weg befinden, so wäre die Entfernung der reflektierten Welle  $d + x = 212,5$  Zentimeter (grün), also genau eine Wellenlänge mehr (bei WLAN 2,4GHz). Das resultierende Ergebnis wäre eine verstärkte Welle (blau) wie in Abbildung 3.5(a).

Betrüge die Entfernung zur Wand nur 18 Zentimeter, entspräche die resultierende Verschiebung lediglich einer halben Wellenlänge. Die Wellen löschen sich, wie in Abbildung 3.5(b) zu sehen ist, aus.

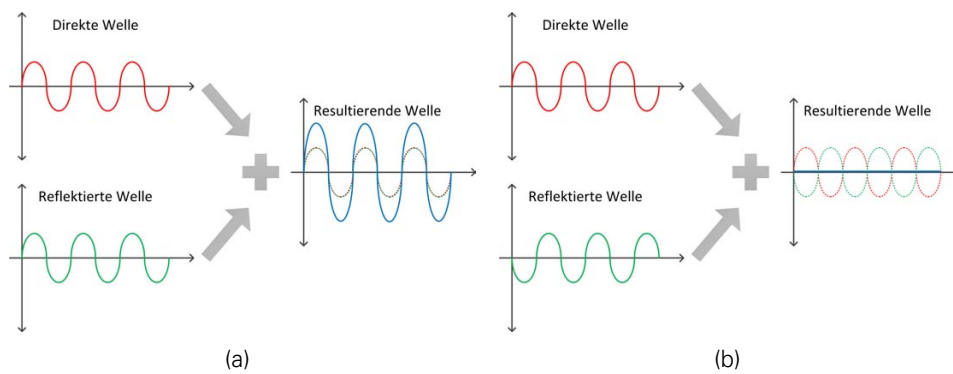


Abbildung 3.5: Wellenüberlagerung im guten und im schlechten Fall

### 3.3 FESTE EINFLÜSSE

Typische feste Einflüsse in einem WLAN werden bereits teilweise von vorhandenen Planungstools betrachtet und deren Einfluss mit eingerechnet. Dazu sind grundlegende Elemente wie Stahlbeton- oder Gipskartonwände zu zählen, Türen, Fenster und andere durch die Bausubstanz bestimmte feste Einflüsse.

Auf der anderen Seite gibt es allerdings auch feste Einflüsse auf ein WLAN, die zwar meist relativ lange vorhanden sind, allerdings bei der Planung oft nicht berücksichtigt werden, da beim Bau von Gebäuden deren Ausstattung noch nicht vollständig geplant ist oder diese sich während der Gebäudenutzungsdauer ändern kann. Typische Einflüsse auf diesem Gebiet sind beispielsweise die Möblierung von Räumen, aber auch die in Schränken gelagerten Dinge.

#### 3.3.1 Bausubstanz

Bei der grundlegenden Bausubstanz des Gebäudes gibt es verschiedene Einflüsse. Alle Einflüsse in diesem Bereich sind dabei in der Regel fest vorgegeben und werden während des Betriebs eines WLAN nicht mehr geändert. Beispielsweise seien hier die Wände (zum Beispiel aus Stahlbeton, Ziegel, Holz oder anderen Materialien), Fenster und Türen (zum Beispiel aus Glas mit oder ohne Beschichtung beziehungsweise Fensterrahmen aus Aluminium, Kunststoff, Holz oder anderen Materialien) und feste Ausstattungen (zum Beispiel Treppen aus Stahl, Sanitäreinrichtungen und anderes) genannt.

In der Regel wird hier auf bekannte Dämpfungen für die verschiedenen Teile und Materialien des Gebäudes zurückgegriffen, welche beispielsweise experimentell ermittelt wurden. Da es hier immer wieder zu Schwankungen kommt (zum Beispiel

	<b>2,4GHz</b>	<b>5GHz</b>
<b>WLAN-Standard</b>	802.11b	802.11a
	802.11g	802.11n
	802.11n	
Massive Holztür	6dBi	10dBi
Bürotür	4dBi	6dBi
Stahl-Feuerschutztür, 6cm	19dBi	32dBi
Ziegelwand, 9cm	6dBi	10dBi
Stahlbeton, 45cm	18dBi	30dBi
Stahlbeton, 70cm	45dBi	53dBi
Gipskartonwand, 10cm	3dBi	5dBi
Glastrennwand, 1,5cm	8dBi	12dBi
Einfach verglastes Fenster, 1,5cm	6dBi	7dBi

Tabelle 3.1: Vergleich der Dämpfungen der Baustruktur auf 5GHz und 2,4GHz WLAN[3Co05]

je nach verwendeter Stahlmenge in Stahlbeton), sollten die Erfahrungswerte nach Fertigstellung des Rohbaus eines Gebäudes für die Wände experimentell geprüft werden, um die Fehlereinflüsse im Bereich der Bausubstanz zu verringern.

In Tabelle 3.1 [3Co05] kann man die von 3Com ermittelten Dämpfungswerte für unterschiedliche Baustoffe sehen. Diese oder ähnliche Werte dienen auch in den bekannten Planungstools als Richtwert. Dennoch empfiehlt sich immer eine nachträgliche Anpassung der Dämpfungswerte nach entsprechenden Messungen.

### **3.3.2 Ausstattung**

Die Gebäudeausstattung hat in unterschiedlichem Umfang Einfluss auf die Empfangsfeldstärke. So dämpfen Schränke und Regale - mit oder ohne Inhalt - unterschiedlich das Signal. Auch Pflanzen, Schreibtische und andere Ausstattungen haben Auswirkungen auf die Empfangsfeldstärke.

Problematisch dabei ist, dass es kaum möglich ist, die Ausstattung im kompletten Umfang zu planen. Gerade Schrankinhalte sind meist über die Dauer der Verwendung eines WLANs unterschiedlich und abhängig von den Mitarbeitern beziehungsweise von den Nutzern.

### **Praktischer Einfluss**

Praktisch habe ich den Einfluss eines Regals (28 Millimeter Spanplatte) leer und mit Ordnern gefüllt untersucht. In den Ordnern befanden sich dabei A4-Papier mit

Studienaufzeichnungen. Der technische Aufbau ist wie in Kapitel 3.1 beschrieben, das Regal wurde zwischen Sender und Empfänger aufgebaut.

In Abbildung 3.6 sieht man die Ergebnisse der Messung. Der Einfluss des leeren Regals beziehungsweise des mit Ordnern gefüllten Regals auf die Empfangsfeldstärke ist deutlich zu erkennen. Im Durchschnitt beträgt die Empfangsfeldstärke der Grundlinie -32,8dB, des leeren Regals -36,6dB und des mit Ordnern gefüllten Regals -39,9dB. Die Differenz zwischen der Grundlinie (also keinem Regal) und vollem Regal beträgt damit über 7dB. Die Differenz zwischen leeren und vollem Regal beträgt 3dB und hat somit einen relativ großen Einfluss.

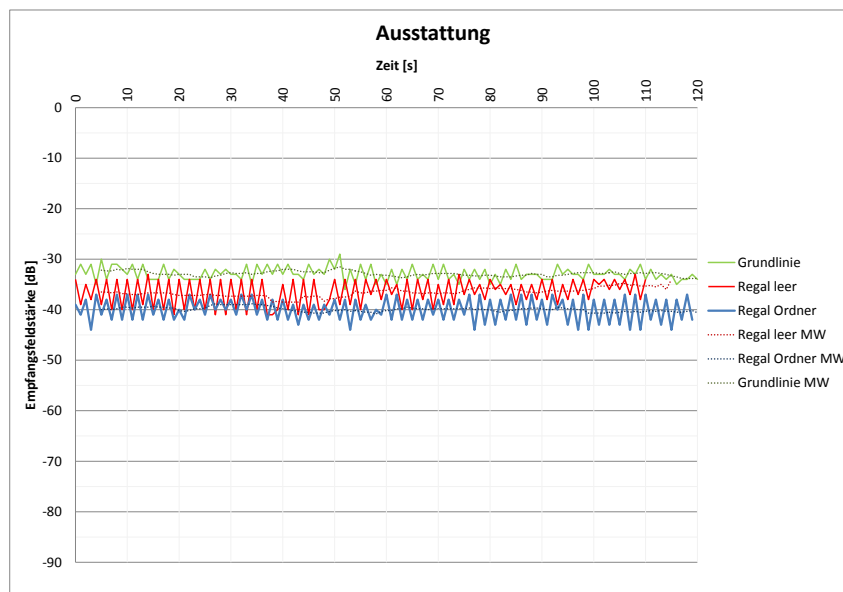


Abbildung 3.6: Empfangsfeldstärke: Grundlinie, leeres Regal und Regal mit Ordnern

Da es kaum möglich ist, den Inhalt von Schränken und Regalen zu planen, bietet es sich hier an, bei der Berechnung der WLAN-Abdeckung einen raumtypischen Aufschlag hinzuzurechnen.

### 3.4 VERÄNDERLICHE EINFLÜSSE

Auch sehr viele veränderliche Einflüsse wirken auf ein WLAN ein - diese werden allerdings in keiner aktuellen Planungssoftware berücksichtigt. Ein ganz einfaches Beispiel ist hier der Mensch - sein Einfluss auf ein bestehendes WLAN kann erheblich sein und es ist kaum planbar, wann dieser sich wo befindet. Er bewegt sich frei durch die Gebäudestruktur. Aber auch andere Einflüsse spielen hier eine Rolle. Bei den typischen 2,4GHz WLANs kann beispielsweise eine Mikrowelle, die



ihre Speisen bei einer Frequenz von 2,45GHz erwärmt [KE97], einen erheblichen Einfluss im Betrieb haben. Auch Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)-Telefone können in Erweiterungsbändern in 2.4GHz funken.

### 3.4.1 Menschen

Menschen wirken sich kaum planbar auf die WLAN-Abdeckung aus. Das Problem hier besteht vor allem darin, dass es kaum vorhersehbar ist, wo sich Menschen in einem Gebäude befinden. Dennoch ist der Einfluss von Menschen auf ein WLAN, wie in folgenden Abschnitten zu sehen, teilweise sehr hoch. Je nach Gebäudetyp ist der Einfluss von Menschen auf das geplante Gebäude groß oder auch nicht vorhanden. Hier ist eine vorhergehende Analyse der Gebäudeart wichtig, um eine realistische Genauigkeit zu ermitteln und einzustellen.

#### Theoretischer Einfluss

Je nach Gebäudeart ist es unterschiedlich wichtig den Einfluss von Menschen zu auf die Planung zu betrachten. Bei der Platzierung des APs spielt es eine entscheidende Rolle, wie viele Menschen das WLAN Signal stören können, also inwiefern Menschen überhaupt die Möglichkeit haben sich zwischen AP und Empfangsgerät zu positionieren. Außerdem spielt natürlich auch die Menge der vorhandenen Menschen und deren möglicher Einfluss auf das WLAN eine Rolle, also die Anzahl der Störungen verursachenden Personen wenn es zu Störungen durch Menschen kommen kann.

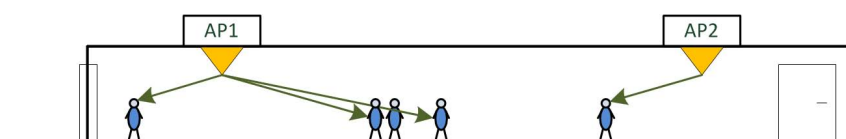


Abbildung 3.7: Möglicher Einfluss von Menschen auf WLAN in einem flachen Büroraum

In Abbildung 3.7 kann man die durch Menschen verursachten Probleme bei der WLAN-Ausbreitung erkennen. Durch die relativ flache Aufhängung der APs im Raum kann es bei der Verbindung zwischen Endgerät und AP zur Abschwächung des Signals durch eine oder mehrere Personen kommen. Hier muss also bei der Planung konkret betrachtet werden, wo sich die APs befinden und wie stark die abzudeckende Fläche von Menschen genutzt wird.

Dies ist automatisch allerdings kaum möglich, weshalb es wichtig ist, dass die Planung durch einen Experten ausgeführt wird und dieser dann bei der Platzierung der APs und bei der Angabe der Genauigkeit auf die jeweilige Situation achtet. Es bietet sich an, dass in Planungstools Räume je nach Nutzungsbedarf deklariert werden können und je nach Raumnutzung eine entsprechende Dämpfung aufgeschlagen wird bzw. die Berechnungsgenauigkeit entsprechen automatisch auf ein sinnvolles Niveau korrigiert wird.

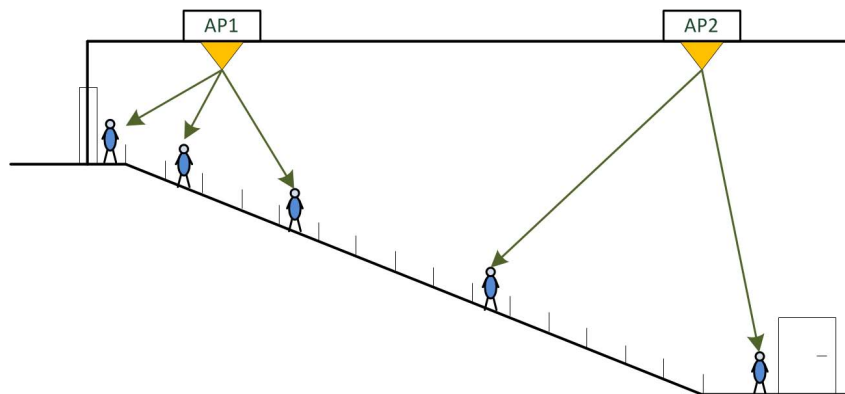


Abbildung 3.8: Möglicher Einfluss von Menschen auf WLAN in einem hohen Hörsaal

In einem Hörsaal, wie in Abbildung 3.8 zu sehen, kann die Situation hingegen wieder komplett anders aussehen. Durch die hohe Anbringung der APs im Raum kann die WLAN-Strahlung direkt und ungehindert zum Endgerät gelangen. Ein Einfluss von Menschen auf die WLAN-Planung kann in diesem Szenario fast komplett ausgeschlossen werden.

An diesen Beispielen zeigt sich, wie wichtig die Planung durch einen Experten bzw. einen Nutzer mit Erfahrung ist. Je nach Gebäude- und Gebrauchssituation müssen unterschiedliche Entscheidungen getroffen werden und die Planung muss bezüglich des Einflusses von Menschen unterschiedlich ausgeführt werden.

### **Praktischer Einfluss**

Den Einfluss von Menschen auf die Empfangsleistung habe ich praktisch untersucht. Dafür gilt wieder der im Kapitel 3.1 beschriebene Versuchsaufbau. In der ersten Bedingung stand eine Person (Größe: 1,70m, Gewicht: 70kg) genau zwischen AP und Empfangsgerät, in der zweiten Bedingung bewegte sich eine Person (Größe: 1,70m, Gewicht: 70kg) frei im Raum, zwischen AP und Empfangsgerät.

In Abbildung 3.9 sieht man eine Basisempfangsfeldstärke ohne Fremdeinflüsse (grün) und die Empfangsfeldstärke, wenn sich eine Person (Größe: 1,70m, Gewicht:

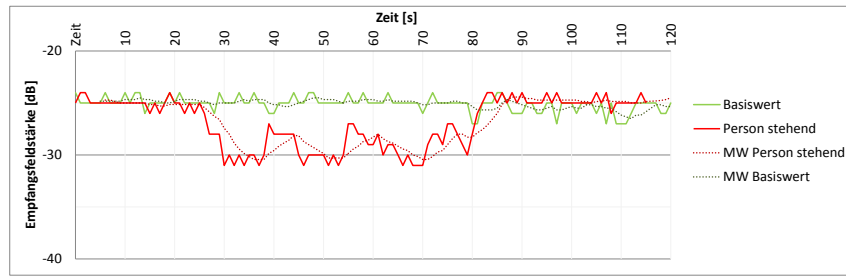


Abbildung 3.9: Empfangsfeldstärke: Person stehend zwischen AP und Empfangsgerät

70kg) zwischen AP und Empfangsgerät befindet (rot, aktiv circa von Sekunde 30 bis Sekunde 80). Der Mittelwert ist jeweils ein gleitender Mittelwert aus 6 Werten. Es ist deutlich ein großer Einfluss auf die Empfangsfeldstärke zu erkennen, im Durchschnitt schwankend zwischen 3dB und 6dB. Dieser Einfluss addiert sich im praktischen Betrieb bei mehreren Personen natürlich auf, ist allerdings nicht so groß, wenn die Personen nicht direkt in der Sichtverbindung stehen.

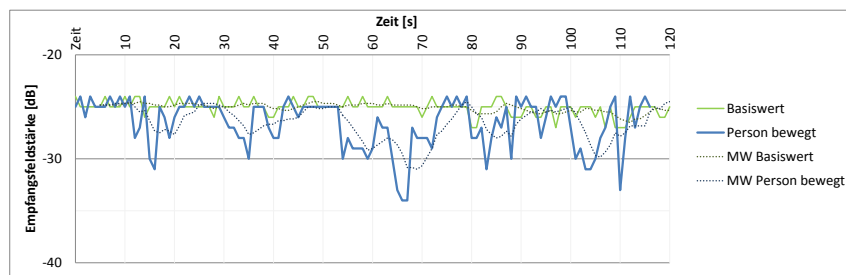


Abbildung 3.10: Empfangsfeldstärke: Person bewegt sich zwischen AP und Empfangsgerät

In Abbildung 3.9 sieht man eine Basisempfangsfeldstärke ohne Fremdeinflüsse (grün) und die Empfangsfeldstärke wenn sich eine Person (Größe: 1,70m, Gewicht: 70kg) zwischen AP und Empfangsgerät bewegt (blau, aktiv ca. von Sekunde 10 bis Sekunde 110). Der Mittelwert ist jeweils ein gleitender Mittelwert aus 6 Werten. Auch hier ist deutlich ein teilweise relativ großer Einfluss von bis zu 6dB auf die Empfangsfeldstärke zu erkennen. Im Durchschnitt ist dieser zwar geringer als bei stehenden Menschen, dennoch erreicht er in der Spitze genau den Wert, der gemessen wurde, wenn sich eine Person zwischen AP und Empfangsgerät befindet. Auch hier gilt, dass sich der Einfluss im praktischen Betrieb bei vielen Personen auf addiert. Auch hier ist der Einfluss allerdings nicht so groß, wenn sich die Personen nicht direkt in der Sichtverbindung befinden, wie an dem schwankenden Einfluss in der Abbildung zu erkennen ist.

Als Fazit kann man festhalten, dass gerade Personen einen relativ hohen Einfluss auf die Empfangsfeldstärke haben und es somit schwer zu sagen ist, wie die prakti-

sche resultierende Empfangsfeldstärke in geplanten Gebäuden mit vielen Personen sein wird. Sofern die geplanten Räume hingegen hoch genug sind, so dass sich zwischen AP und Empfangsgerät keine Personen in direkter Sichtverbindung beziehungsweise der Fresnelzone befinden, ist dieser Einfluss wieder vernachlässigbar. Allerdings ist dies in praktisch relevanten Bürogebäuden in der Regel nicht der Fall.

### 3.4.2 Technische Fremdeinflüsse

Als technische Einflüsse gelten vor allem Geräte, die Strahlung in den gleichen Frequenzen wie WLAN ausstrahlen. Bei verbreiteten 802.11g sind dies also Geräte, die im Frequenzbereich um 2,4GHz funktionieren. Da dieses Frequenzband in vielen Ländern zulassungsfrei ist, nutzen relativ viele Geräte diese Frequenz. Typische Störer in diesem Frequenzbereich sind, wie in Tabelle 3.2 aufgezeigt, Mikrowellen, DECT-Telefone, Bluetooth und viele frei verkäufliche Funkssysteme.

	<b>802.11b/g/n</b>	<b>Mikrowelle</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>dann würdestr</b>
<b>Standard durch</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)		Special Interest Group (SIG)	European Telecommunications Standards Institute (ETSI)
<b>Frequenzbereich</b>	2400-2483.5MHz 802.11n optional: 5GHz	2450MHz	2402-2480MHz	1880-1900MHz Erweiterungsband 2400-2480MHz

Tabelle 3.2: Vergleich verwendeter Frequenzen

Besonders interessiert also das durch diese Technik verursachte Rauschen ist also im speziellen von Interesse. Problematisch dabei ist, dass verschiedene Geräte nur zeitweise genutzt werden und somit nur zeitweise ein höheres Rauschen verursachen - beispielsweise läuft eine Mikrowelle nur zum Wärmen der Speisen und hat sonst keinen Einfluss. Damit fallen diese Geräte unter den Bereich der veränderlichen Einflüsse.

### Theoretischer Einfluss

Im Folgenden werden die theoretischen Einflüsse von verschiedenen Techniken im Frequenzbereich von WLAN-Geräten dargestellt.

Bluetooth arbeitet im Frequenzbereich zwischen 2,4GHz und 2,4835GHz. In diesem Bereich funken Bluetooth-Geräte in drei verschiedenen Klassen [Blu11], dabei muss bei Klasse 1 immer eine automatische Leistungsanpassung implementiert sein. Durch diese im Durchschnitt also geringe Sendeleistung ist der Einfluss von Bluetooth auf WLAN schon als verhältnismäßig gering einzustufen:

- Klasse 1 mit 100mW (20dBm)
- Klasse 2 mit 2,5mW (4dBm)
- Klasse 3 mit 1mW (0dBm)

Der theoretische Einfluss wurde von verschiedenen Autoren in der Vergangenheit bereits untersucht ([CDPA03, CR02, Zyr99, LSN01]). Dabei wurde zum einen festgestellt, dass die meisten Bluetooth-Geräte nur mit 1mW senden, es aber bei Erhöhung der Sendeleistung auf 10mW die Wahrscheinlichkeit des Paketverlusts bei WLAN um 50% steigt ([GVDS<sup>+</sup>03]). Dabei liegt die Paketverlustrate bei 1mW Bluetooth-Sendeleistung bei WLAN bei ca. 9% bei einer Bluetooth-Auslastung von 60%.

Im Speziellen wurde auch festgestellt, dass die WLAN-Verlustrate höher ist, je mehr Bluetooth-Verbindungen bestehen und je stärker diese ausgelastet sind. Bei einfachen Verbindungen, wie durch eine Bluetooth-Maus, bei der nur wenige Daten übertragen werden, ist der Verlust gering bis gar nicht vorhanden, in einem anderen geprüften Szenario (1 AP und 1 Empfangsgerät, 10 voll ausgelastete Bluetooth-Verbindungen) kam es hingegen zum kompletten Paketverlust bei WLAN.

Die Ergebnisse zeigen, dass es extrem schwierig ist, den Einfluss von Bluetooth auf WLAN zu planen. Sofern viele Bluetooth-Audio-Verbindungen genutzt werden sollen, kann damit gerechnet werden, dass fast kein WLAN-Empfang mehr möglich ist. Dieses Problem lässt sich nur durch die Verwendung von 5GHz WLAN-Netzen beheben. Hier tun sich allerdings unter Umständen neue Probleme auf, denn noch immer funktionieren die meisten von Endanwendern genutzten Endgeräte nur im 2,4GHz-Bereich und eine Nachrüstung von Endgeräten ist nur zum Teil möglich.

Der Einfluss von schnurlosen DECT-Telefonen kann vollkommen außer acht gelassen werden. Zwar spezifiziert ETSI Erweiterungsbänder im Industrial, Scientific and Medical Band (ISM)-Frequenzbereich, es gibt allerdings derzeit fast keine Geräte, welche diese Erweiterungsbänder nutzen. Damit kann ein Einfluss von DECT auf WLAN ausgeschlossen werden, denn DECT funkt nur im Bereich um 1,9GHz.

Mikrowellen hingegen funken im Frequenzbereich von 2,4GHz und haben direkten Einfluss auf ein WLAN. In [KE97] wurde genau dieser Einfluss auf 2,4GHz WLANs untersucht. Es wurde festgestellt, dass bei der Verwendung einer Mikrowelle das WLAN-Signal fast komplett zusammenbricht oder zumindest auf Geschwindigkeiten von weit unter 1MBit/s herabfällt ([PPK+03]). Vermieden werden kann dieser Einfluss kaum, durch die intensiven Auswirkungen auf das WLAN sollte der Einfluss von Mikrowellen bei der Planung zwar in Form der Platzierung der APs beachtet werden, vermeiden kann man diesen Einfluss aber kaum. Die einzige Möglichkeit die Probleme hier zu umgehen besteht wie bei Bluetooth auch in der Verwendung von WLAN im 5GHz Bereich.

### Praktischer Einfluss

Am Beispiel von Bluetooth habe ich praktisch ermittelt, wie groß der Einfluss tatsächlich ist. Dafür gilt wieder der im Kapitel 3.1 beschriebene Versuchsaufbau. Verwendet wurde zum einen eine Bluetooth-Maus im laufenden Betrieb (Microsoft Bluetooth Notebook Maus 5000) am Notebook und zum anderen ein Stereo-Bluetooth Headset mit einer laufenden Advanced Audio Distribution Profile (A2DP)-Verbindung (Sony DR-BT20NX).

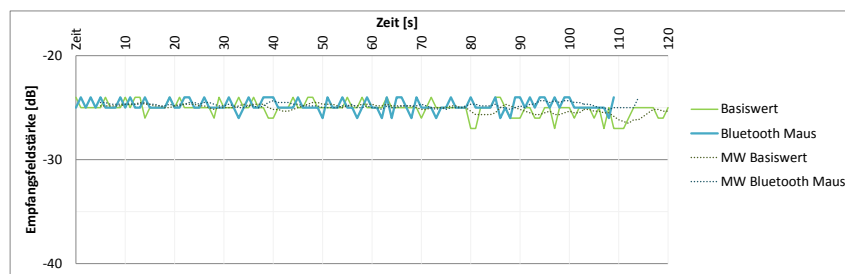


Abbildung 3.11: Empfangsfeldstärke: Bluetooth Maus

In Abbildung 3.11 sieht man eine Basisempfangsfeldstärke ohne Fremdeinflüsse (grün) und die Empfangsfeldstärke bei Verwendung einer Bluetooth-Maus (blau, aktiv circa von Sekunde 30 bis Sekunde 80). Der MW-Wert ist jeweils ein gleitender Mittelwert aus 6 Werten. Es ist nicht zu erkennen, dass die Bluetooth-Maus bei Verwendung am Notebook einen signifikanten Einfluss auf die Empfangsfeldstärke hat.

In Abbildung 3.12 sieht man eine Basisempfangsfeldstärke ohne Fremdeinflüsse (grün) und die Empfangsfeldstärke bei Verwendung eines Bluetooth-Headsets (dunkelrot, aktiv circa von Sekunde 30 bis Sekunde 80). Der MW-Wert ist jeweils ein gleitender Mittelwert aus 6 Werten. Hier ist ein Einbruch in der Empfangsfeldstärke

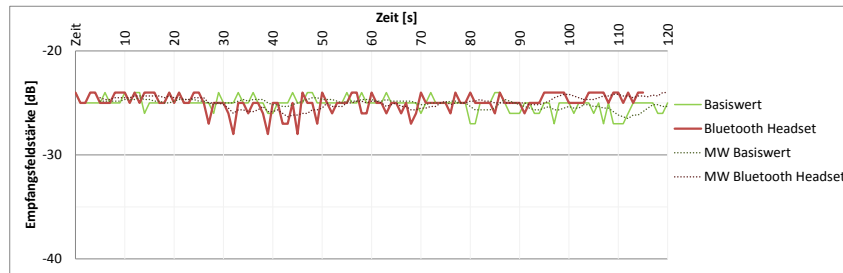


Abbildung 3.12: Empfangsfeldstärke: Bluetooth Headset

zu erkennen, allerdings ist dieser im Durchschnitt minimal und liegt bei nur 1dB bis 1,5dB.

Leider ist mit freier Technik nicht zu ermitteln, wie sich die Verwendung von Bluetooth auf das Rauschen auswirkt. Hierfür sind teure Messinstrumente nötig, die mir leider nicht zur Verfügung stehen. Dieser Einfluss wäre allerdings bei Technik, die auf den selben Frequenzen wie 2,4GHz WLAN funken, von besonderem Interesse, da nicht die Empfangsfeldstärke sondern der Rauschabstand entscheidend für die praktischen Empfangsleistungen sind.

Letztlich kann dennoch gesagt werden, dass die Verwendung von Bluetooth keinen relevanten Einfluss auf die Empfangsfeldstärke hat und somit bei Berechnung derer nicht zwingend beachtet werden muss.

### 3.4.3 Technische Eigeneinflüsse

Da WLAN-Netze in der Regel allgemein für verschiedene Endgeräte geplant werden, spielt auch der Einfluss der verwendeten Endgeräte eine entscheidende Rolle. Hier muss man schon bei der Planung bedenken, welche Endgeräte zum Einsatz kommen werden und inwiefern sich deren Empfangsverhalten unterscheidet. Gerade ältere oder günstige Empfangsgeräte brauchen eine deutlich höhere Empfangsfeldstärke als moderne bzw. hochwertige Technik.

#### Theoretischer Einfluss

Bei der Verwendung verschiedener Endgeräte kommt es aus mehreren Gründen zu unterschiedlichen Empfangseigenschaften. Dabei spielt die Ausrichtung des Gerätes eine Rolle (und dementsprechend die Ausrichtung der Antenne, siehe Kapitel 3.5.1), aber auch die Beschaffenheit und die Verstärkung der verwendeten Antenne. Auch die Empfindlichkeit der verwendeten WLAN-Chipsätze trägt, wie in Tabelle

	<b>SMC</b> SMCWUSB-G [SMC10]	<b>Linksys</b> WUSB54GC [Cis10]	<b>TP-Link</b> TL-WN321G [TP-10]
<b>802.11b 11Mbps</b>	-82dBm	-87dBm	-85dBm
<b>802.11g 54Mbps</b>	-65dBm	-71dBm	-68dBm

Tabelle 3.3: Vergleich der Empfangsempfindlichkeit verschiedener USB WLAN-Adapter

3.3 zu sehen, zu unterschiedlichen Empfangsqualitäten bei. Speziell bei kompakten mobilen WLAN-Endgeräten (beispielsweise Smartphones, MPEG Audio Layer III (MP3)-Player, Tablet-PCs) ist außerdem von Relevanz, wie diese vom Anwender gehalten werden - bei ungünstiger Lage der Hände des Anwenders auf dem Gerät kann die WLAN-Antenne abgedeckt werden und der Empfang wird entsprechend zusätzlich gedämpft.

Hier eine sinnvolle Genauigkeit abzuleiten ist sehr schwierig. Wie ich im Folgenden praktisch zeige, ist der Empfangs-Unterschied zwischen verschiedenen üblichen Geräten enorm. Hier kann der Planer wieder nur auf Basis seiner Erfahrung und des Wissens, welche Endgeräte verwendet werden sollen entscheiden, wie stark die Mindest-Abdeckung sein muss.

### **Praktischer Einfluss**

Im Folgenden werde ich einige Empfangsgeräte praktisch vergleichen, um herauszufinden, welche Differenzen in den Empfangsfeldstärken der unterschiedlichen Geräte bestehen. Der Aufbau der Versuchsanordnung ist wie im Kapitel 3.1 beschrieben. Als Empfangsgeräte kommen ein *Lenovo Thinkpad Edge 13 Intel* (Chipsatz: Intel WifiLink 1000bgn [Len11]), ein Smartphone *HTC Touch Pro* (Windows Mobile 6.1, Chipsatz: Qualcomm MSM7201A [PDA11]) und ein Universal Serial Bus (USB) WLAN-Stick *Zyxel G-220 v.2* (Chipsatz: ZyDAS ZD1211B + Airoha2230S [ZyX11]) zum Einsatz.

In Abbildung 3.13 sieht man die experimentell ermittelten Ergebnisse für die drei aufgeführten Geräte. Diese befanden sich jeweils an der gleichen Position. Als größter Fehlereinfluss kann hier also vor allem die Antennenausrichtung gelten. Da die Unterschiede zwischen den verschiedenen Geräten aber wesentlich größer sind als durch unterschiedliche Antennenausrichtungen ausgelöste Differenzen (siehe auch Kapitel 3.5.1), zeigt sich deutlich, welcher großen Einfluss die Wahl des Endgerätes hat.



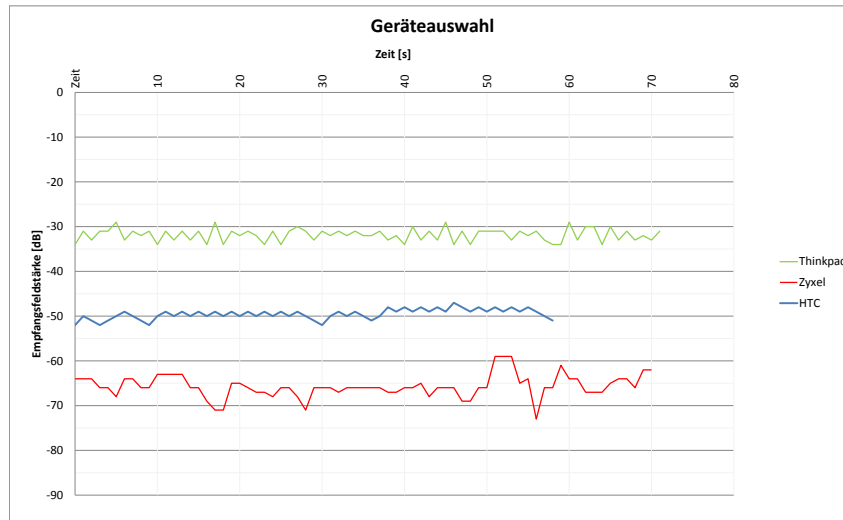


Abbildung 3.13: Empfangsfeldstärke in Abhängigkeit von der Geräteauswahl

Die Differenzen zwischen den verschiedenen Geräten belaufen sich bei den drei gewählten Geräten also bereits auf teilweise über 40dB. Diese enormen Unterschiede müssen bei der Planung unbedingt beachtet werden, zeigen aber auch, dass eine sehr hohe Genauigkeit bei der Planung für ein reales Netz mit vorher nicht bekannten Endgeräten nicht sinnvoll ist. Wenn die Endgeräte hingegen bekannt sind (beispielsweise bei Planung einer Lagerhalle, in der nur WLAN-Handscanner zur Warensortierung zum Einsatz kommen), sollte vorher unbedingt die Empfangsqualität des Geräts geprüft werden und die Planung des WLANs entsprechend angepasst werden.

## 3.5 FUNKTIONALE EINFLÜSSE

Zum Schluss gibt es noch die funktionalen Einflüsse, die auf ein WLAN einwirken. Beispielhaft dafür zu nennen ist die Antennenausrichtung oder die Kanalwahl. Deren Einfluss wird in manchen modernen Planungstools allerdings bereits betrachtet und bei der Berechnung der Abdeckung mit einbezogen. Dennoch stellt sich die Frage, wie intensiv die Einflüsse hier sind.

### 3.5.1 Antennenausrichtung

Die Ausrichtung der Antenne spielt bei der Abdeckung und der Empfangsfeldstärke eine entscheidende Rolle. Einen direkten Einfluss hat die Polarisation der Antenne. Sollte die Polarisation von Empfangs- und Sendegerät nicht übereinstimmen, kann

es schon hier bis zu einem kompletten Signalverlust kommen, bei der Kombination von zirkular polarisierten Antennen und linear polarisierten Antennen ist der Verlust aber auf maximal 3dB beschränkt [Kar06]. Aber auch andere Einflüsse spielen eine wesentliche Rolle, so ist die Richtcharakteristik einer Antenne ausschlaggebend dafür, in welche Richtung das Signal am meisten Gewinn aufweist.

### Theoretischer Einfluss

Der rein theoretische Einfluss der Antennenausrichtung spiegelt sich vor allem in deren Polarisation wieder. So ist eine horizontal polarisierte Antenne durch Drehung um 90 Grad plötzlich vertikal polarisiert - die Empfangsbedingungen sind dadurch massiv verändert. Außerdem können Antennen auch zirkulär polarisiert sein, dass heißt, das ausgesendete elektrische Feld bewegt sich rechts- bzw. linksdrehend um die Ausstrahlachse. Natürlich sind auch jegliche Variationen möglich.

	<b>horizontal</b>	<b>vertikal</b>	<b>rechtsdrehend</b>	<b>linksdrehend</b>
<b>horizontal</b>	kein Verlust	kein Empfang	3 dB	3 dB
<b>vertikal</b>	kein Empfang	kein Verlust	3 dB	3 dB
<b>rechtsdrehend</b>	3 dB	3 dB	kein Verlust	kein Empfang
<b>linksdrehend</b>	3 dB	3 dB	kein Empfang	kein Verlust

Tabelle 3.4: Empfangsverlust in Abhängigkeit der Antennenausrichtung [Mac10]

Entsprechend gelten verschiedene Verluste, je nach verwendeter Polarisation [Mac10]. In Tabelle 3.4 sieht man die theoretischen Verluste zwischen verschiedenen Polarisationen, es kommt hier also im schlimmsten Fall zum kompletten Verlust des Signals, wenn die Sendeantenne horizontal und die Empfangsantenne vertikal polarisiert sind.

An einem Beispiel gezeigt bedeutet das zwischen einer vertikalen Sendeantenne und einer rechtsdrehenden Empfangsantenne also einen Verlust von 3dB:

$$\begin{aligned}
 P_{mW_{Sender}} &= 1000mW \\
 P_{dBm_{Sender}} &= 10 \log (P_{mW_{Sender}}) \\
 P_{dBm_{Sender}} &= 10 \log (1000mW) \\
 P_{dBm_{Sender}} &= 30dBm
 \end{aligned}$$

$$P_{dBm_{Empf}} = P_{dBm_{Sender}} - \text{Verlust}$$

$$P_{dBm_{Empf}} = 30dBm - 3dB$$

$$P_{dBm_{Empf}} = 27dBm$$

$$P_{mW_{Empf}} = 10^{\left(\frac{P_{dBm_{Empf}}}{10}\right)}$$

$$P_{mW_{Empf}} = 10^{\left(\frac{27dBm}{10}\right)}$$

$$P_{mW_{Empf}} = 501mW$$

Man sieht hier die Auswirkung von 3dB Verlust. Die Leistung beim Empfänger ist nun nur noch halb so groß wie beim Sender. Dabei wurde lediglich der Verlust durch die Polarisation der Antenne betrachtet, weitere Einflüsse sind in dieser Rechnung vollkommen außer acht gelassen.

Und genau dieser beschriebene Effekt tritt nun je nach Ausrichtung der Antenne auf, denn je nach Antennenausrichtung passen die Polarisierungen am Ende nicht mehr richtig und es kommt so zu Verlusten. Gerade bei mobilen Endgeräten, deren Antennenlage sich ständig ändert, ist dieser Einfluss entsprechend groß und kann somit direkt in die Berechnung der Genauigkeit als dynamischer Einfluss einbezogen werden. Natürlich spielen hier auch noch andere Faktoren eine Rolle, speziell die Richtcharakteristik der verwendeten Antenne. Sie gibt an, in welcher Richtung die Antenne den meisten Gewinn hat. Eine Änderung der Antennenausrichtung hat also auch hier direkten Einfluss auf die Empfangsbedingungen.

### **Praktischer Einfluss**

Um den Einfluss praktisch zu untersuchen, habe ich drei verschiedenen Antennenausrichtungen gewählt, da der für die Versuche verwendete AP eine Stabantenne hat. Die Ausrichtung der Empfangsantennen waren dabei immer gleich.

In Abbildung 3.14 sind die verschiedenen von mir verwendeten Antennenausrichtungen zu sehen. Zum einen senkrecht, hier ist die Antenne des Access-Points senkrecht nach oben gerichtet, zum zweiten lotrecht - hier ist die Antenne lotrecht vom Empfangsgerät weggerichtet. Und als letztes waagerecht, hier ist die Antenne parallel zum Empfangsgerät ausgerichtet.

Die Ergebnisse des Versuchs sieht man in Abbildung 3.15. Deutlich ist erkennbar, dass die Ausrichtung der Antenne einen Einfluss von bis zu 7dB Unterschied im gewählten Szenario haben kann. Es zeigt sich der deutlich beste Empfang bei

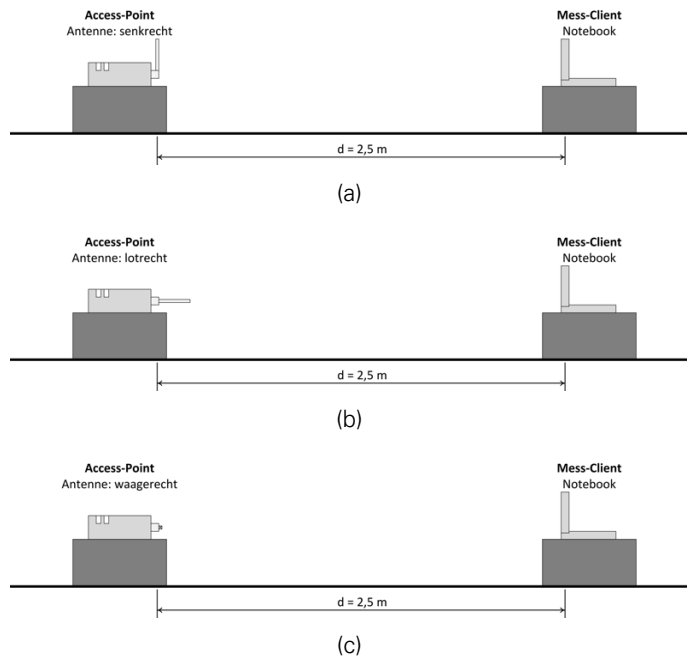


Abbildung 3.14: Antennenausrichtungen, die im praktischen Vergleich verwendet wurden

senkrechter Antennenausrichtung mit einer Empfangsfeldstärke von im Schnitt -30,9dB. Bei waagerechter bzw. lotrechter Antennenausrichtung liegt die Empfangsfeldstärke hingegen bei nur -37,8dB bzw. -36,2dB.

Aus diesen wesentlichen Unterschieden kann man direkt schlussfolgern, dass die Simulation ohne Betrachtung der verwendeten Antennen und deren Ausrichtung eher zweifelhaft ist. Hier reicht entsprechend eine Genauigkeit von circa 6dB, da der Einfluss der Ausrichtung bei höherer Genauigkeit im Verhältnis einfach zu groß ist, als dass es sich lohnt, hier genauer zu rechnen.

### 3.5.2 Kanalwahl

Auch die Wahl des Kanals spielt bei WLAN eine große Rolle. Bei 802.11g gibt es je nach Region 11 bis 14 Kanäle - davon sind, wie in Abbildung 3.16 zu sehen, lediglich drei überschneidungsfreie Kanäle. Sobald Kanäle gewählt werden, die sich überschneiden, kommt es zu einem deutlichen Einbruch der Geschwindigkeit bei den Endgeräten.

Bei der Verwendung von vier Kanälen gleichzeitig kommt es an den Kanalgrenzen zu einer Überschneidung, es steht somit nicht mehr die volle Kanalbandbreite zur Verfügung und entsprechend bricht die Geschwindigkeit ein. Ein einzelner 802.11g

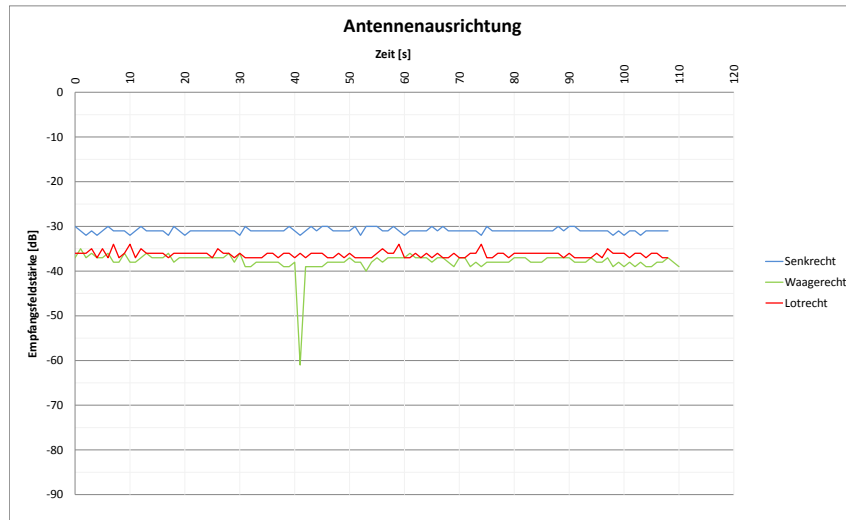


Abbildung 3.15: Diagramm der Empfangsfeldstärke in Abhängigkeit von der Antennenausrichtung

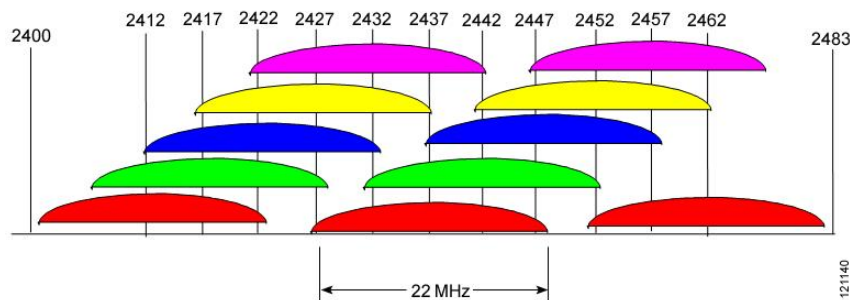


Abbildung 3.16: Kanäle von 802.11g [Cis11]

ist dabei mit dem in Abbildung 3.17 zu sehendem Spektrum definiert. Bei 11MHz ist dabei das Energielevel bei nur -20dB vom Maximum, bei 22MHz nur bei -30dB vom Maximum. Wenn man nun mit einer Planung mit vier überschneidenden Kanälen arbeitet, kommt es wie in Abbildung 3.18 zu einer sehr großen Überlagerung.

Cisco hat nun ein Netzwerk mit vier APs und drei beziehungsweise vier Kanälen aufgebaut und die resultierende Geschwindigkeit überprüft [Cis11]. Man kam dabei zu dem Ergebnis, dass bei einem System mit 4 überschneidenden Kanälen die Geschwindigkeit im Durchschnitt nur halb so groß ist, wie bei überschneidungsfreien Systemen mit drei Kanälen.

In Abbildung 3.19 kann man die jeweilige idealisierte Abdeckung eines Drei- bzw. eines Vier-Kanal-Systems sehen. Deutlich ist zu erkennen, dass auch mit dem Überschneidungsfreien Drei-Kanalsystem ein flächendeckender Betrieb möglich ist. Bei der Planung ist somit unbedingt darauf zu achten, dass jeweils überschneidungsfreie Kanäle gewählt werden. Wichtig ist, dass die Kanalwahl bei der Planung berücksichtigt wird und Bereiche in denen sich überschneidende Kanäle physikalisch

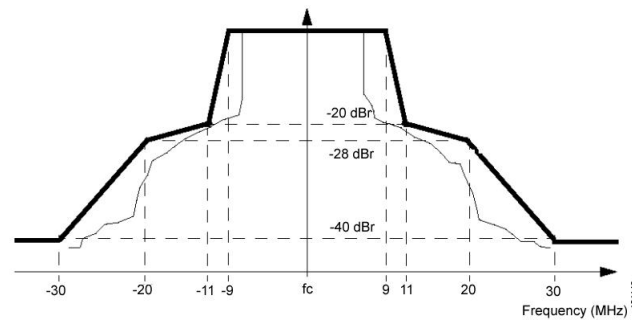


Abbildung 3.17: Kanalspektrum von 802.11g [Cis11]

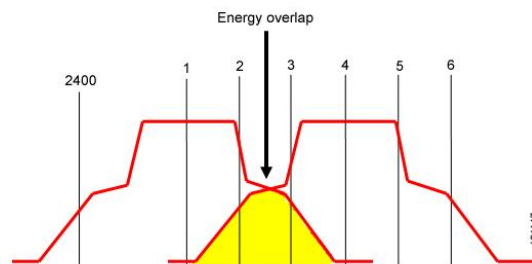


Abbildung 3.18: Kanalüberlagerung bei vier Kanälen, 802.11g [Cis11]

treffen deutlich dargestellt werden, so dass die Planung deutlich zur Vermeidung solcher Probleme führt.

### 3.5.3 Automatische Konfiguration

Verschiedene APs haben Mechanismen eingebaut, die selbständig die Ausgangsleistung und die Kanalwahl einstellen. Teilweise funktioniert dies mittels eines WLAN-Controllers, an dem alle APs angeschlossen sind. Dieser regelt die Konfiguration der APs. In anderen Implementierungen kommunizieren die APs direkt miteinander, und konfigurieren sich so selbst (z.B. bei Netgear AutoCell). All dieses Implementierungen haben einen Nachteil: sie sind herstellerspezifisch, die genaue Funktionsweise ist nicht offengelegt.

Die Implementierungen sind also nicht standardisiert und eine automatische Konfiguration hat natürlich auch Auswirkungen auf die Planung. Im Folgenden werde ich kurz auf diese Auswirkungen eingehen und diskutieren, ob eine Planung oder eine automatische Konfiguration sinnvoll ist.

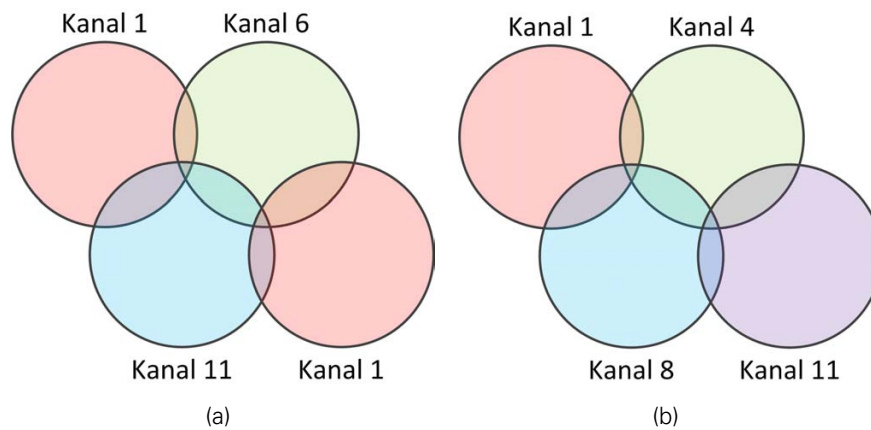


Abbildung 3.19: Kanalabdeckung bei 3 bzw. 4 Kanälen

### **Einfluss auf die Planung**

Der Einfluss der automatischen Konfiguration auf ein geplantes WLAN ist kaum abzuschätzen, speziell da die verwendeten Algorithmen und Funktionsweisen nicht offengelegt sind. Hier kann der Einfluss bestenfalls durch praktische Tests mit Site Surveys ermittelt werden und mit dem durch die Planung ermittelten Werten verglichen werden.

Letztlich sollte auf eine automatische Konfiguration dennoch möglichst verzichtet werden, wenn das Netzwerk intensiv geplant wurde. Ergebnisse der Planung werden vermutlich auf jeden Fall verändert und der Sinn der Planung wird zunichte gemacht.

Automatische Konfiguration kann allerdings keine Planung ersetzen, denn die Grundabdeckung ist nur bei sinnvoller AP-Verteilung gewährleistet. Es ist allerdings unter Umständen möglich, die APs nach sehr einfachen Regeln zu platzieren - bei Bedarf auch automatisch - und mit dieser automatischen Planung im weiteren Verlauf auch die AP-Konfiguration durchführen zu lassen. Hier können weitere Arbeiten ansetzen, um diesen Fakt zu untersuchen.

## **3.6 FAZIT**

Bei einer sinnvollen Reichweite von bis zu 100 Metern im Freien (hier beträgt die Freiraumdämpfung bei 2,4GHz WLAN bereits 80dB, siehe auch Kapitel 5.1.1) und entsprechend wesentlich weniger Reichweite in Gebäuden (durch die Dämpfung der Gebäudestruktur) und einer praktischen realistischen Mindestentfernung von

einem Meter zum AP beinhaltet das Spektrum der WLAN-Nutzung einen Bereich zwischen 40dB und 80dB Dämpfung durch die Freiraumausbreitung.

In diesem Spektrum wirken nun die weiteren Störfaktoren mit unterschiedlich starkem Einfluss auf das WLAN. Fasst man alle Fakten und ermittelten Daten zusammen, so ergibt sich eine sinnvolle Genauigkeit von circa 2dB bis 4dB. Da durch die logarithmische Größenangabe gilt, dass die Verdopplung der Entfernung einen Zuschlag von 6dB auf die Ursprungsämpfung erzeugt, wäre es sinnvoll, die Genauigkeit mit zunehmender Entfernung vom AP zu verkleinern.

<b>Entfernung</b>	<b>FSPL</b>	<b>2,4GHz</b>	
		<b>+2dB</b>	<b>+4dB</b>
<b>1m</b>	40dB	25cm	58cm
<b>2m</b>	46dB	53cm	118cm
<b>4m</b>	52dB	100cm	235cm
<b>10m</b>	60dB	252cm	577cm

Tabelle 3.5: Entfernungsabhängige Genauigkeit

Geht man nun von den niedrigen Entfernungen aus Tabelle 3.5 aus, so ergibt sich eine sinnvolle Genauigkeit von einem bis zwei Metern. Bei Bedarf kann die Genauigkeit bei der Berechnung entsprechend noch vergrößert werden, wenn es sich um kritische Bereiche handelt.



# **4    UNTERSUCHUNG VORHANDENER PLANUNGSTOOLS**



In diesem Abschnitt untersuche ich einige populäre Planungstools und deren Möglichkeiten, auch veränderliche Objekte während der Planung zu betrachten. Außerdem betrachte ich die Geschwindigkeit, mit der ein geplantes Raum-Layout berechnet wird und ob Möglichkeiten geboten werden, die Genauigkeit der Berechnung zu beeinflussen.

Da die Demos aller drei getesteten Tools extrem eingeschränkt sind und somit praktisch nicht verwendbar sind, kann die Untersuchung leider nicht an einem für alle Tools gleich entworfenen Raum erfolgen, sondern muss jeweils mit den individuellen Demo-Projekten erfolgen. Das Hauptproblem ist dabei, dass weder verschiedene Overlay-Grafiken zum Entwerfen der Räume geladen werden können, noch die entworfenen Räume gespeichert werden können.

## 4.1 AIRMAGNET PLANNER

Airmagnet bietet in seiner Software Survey Pro<sup>1</sup> unter anderem das Tool Airmagnet Planner. Das Tool bietet alle üblichen Möglichkeiten der Raumgestaltung und Planung, also die Verwendung verschiedener Wandmaterialien mit der Möglichkeit, eigene zu erstellen (auf Basis des Dämpfungswerts), Fenster, Türen und APs in allen Möglichkeiten mit jeglichen Einstellmöglichkeiten. Das heißt, es können Antennen, Antennenrichtung, Gewinn und alle vorstellbaren Daten der APs eingegeben werden.

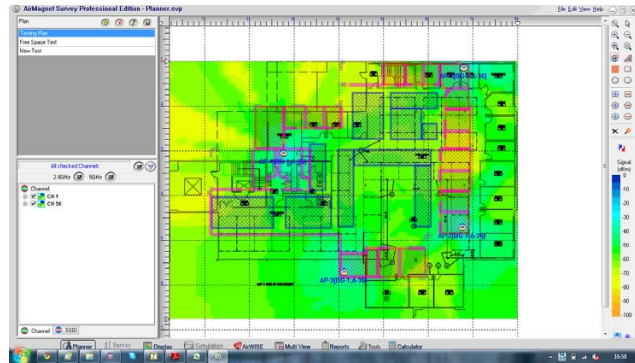
Das besondere an Survey Pro ist dabei, dass im Nachhinein der Raumplan mittels Durchlaufen des fertiggestellten Gebäudes hinsichtlich seiner Abdeckung überprüft werden kann.

Im Sinne der Genauigkeit können bei Airmagnet Planner verschiedene Werte eingegeben werden. Die Standardgenauigkeit beträgt hier 0,83ft, also ca. 25 Zentimeter. Bei dieser Genauigkeit dauert die Berechnung des Demoplans für 4 APs circa 9 Sekunden. Bei Verringerung der Genauigkeit auf 3,33ft, also circa 1 Meter, dauert die Berechnung hingegen nur knapp über 3 Sekunden. Bei einer Genauigkeit von 0,50ft, also circa 15 Zentimeter (der genauest möglichen Einstellung), dauert die Berechnung 13 Sekunden.

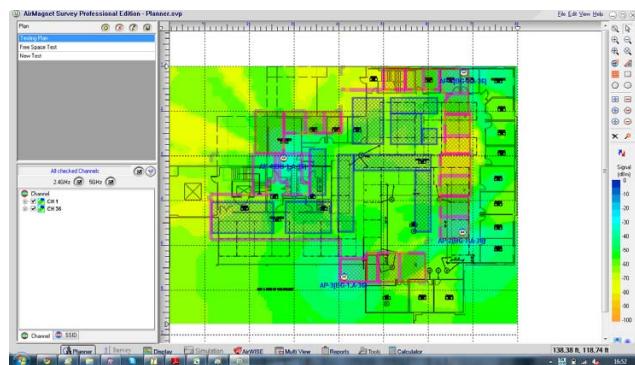
In Abbildung 4.1 kann man den Vergleich des mit Airmagnet-Planner berechneten Raumplans sehen - es zeigt sich deutlich, dass bei einer niedrigen Genauigkeit von 1 Meter in Abbildung 4.1(a) kaum Unterschiede im berechneten Ergebnis im

---

<sup>1</sup>getestet wurde die Demo Version 8.0 Build 22196 [Flu10]



(a)



(b)

Abbildung 4.1: Vergleich Genauigkeit Airmagnet Planner, Abb. 4.1(a): 1 Meter, Abb. 4.1(b): 0,15 Meter

Vergleich zur hohen Genauigkeit von 0,15 Meter in Abbildung 4.1(b) zu erkennen sind, obwohl die Berechnung ca. 4 mal so lange gedauert hat.

Schon hier erkennt man, dass sich je nach gewählter Genauigkeit schon bei so wenigen APs die Berechnungszeiten wesentlich unterscheiden. Die Berechnungsdauer wird natürlich dementsprechend umso höher, je mehr APs hinzu kommen. Es ist also von entscheidender Wichtigkeit herauszufinden, wie genau der Plan wirklich berechnet werden muss, denn bei größeren Projekten kann die Berechnungsdauer sich entsprechend in unpraktikablen Zeiten äußern.

Bezüglich veränderlicher Einflüsse bietet Airmagnet Planner die Angabe einer typischen Raumnutzung, also beispielsweise Büro oder Lagerhalle. Hier wird der Raum dann lediglich mit einer zusätzlichen für den Raumtyp typischen Dämpfung beaufschlagt, eine genauere Angabe ist hier nicht möglich.

## 4.2 PSIBER RF3D WIFIPANNER

Psiber RF3D WifiPlanner 2<sup>2</sup> ist ein relativ neues Planungstool für WLANs und bietet im Vergleich zu den üblichen Planungstools die Zusatzfunktion, dass WLANs dreidimensional, also über mehrere Etagen eines geplanten Gebäudes hinweg, hinsichtlich Ihrer Abdeckung berechnet werden können. Zusätzlich dazu bietet es die üblichen Funktionen, also verschiedenste Mauer- und Wandmaterialien mit verschiedenen Dämpfungen, verschieden vordefinierte APs mit allen üblichen Einstellmöglichkeiten, also Ausrichtung, Gewinn, Kanal und alle anderen relevanten Daten.

Die Demo hat die gleichen Einschränkungen wie die von Airmagnet und bietet dementsprechend keine Möglichkeit ein Raumoverlay zu laden und auch keine Möglichkeit den entworfenen Raum zu speichern. Daher greife ich auch hier auf den gegebenen Demoraum zurück.

Das Tool bietet die Möglichkeit, die Berechnungsgenauigkeit zwischen *low* und *high* einzustellen, eine genaue Erklärung was *low* und *high* genau bedeuten, liefert Psiber allerdings nicht. Hier wird aber auch der Hinweis gegeben, dass bei höherer Genauigkeit wesentlich mehr Speicher benötigt wird und sich die Berechnungsdauer entsprechend erhöht.

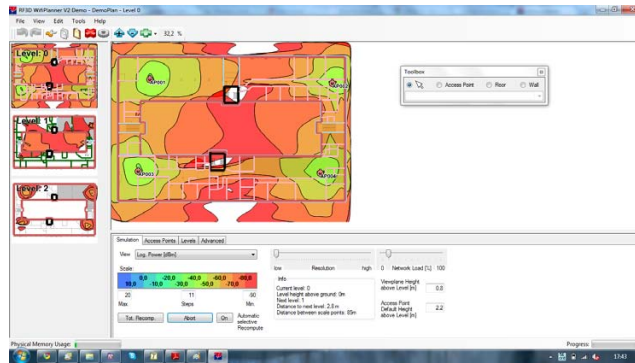
Bezogen auf den Demoplan zeigt sich das in den folgenden Ergebnissen: in der niedrigsten Genauigkeit berechnet das Tool den Demo-Plan in circa 2 Sekunden, bei einer mittleren Genauigkeit dauert es circa 4 Sekunden, bei hoher Genauigkeit schon circa 100 Sekunden.

In Abbildung 4.2 kann man den Vergleich zwischen hoher und niedriger Genauigkeit in Psiber RF3D WifiPlanner 2 sehen. Im Detail sind Unterschiede erkennbar, allerdings sind im Sinne der Komplettübersicht die Unterschiede eher gering und es ist entsprechend eher zweifelhaft, ob der enorme zusätzliche Rechenaufwand gerechtfertigt ist, speziell, da die Unterschiede meist Verschiebungen um wenige Meter sind bei niedrigen Unterschieden der Dämpfung - auch hier gilt wieder die Frage, wie genau das Ganze eigentlich sein muss. Unter Umständen reicht schon eine durch den Raum laufende Person, um die mit der hohen Genauigkeit berechneten Werte soweit zu verfälschen, dass die Ergebnisse nicht mehr relevant sind. Es gilt klar zu untersuchen, ob die Berechnung mit niedrigster Genauigkeit für die Praxis nicht vollkommen ausreichend ist.

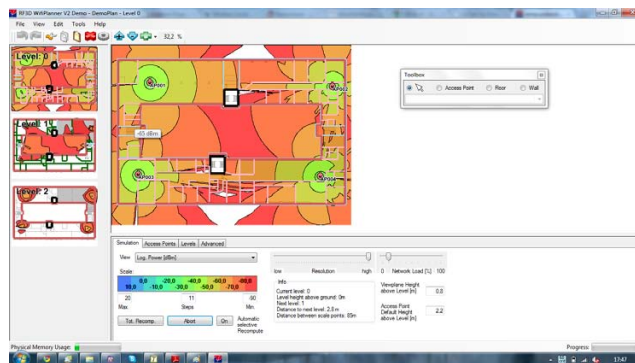
Im Sinne veränderlicher Einflüsse bietet RF3D WifiPlanner 2 nur die Angabe eines Raumtyps für das komplette Gebäude. Eine Unterteilung in verschiedene Räume,

---

<sup>2</sup>getestete Version: Demo 2.0.18 Build 0 [Psi10]



(a)



(b)

Abbildung 4.2: Vergleich Genauigkeit Psiber RF3D WifiPlanner 2, Abb. 4.2(a): niedrige Genauigkeit, Abb. 4.2(b): unten hohe Genauigkeit

wie sie in Airmagnet Planner angeboten wird, ist nicht möglich. Es werden nur die Typen *FreeSpace Lose*, *Office* und *Warehouse* angeboten

### 4.3 AEROHIVE ONLINE WIFIPANNER

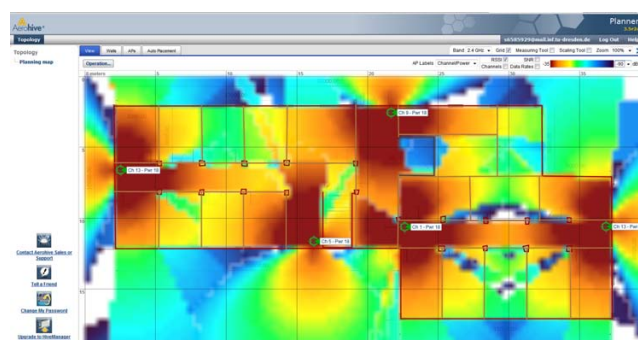
Aerohive bietet einen Online WifiPlanner <sup>3</sup>, mit dem es möglich ist, im Internet direkt im Browser sein Raum-Layout zu erstellen und zu berechnen. Getestet wurde Aerohive Online WifiPlanner im Januar 2011.

Bei der Lösung von Aerohive gilt es allerdings zu beachten, dass alle Daten beim Anbieter gespeichert werden. So sollte man es vermeiden, sensible Bereiche und sensible Räume mit Aerohive zu planen. Außerdem ist immer eine Online-Verbindung zur Planung nötig. Zu den offensichtlichen Vorteilen der Aerohive-Lösung zählt allerdings die Unabhängigkeit von leistungsstarken PC-Systemen, da jede Berechnung auf dem Server von Aerohive durchgeführt wird.

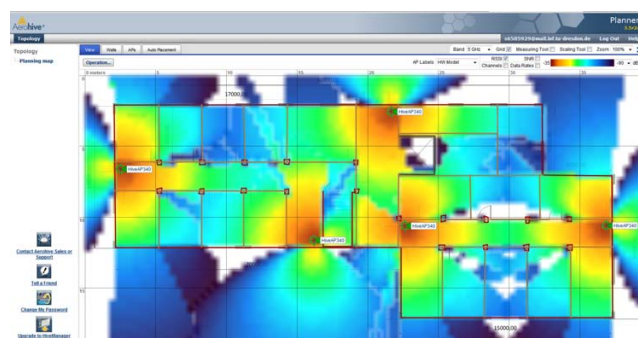
<sup>3</sup>getestete Version: Planner v. 3.5r2a [Aer10]

Eine Einstellung der Genauigkeit sieht Aerohive nicht vor, die Berechnungen geschehen aber sehr schnell und direkt nach Platzierung der APs, für den selbst erstellten Testplan dauert dies circa 5 bis 10 Sekunden, scheinbar abhängig von der aktuellen Serverlast bei Aerohive. Einstellbar sind im Gegensatz zu den anderen Tools allerdings nur Wifi-Channel und Sendeleistung.

Bei den veränderlichen Einflüssen bietet Aerohive verschiedene Gebäudeverwendungszwecke zur Wahl, beispielsweise Büro oder Lagerhalle. Außerdem ist es möglich, Regale zu platzieren, die Aerohive mit 2dB Dämpfung vordefiniert hat. Weitere Einstellmöglichkeiten werden allerdings nicht geboten. Auch eine Angabe zur verwendeten Genauigkeit macht Aerohive nicht.



(a)



(b)

Abbildung 4.3: Vergleich Empfangsstärke Aerohive Online WifiPlanner, Abb. 4.3(a): Büro, Abb. 4.3(b): Lagerhaus

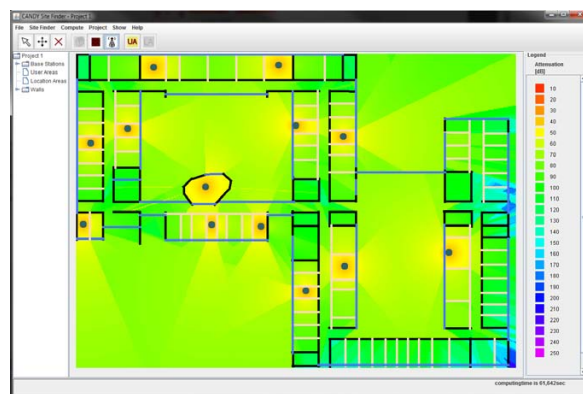
In Abbildung 4.3 kann man einen Vergleich der berechneten Empfangsstärke für einen Testraum mit der Angabe Büro (Abb. 4.3(a)) und Lagerhaus (Abb. 4.3(b)) sehen. Man kann erkennen, dass Aerohive scheinbar eine relativ grobe Genauigkeit hat, was im praktischen Gebrauch allerdings völlig ausreichend sein sollte.

Letztlich ist das Hauptproblem bei Aerohive die Weitergabe der Daten an einen Fremdanbieter und die wenigen Einstellmöglichkeiten bezüglich der verwendeten APs. Allerdings ist es, da leicht und schnell zu erlernen, das benutzerfreundlichste Tool.

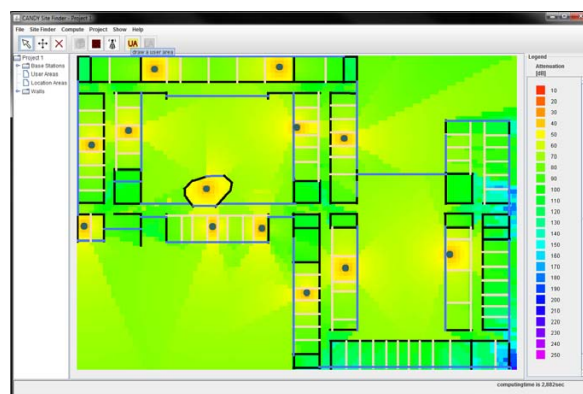
## 4.4 CANDY SITEFINDER

Der CANDY SiteFinder ist ein Planungstool, welches an der TU-Dresden entwickelt wurde. Bei der angetesteten Version handelt es sich um die von Thomas Hochstetter in seiner Diplomarbeit entwickelte Variante "CANDY SiteFinder Eclipse Rich Client Platform" [Hoc08].

Genauigkeitsangaben können in Meter angegeben werden, der zu verwendende Algorithmus kann selbst gewählt werden. Beispielhaft habe ich die Berechnung mittels des Grundrisses der Fakultät Informatik, TU Dresden, durchgeführt. Bei einer Genauigkeit von 0,2 Meter und 13 APs dauert die Berechnung mit dem Multi Wall Model circa 62 Sekunden, bei einer Genauigkeit von einem Meter hingegen nur circa 2,8 Sekunden. In Abbildung 4.4 sieht man entsprechend die berechneten Ergebnisse der verschiedenen Genauigkeiten.



(a)



(b)

Abbildung 4.4: Vergleich Dämpfung CANDY SiteFinder, Abb. 4.4(a): 20cm Genauigkeit, Abb. 4.4(b): 100cm

Die Berechnung bezieht die Wanddämpfung ein, eine zusätzliche raumspezifische Dämpfung wird nicht betrachtet. Für APs kann Antennengewinn, Sendeleistung



und Anbauhöhe angegeben werden, eine Antennenausrichtung wird nicht betrachtet. Für Wände können verschiedene Stärken und verschiedene Wandtypen angegeben werden, leider ist hier keine spezifische Dämpfung je Wandtyp angegeben.

Für die Berechnung stehen verschiedene Algorithmen zur Wahl, es kann zwischen unterschiedlichen Ausgaben gewählt werden (zum Beispiel Dämpfung, Datenrate, Empfangsfeldstärke).

Zusätzlich dazu erfolgt die Berechnung empfänger-spezifisch, das heißt, es kann die Datenrate für einen bestimmten Empfänger angegeben werden. Die Auswertungsmöglichkeiten sind sehr umfangreich. Es können neben Innenraum auch großflächige Berechnungen für zum Beispiel Stadtgebiete mit den entsprechenden Algorithmen durchgeführt werden. Als universelles Format kann NDML genutzt werden. Details hierzu finden sich unter anderem in [Hän05, Tro06].

## **4.5 FAZIT**

Wie man an den verschiedenen Tools sieht, ist es bereits möglich, die Abdeckung des WLANs mit verschiedenen Genauigkeiten zu berechnen. Deutlich erkennbar ist auch die unterschiedliche Berechnungsdauer bei den verschiedenen Genauigkeiten. Auch verschiedene Räume können definiert werden, zum Beispiel als Büroräume oder als Lagerhäuser.

Auf den Einfluss von beweglichen Einflüssen wird allerdings nicht direkt eingegangen, hier wird maximal durch die Definition des Raums indirekt deren Einfluss betrachtet.

Interessant ist also vor allem die Frage, welche Genauigkeit gewählt werden sollte und ob diese dynamisch gestaltet werden sollte. Dynamisch meint hier, ob bei höherem Abstand zum AP die Genauigkeit herabgesetzt werden sollte, weil die veränderlichen Einflüsse natürlich bei höherem Abstand zum AP zunehmen und damit genau berechnete Punkte immer unrealistischer werden.



## **5   BERECHNUNG**



Die WLAN-Ausleuchtung kann mittels der Maxwellschen Gleichungen extrem genau berechnet werden. Dagegen spricht allerdings der enorme Berechnungsaufwand und das Fehlen von entsprechend genauen Daten der Umgebung - angefangen vom Fensterrahmen bis hin zum Türgriff oder anderen Details. Aus diesem Grund wurden verschiedene Ausbreitungsmodelle entwickelt, die die Berechnung und die Bedingungen soweit wie möglich vereinfachen ohne dabei zu ungenau zu werden.

## 5.1 MODELLE

Aus der großen Auswahl von Ausbreitungsmodellen für Radiowellen kommen zur Berechnung von WLAN auf Grund der maximalen Reichweite nur Nahbereichsmodelle in Frage.

### 5.1.1 Empirische Modelle

In empirischen Modellen wird die Umgebung nicht betrachtet. Die Berechnung erfolgt mittels einer stark vereinfachten Vorschrift mit dem Ziel, besonders nah an physikalische Grenzen zu gelangen, ohne deren Komplexität zu erreichen. Da die Umgebung nicht betrachtet wird, eignen sich diese Modelle praktisch nur für Freiflächen.

#### Freiraumausbreitung

Die Freiraumausbreitung (Free Space Loss (FSPL)) ist ein sehr einfaches Modell. Es berechnet lediglich die durch die Atmosphäre entstandene Dämpfung - es bedarf für sinnvolle Ergebnisse also einer Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger. Weitere Einflüsse werden nicht betrachtet.

$$FSPL = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right)^2 \quad (5.1)$$

wobei gilt:

$d$  = Entfernung Sender-Empfänger

$f$  = Frequenz

$c$  = Lichtgeschwindigkeit

Für die Angabe des FSPL in dB und bei Angabe der Frequenz  $f$  in MHz und der Entfernung  $d$  in Metern kommt man zu einer vereinfachten Form des FSPL:

$$FSPL [dB] = 20 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (d) - 27,55 \quad (5.2)$$

### One Slope

Beim One Slope Model [FM03] hängt die Verlustleistung von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger und einem Verlustfaktor ab. Die Dämpfung verläuft damit logarithmisch.

$$L = L_0 + 10\gamma \log d \quad (5.3)$$

wobei gilt:

- $L$  = Verlustleistung [dB]
- $L_0$  = Pfadverlust für 1 Meter [dB]
- $\gamma$  = Verlustfaktor
- $d$  = Entfernung Sender-Empfänger [m]

Die Parameter sind dabei experimentell in [FM03] ermittelt worden. Für  $L_0$  gilt dabei die Freiraumdämpfung für einen Meter. Die Indoor-Ergebnisse sind bei richtiger Parameterwahl damit zwar besser als nur bei der Freiraumdämpfung, allerdings sind sie auch bei Einbindung der ermittelten Störeinflüsse zu genau.

Bemerkung	$f$ [GHz]	$L_0$ [dB]	$\gamma$
<b>Büro</b>	2,45	40,2	4,2
<b>Korridor</b>	2,45	40,2	1,2
<b>Büro</b>	5,00	46,8	4,6

Tabelle 5.1: Parameter des One Slope Model

### COST 231 HATA

Bei dem COST 231 Hata Model (COST 231 HATA) [DJC98] handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Okumura-Hata-Modells für den Außenbereich. Es werden die Höhen von Sender und Empfänger betrachtet und die Entfernung zwischen diesen. Dabei wird je nach Situation beziehungsweise je nach Bedingungen ein Korrekturfaktor veränderlich genutzt. Da beide Modelle für den Außenbereich mit

Reichweiten mehrerer Kilometer entwickelt und optimiert sind und im Frequenzbereich zwischen 150MHz und 2000MHz eingeschränkt sind, kommen Sie für die Planung von WLAN nicht in Frage und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

## 5.1.2 Semi-empirische Modelle

Neben den empirischen Ausbreitungsmodellen gibt es auch semi-empirische Ausbreitungsmodelle. Hier wird im Gegensatz zu empirischen Modellen die Umgebung in die Berechnung mit einbezogen. Da die Umgebung mit berücksichtigt wird, liefern sie deutlich bessere Ergebnisse und sind somit auch besser für die Planung innerhalb von Gebäuden geeignet.

### Multi Wall

Beim Multi Wall Modell [FM03] wird die Dämpfung auf dem direkten Weg zwischen Sender und Empfänger berechnet. Dabei geht jedes Hindernis der Gebäudestruktur mit seiner Dämpfung direkt in das Endergebnis ein.

$$L = L_0 + 10\gamma \log(d) + \sum_{i=1}^M L_i \quad (5.4)$$

wobei gilt:

$L$  = Verlustleistung [dB]

$L_0$  = Pfadverlust für 1 Meter [dB]

$\gamma$  = Verlustfaktor

$d$  = Entfernung Sender-Empfänger [m]

$M$  = Anzahl Wände auf Strecke Sender-Empfänger

$L_i$  = Dämpfung der i-ten Wand [dB]

Bemerkung	$f$ [GHz]	$L_0$ [dB]	$\gamma$
Büro	2,45	40,2	2,0
Büro	5,00	46,4	2,0

Tabelle 5.2: Parameter des Multi Wall Model

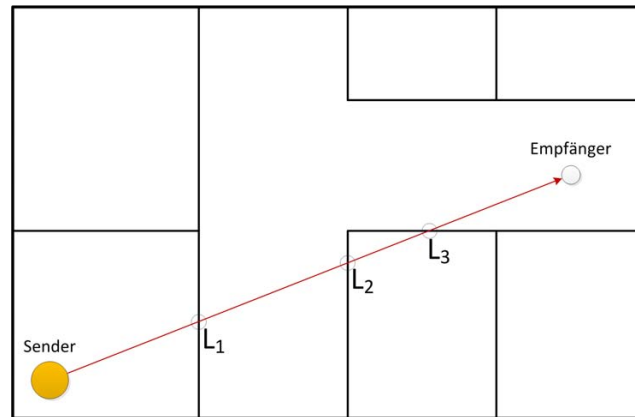


Abbildung 5.1: Beispiel: Multi Wall Model

### COST 231 MWF

Im Gegensatz zum Multi Wall Model werden beim COST 231 Multi Wall and Floor Model (MWF) [LF01] zusätzlich noch die Gebäudedecken mit in die Berechnung einbezogen. So wird eine direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger dargestellt und es wird für jede den Strahl kreuzende Gebäudestruktur deren entsprechende Dämpfung aufaddiert:

$$L_{MWF} = L_0 + 10n \log(d) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_{wi}} L_{wik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_{fj}} L_{fjk} \quad (5.5)$$

wobei gilt:

- $L_0$  = Pfadverlust für 1 Meter
- $n$  = Energiedämpfungsindex
- $d$  = Entfernung Sender-Empfänger
- $L_{wik}$  = Dämpfung aufgrund Wand-Typ  $i$  und  $k$ -te Wand
- $L_{fjk}$  = Dämpfung aufgrund Decken-Typ  $j$  und  $k$ -te Decke
- $I$  = Anzahl Wand-Typen
- $J$  = Anzahl Decken-Typen
- $K_{wi}$  = Anzahl durchdringener Wände des Typs  $i$
- $K_{fj}$  = Anzahl durchdringener Decken des Typs  $j$

Das Besondere am MWF ist dabei, dass mit zunehmender Anzahl durchdringener Wände deren Dämpfungseinfluss abnimmt, entsprechende Werte wurden mit Ray-Tracing ermittelt. Mit dieser Methode werden deutlich realistischere Ergebnisse



erzielt als nur durch das Aufaddieren aller Gebäudestrukturen. Der Nachteil ist allerdings, dass die Einflussfaktoren für die Gebäudestrukturtypen bekannt sein müssen.

## **COST 231 WI**

Das COST 231 Walfisch-Ikegami Model (COST 231 WI) citeCOST231Chapter4 ist ein Weitbereichsmodell, welches eher für Mobilfunk eine Rolle spielt. Aufgrund von Einschränkungen bezüglich der Frequenzen des Modells (Frequenzbereich des Modells von 800MHz bis 2000MHz) beziehungsweise der Höhe von Sender und Empfänger (Mindesthöhe 4 Meter beziehungsweise 1 Meter) kommt es zur Berechnung von WLAN nicht in Frage und wird daher von mir hier nicht weiter betrachtet.

### **5.1.3 Strahlenoptische Modelle**

Strahlenoptische Modelle sind sehr genaue Modelle, benötigen aber auch viel Rechenleistung. Grundlage dafür ist, dass sich elektromagnetischen Wellen wie Lichtwellen ausbreiten und an Gebäudestrukturen in Richtung und Stärke verändert werden. Die Wellenstruktur wird dabei vernachlässigt. Dabei gibt es zwei Herangehensweisen: entweder werden die Strahlen vom Empfänger ausgehend berechnet (Ray-Tracing (RT)) oder die Strahlen werden von einer Quelle aus berechnet (Ray-Launching (RL)).

#### **Ray-Tracing**

Bei Ray-Tracing wird jeder mögliche Strahl zwischen Quelle und Empfänger berechnet. Jeder berechnete Strahl, der dabei zwischen Empfänger und Sender eine Verbindung herstellt, gilt somit als einflussreich auf die Empfangsenergie und geht je nach Verlauf unterschiedlich stark in die Berechnung der Empfangsenergie ein.

Da hierbei direkte Strahlen mit all ihren Einflüssen wie Reflektion, Beugung und Streuung berechnet werden, benötigt Ray-Tracing sehr viel Rechenleistung und viel Zeit. Die entsprechenden Ergebnisse sind damit aber sehr genau.

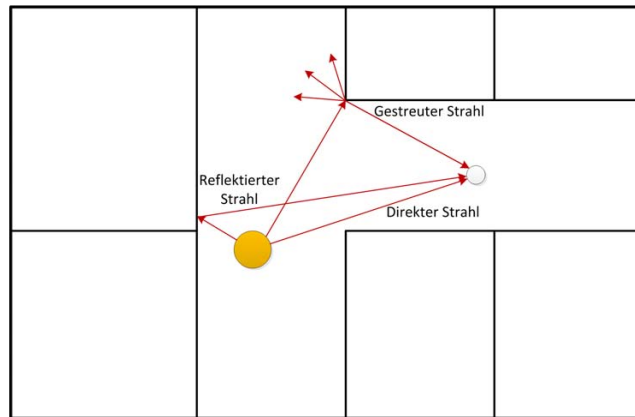


Abbildung 5.2: Beispiel: Ray-Tracing

## Ray-Launching

Beim Ray-Launching werden Strahlen vom Sender in alle Richtungen ausgestrahlt. Die Strahlen werden dabei mit einem diskreten Winkel schrittweise rund um den Sender ausgesendet und einzeln berechnet. Bei jeder Reflexion, Absorption, Streuung und Beugung und mit jedem Entfernungszuwachs werden so Richtung und Energie des Strahls verändert. Gerade bei Absorption und Streuung wird dabei jeder neu entstehende Strahl zusätzlich berechnet. Jeder Strahl bildet dabei eine Strahlröhre, deren Winkel Abhängig von dem diskreten Schrittwinkel ist.

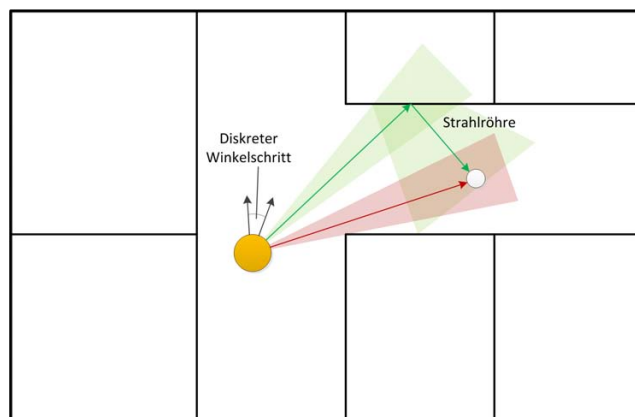


Abbildung 5.3: Beispiel: Ray-Launching

Der Vorteil dieser Methode ist, dass nur eine maximale definierte Zahl an Strahlen gestartet werden. Der Nachteil dieser Methode ist der hohe Rechenaufwand für die vielen Strahlen, die speziell bei Streuung und Absorption deutlich an Zahl zunehmen. Ein in manchen Fällen weiterer Nachteil ist der Fakt, dass Strahlen in alle Richtungen berechnet werden. Sofern das Ergebnis nur für einen bestimmten Punkt benötigt wird, werden sehr viele Strahlen berechnet, die diesen Punkt nie erreichen.

## **Dominant Path Prediction**

Das Dominant Path Prediction Model (DPPM) hat zum Ziel, die Genauigkeitsvorteile von RT und RL mit den Vorteilen bezüglich des Rechenaufwand von semiempirischen beziehungsweise empirischen Modellen zu kombinieren. Die Idee dabei ist, dass mit zwei bis drei Strahlen über 95% der Empfangsleistung abgedeckt werden.

Der Vorteil bei der Berechnung wird beim DPPM durch Festlegen maximaler Interaktionsanzahlen mit Objekten erreicht. Auch Fehlereinflüsse durch fehlerhafte Umgebungsbeschreibungen sind bei diesem Modell wesentlich geringer als beim RT und RL. Das Modell ist für die Indoor- und die Outdooranwendung geeignet.

Für weitere Details zum DPPM empfiehlt sich die Diplomarbeit von Sandro Preuß [Pre06]. Er hat sich intensiv mit diesem vielversprechenden Modell beschäftigt.

### **5.1.4 Feldtheoretische Modelle**

Die feldtheoretische Herangehensweise ist auf Grund der in den vorhergehenden Kapiteln genannten Störeinflüssen von vorn herein auszuschließen. Hier werden alle feldtheoretischen Bedingungen in die Berechnung mittels der Maxwell'schen Gleichungen einbezogen, der Rechenaufwand ist unpraktisch hoch.

Ein weiteres Problem dieser Methode ist der Bedarf an extrem genauen Umgebungsplänen, um den hohen Rechenaufwand nicht durch fehlerhafte Modelle zu vergeuden - diese sind aber praktisch nicht mit realistischem Aufwand erstellbar. Es ist in der Praxis nicht sinnvoll, jegliche innere Struktur, jeden Fenstergriffe, jede Fliesensorte oder jede Pflanze, die zukünftig im Gebäude steht vorher schon zu modellieren.

Auf Grund der genannten Fakten werde ich diese Modelle im weiteren Verlauf nicht näher betrachten, da es bezüglich der in den vorherigen Kapiteln ermittelten Schwankungen in der Genauigkeit gar nicht nötig ist, die WLAN-Abdeckung so genau zu berechnen.

## 5.2 OPTIMIERUNGEN

Im folgenden Abschnitt möchte ich darauf eingehen, inwiefern der Berechnungsaufwand von der Genauigkeit abhängt. Ich werde zeigen, dass bei optimierter Genauigkeit durchaus ein deutlicher Gewinn der Berechnungszeit zu erreichen ist und der Berechnungsaufwand damit natürlich sinkt. Außerdem werde ich darstellen, wie die Berechnung optimaler weiser erfolgen sollte.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei auf die empirischen und semi-empirischen Modelle, für diese ist die Grundform der Berechnung - eine direkte Linie von Sender zu Empfänger mittels verschiedener Einflussfaktoren - gleich. Da aufgrund der ermittelten Störeinflüsse die Genauigkeit der semi-empirischen Modelle als ausreichend betrachtet werden kann, werde ich keine Berechnungsoptimierungen für strahlenoptische Modelle vorschlagen.

### 5.2.1 Abhängigkeit des Aufwands von der Genauigkeit

Die gewählte Genauigkeit und der Aufwand der Berechnung hängen direkt zusammen. Je genauer die Berechnung erfolgen soll, desto mehr Punkte müssen entsprechend auch berechnet werden. Einen quadratischen Raum mit einer Kantenlänge von 10 Meter auf 2 Meter genau zu berechnen benötigt also  $s = n^2$  Schritte, wobei  $n = \frac{10m}{2m} = 5$ , also  $s = 5^2 = 25$  Berechnungen pro AP. Die Berechnungen müssen nun für jeden platzierten AP vorgenommen werden, also  $s_{Gesamt} = s \cdot k$ .

Soll die Genauigkeit jetzt verdoppelt werden, also auf 1 Meter genau berechnet werden, so vervierfacht sich die Anzahl der Berechnungen bereits:  $s = (2 \cdot n)^2 = 2^2 \cdot n^2 = 4 \cdot n^2$ .

In Abbildung 5.4 kann man deutlich erkennen, dass mit höher werdender Genauigkeit der Berechnungsaufwand exponentiell ansteigt. Es zeigt sich deutlich, dass erhöhte Genauigkeit mit enormen Rechenaufwand erkaufte werden muss. Hier gibt es jedoch zwei sinnvolle Lösungsansätze: zum einen, nur mit einer geringen Genauigkeit zu rechnen und zum anderen die Berechnung mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse zur Genauigkeit so zu optimieren, dass der Aufwand in möglichst großen Maße abnimmt.

Es gilt also im Allgemeinen:

$$s = \left[ \frac{y}{a} \cdot \frac{x}{a} \right] \cdot k \quad (5.6)$$

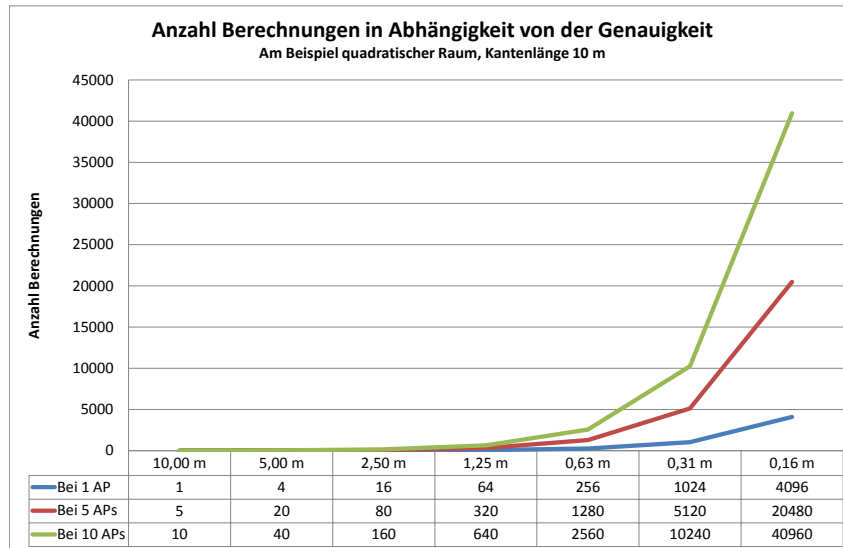


Abbildung 5.4: Berechnungsschritte in Abhängigkeit der Genauigkeit

wobei gilt:

- $s$  = Berechnungsschritte
- $y$  = Breite Berechnungsbereich [m]
- $x$  = Länge Berechnungsbereich [m]
- $a$  = Genauigkeit [m]
- $k$  = Anzahl Access Points

## 5.2.2 Abschätzung von möglichem Gewinn

Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann man nun auch schlussfolgern, was für Zeitgewinne bei der Wahl optimaler Genauigkeiten möglich sind. In Abbildung 5.4 sieht man, dass in dem genannten Beispielraum bei einer Genauigkeit von 16 Zentimeter und 5 APs bereits 20480 Berechnungen nötig sind um die Abdeckung der einzelnen APs anzuzeigen. Dabei werden hier nur die Abdeckungen der einzelnen APs berechnet, Überlagerungen der Abdeckung oder gar Überlagerungen gleicher Kanäle sind hier nicht betrachtet.

Ausgehend davon, dass ein Berechnungsschritt 0.1 Sekunde dauert, käme man in diesem Szenario auf 2048 Sekunden Berechnungsdauer, also ca. 34 Minuten. Greift man hingegen zu einer sinnvolleren Genauigkeit von 1.25 Meter ist die gesamte Abdeckung bereits nach 320 Sekunden, also nach ca. 5 Minuten berechnet - also in 14% der Ursprungsrechenzeit. Die Berechnungsgeschwindigkeit würde somit fast versiebenfacht, allein durch Wahl einer sinnvollen Genauigkeit.

Es gilt also der Zusammenhang  $t_{Gesamt} = s \cdot t_{Berechnungszyklus}$  für die Berechnungsdauer, wobei  $s$  die Anzahl der zu berechnenden Punkte und  $t_{Berechnungszyklus}$  die Dauer für die Berechnung eines Punktes ist.

Die doppelte Genauigkeit bedeutet hierbei, dass zum Beispiel statt auf 2 Meter genau auf 1 Meter genau gerechnet wird. Es gilt für den Genauigkeitsfaktor  $g$  also der einfache Zusammenhang  $\frac{1}{g} \cdot \text{Genauigkeit}$ .

Aus Formel 5.6 folgt nun mit dem Genauigkeitsfaktor  $g$ :

$$s = \left[ \frac{y}{\frac{1}{g} \cdot a} \cdot \frac{x}{\frac{1}{g} \cdot a} \right] \cdot k$$

$$s = g^2 \left[ \frac{y}{a} \cdot \frac{x}{a} \right] \cdot k \quad (5.7)$$

wobei gilt:

- $s$  = Berechnungsschritte
- $y$  = Breite Berechnungsbereich [m]
- $x$  = Länge Berechnungsbereich [m]
- $a$  = Genauigkeit [m]
- $k$  = Anzahl Access Points
- $g$  = Genauigkeitsfaktor

Somit wirkt sich  $g$  also wie in Formel 5.7 zu erkennen quadratisch auf die Anzahl der Berechnungsschritte aus.

Anhand eines Beispiels erklärt, bedeutet das also mit Formel 5.6 für die Ursprungsgenauigkeit und Formel 5.7 für die neue Genauigkeit mit dem Faktor  $g = 4$ , also der 4-fachen Genauigkeit das Folgende (bei Breite  $x = 10\text{m}$ , Länge  $y = 6\text{m}$ , Genauigkeit  $a = 2\text{m}$ , APs  $k = 5$ ):

$$s_{Original} = \left[ \frac{6\text{m}}{2\text{m}} \cdot \frac{10\text{m}}{2\text{m}} \right] \cdot 5 = 75$$

$$s_{Neu} = 4^2 \left[ \frac{6\text{m}}{2\text{m}} \cdot \frac{10\text{m}}{2\text{m}} \right] \cdot 5 = 1200$$

Daraus ergibt sich also ein Gewinnfaktor  $f$  in Abhängigkeit des Genauigkeitsfaktors  $g$  von  $f = \frac{s_{Neu}}{s_{Original}} = g^2$ .

Bei einer Genauigkeit von 2,5 Meter bedeutet das sogar eine Berechnung in 80 Sekunden - das 25-fache der Rechenzeit bei 16 Zentimeter Genauigkeit. Hier stellt sich allerdings wieder ein anderes Problem ein: Bei einer so groben Genauigkeit kann es in verwinkelten Gebäuden oder an kritischen Stellen schnell zu völlig falschen Ergebnissen kommen. Hier kommt es unweigerlich zu der Frage: ist es möglich, die Vorteile des Geschwindigkeitsgewinns bei grober Berechnung und eine hohe Genauigkeit in kritischen Bereichen zu kombinieren? Dieser Frage widme ich mich mit einer möglichen Lösung im nächsten Kapitel.

### **5.2.3 Berechnungsoptimierung**

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse kann also idealerweise bereits mit verringerter Genauigkeit gerechnet werden. Dennoch ist in einigen Fällen sicher auch der Wunsch gegeben, die Empfangsverhältnisse deutlich genauer zu ermitteln. Beispielsweise kann hinter einem Fahrstuhlschacht oder an anderen kritischen Stellen Interesse bestehen, genauere Ergebnisse zu bekommen. Das Ziel sollte es also sein, die Berechnung so zu optimieren, das man mit geringem Rechenaufwand aussagekräftige Ergebnisse bekommt.

#### **Berechnung auf Basis kritischer Bereiche**

Eine andere vielversprechende Herangehensweise ist die Berechnung auf Basis kritischer Bereiche. Die Idee dahinter ist einfach: In Bereichen guter Abdeckung ist in der Regel eine hohe Auflösung nicht notwendig. Eine genaue Betrachtung der zu erwartenden Empfangsleistung muss nur in kritischen Bereichen erfolgen. Ausgehend davon, dass die kritischen Bereiche nur einen kleinen Teil der Gesamtplanung ausmachen, können hier erhebliche Gewinne bezüglich der benötigten Rechenzeit erreicht werden.

In Abbildung 5.5 kann man einen Beispielraum sehen. Die Kantenlänge des Beispielraums beträgt 10 Meter, dargestellt ist der Signal-to-noise ratio (Signal-Rausch-Verhältnis) (SNR) bei einem Rauschen von -90dBm. In Abbildung 5.5(b) wäre damit beispielsweise eine Aufteilung auf Grund der kritischen Bereiche gekennzeichnet. So würde zuerst die Genauigkeit auf 2 Meter genau berechnet und daraufhin die kritischen Bereiche, also die bei der der SNR einen definierten kritischen Wert unterschreitet, genauer berechnet - in diesem Beispiel auf 40 Zentimeter genau.

Den ganzen Raum auf 40 Zentimeter genau zu berechnen benötigt damit  $s = k \cdot n^2$  Schritte, wobei  $n = \frac{10m}{40cm} = 25$  und die Anzahl der APs  $k = 2$  ist. Damit ergibt sich

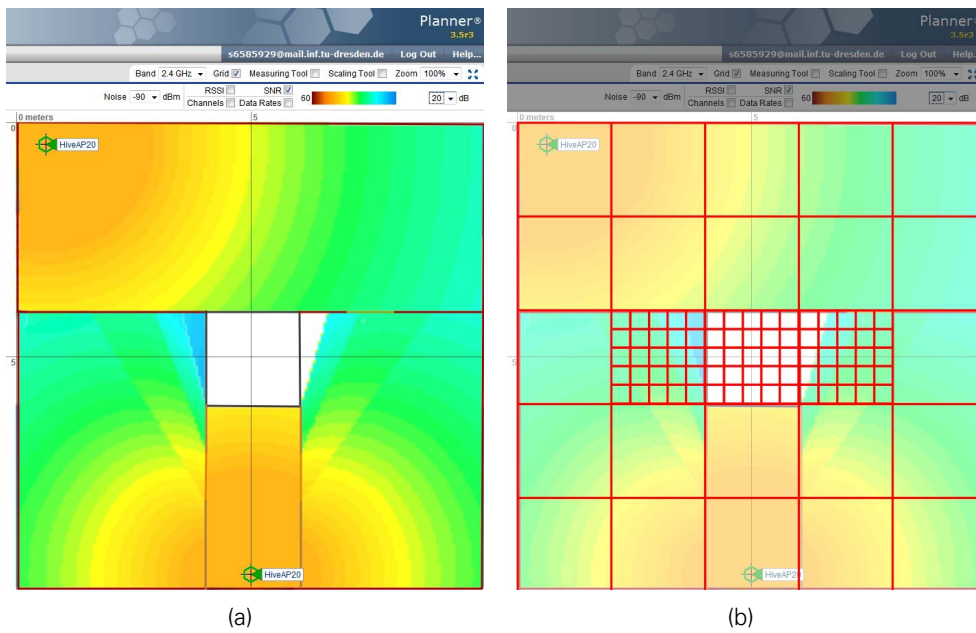


Abbildung 5.5: Darstellung eines Raumes mit Berechnung auf Basis kritischer Bereiche, beispielhafte Darstellung der Aufteilung in Abb. 5.5(b)

für  $s = k \cdot n^2 = 2 \cdot 25^2 = 1250$  Berechnungsschritte, wenn der gesamte Plan auf eine Genauigkeit von 40 Zentimeter gerechnet wird.

Werden hingegen nur kritische Bereiche so genau berechnet und der Rest der Karte wird mit einer größeren Genauigkeit berechnet, wird die Anzahl der Berechnungsschritte wesentlich geringer. Im Beispiel ist die grobe Genauigkeit auf 2 Meter festgelegt. Damit ergeben sich für die grobe Genauigkeit  $s_{grob} = k \cdot n^2 = 2 \cdot 5^2 = 50$  Berechnungsschritte. Dabei wurden im Beispiel drei kritische Bereiche festgestellt. Diese drei kritischen Bereiche werden nun mit der höheren Genauigkeit berechnet, das heißt  $s_{genau} = i_{s_{kritisch}} \cdot k \cdot n^2 = 3 \cdot 2 \cdot 5^2 = 150$  Berechnungsschritte mit  $n = \frac{2m}{40cm} = 5$ . Damit ergibt sich für  $s_{gesamt} = s_{grob} + s_{genau} = 50 + 150 = 200$ . Grob zusammengefasst sind dies also nur  $\frac{200}{1250} = 0.16$ , also 16%. Damit werden also über 6 mal so viele Berechnungsschritte eingespart.

Für eine Verfeinerungsstufe kann man also eine allgemeine Vorschrift herleiten:

$$\begin{aligned}
 s &= s_{grob} + s_{genauer} \\
 \text{mit } s_{grob} &= k \cdot \left( \frac{x}{a} \cdot \frac{y}{a} \right) \\
 s_{genauer} &= k \cdot \left[ c \cdot \left( \frac{x}{a} \cdot \frac{y}{a} \right) \right] \cdot g^2
 \end{aligned}$$

Allgemein gesagt gilt also die folgende Vorschrift für die Anzahl der Berechnungs-



schritte mit einem variablen Prozentsatz an genauer zu berechnenden Feldern:

$$s = (c \cdot g^2 + 1) \cdot \left( k \cdot \left( \frac{x}{a} \cdot \frac{y}{a} \right) \right) \quad (5.8)$$

wobei gilt:

- $s$  = Berechnungsschritte
- $y$  = Breite Berechnungsbereich [m]
- $x$  = Länge Berechnungsbereich [m]
- $a$  = Genauigkeit [m]
- $k$  = Anzahl Access Points
- $g$  = Genauigkeitsfaktor
- $c$  = Kritische Bereiche [%]

Betrachtet man das Ganze beispielsweise für 10% kritische Bereiche - also Bereiche, die genauer berechnet werden sollen - bei einer Fläche von 20 Meter mal 10 Meter, 10 APs, Genauigkeitsfaktor 5 und einer Grundgenauigkeit von 1 Meter, so kommt man wie im Folgenden zu sehen bei kompletter genauer Berechnung auf 50000 Rechenschritte, bei abgestufter Berechnung auf Basis kritischer Bereiche hingegen auf nur 7000 Rechenschritte.

$$\begin{aligned} s_{\text{genau}} &= \left[ \frac{y}{a} \cdot \frac{x}{a} \right] \cdot k \\ s_{\text{genau}} &= \left[ \frac{20}{0,2} \cdot \frac{10}{0,2} \right] \cdot 10 = 50000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{\text{kritisch}} &= (c \cdot g^2 + 1) \cdot \left( k \cdot \left( \frac{x}{a} \cdot \frac{y}{a} \right) \right) \\ s_{\text{kritisch}} &= (10\% \cdot 5^2 + 1) \cdot \left( 10 \cdot \left( \frac{20}{1} \cdot \frac{10}{1} \right) \right) = 7000 \end{aligned}$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass wesentlich weniger Rechenschritte nötig sind. Damit lässt sich also deutlich Rechenzeit einsparen. Die komplette genaue Berechnung benötigt mehr als das 7-fache der Rechenschritte der Berechnung auf Basis kritischer Bereiche.

## Weitere Optimierungen

Es können auch noch weitere Optimierungen der Berechnungen implementiert werden. Diese haben allerdings alle nur einen bedingt großen Einfluss auf die Rechenzeit und sollen daher nur am Rande erwähnt werden.

Die erste Möglichkeit besteht darin, nur um einen bestimmten Radius um einen AP dessen Dämpfung zu berechnen, zum Beispiel bis die Received Signal Strength Indication (RSSI) gleich dem Grundrauschen auf Basis der Freiraumdämpfung ist. Diese Variante kann zu relativ großen Einsparungen in der Rechenzeit führen, sofern die Grundfläche entsprechend sehr groß gewählt ist. Bei 2,4GHz WLAN beträgt die Freiraumdämpfung nach 100 Metern 80dB. Sofern man dieses Maß als Grenzwert nimmt, müsste der zu berechnende Grundriss für relevante Zeiteinsparungen also deutlich größer als 100 Meter sein.

Eine andere Möglichkeit wäre eine Optimierung des Algorithmus zur Berechnung auf Basis kritischer Bereiche. So wäre es möglich, nicht alle genauen Felder sofort zu berechnen, sondern beispielsweise nur 5 genauere Felder über die Fläche verteilt. Sollte es hier zu keine Verbesserung der Ergebnisse kommen, so kann man sich den Rest der genaueren Berechnung für dieses Feld sparen (siehe zum Beispiel Abbildung 5.5(b) mitte). Da das allerdings eher selten der Fall ist, fällt der Gewinn in der Praxis entsprechend klein aus.

Man könnte die Auswahl der zu berechnenden kritischen Bereiche auch dem Nutzer überlassen. Er kann dann selbst bestimmen, für welche Bereiche er zusätzlich Informationen benötigt. Kritische Bereiche können aber dennoch hervorgehoben werden, der Nutzer wählt die genauer zu berechnenden dann nur entsprechend aus.

## **6 ACCESS-POINT POSITIONIERUNG**



In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass relativ viele Störfaktoren und entsprechend große Schwankungen auf ein WLAN wirken. Diese Störeinflüsse implizieren einen im allgemeinen niedrigen Genauigkeitsbedarf bei der Abdeckungsbe-  
rechnung und damit die Möglichkeit, mittels eines kurzen Katalogs an einfachen  
Regeln, eine einfache definierte Platzierung von APs vorzugeben.

Mittels dieses Katalogs an Regeln für die Platzierung von APs ist es somit möglich,  
einen einfachen Algorithmus zu implementieren. Dieser soll für einen gegebene  
Grundriss automatisch die APs platzieren, um dem Nutzer die Arbeit anfangs  
zu erleichtern. Mittels dieses Algorithmus soll also eine möglichst gute Standard-  
Abdeckung erreicht werden.

## **6.1 IDEE**

Die Idee ist es, eine automatische AP-Platzierung zukünftig in Computer Aided Net-  
work Design Utility (CANDY) zu integrieren. Dabei soll der Algorithmus später an  
einer sinnvollen Stelle in einem Tool von CANDY integriert werden, um die Arbeit  
an dieser Stelle zu erleichtern.

### **6.1.1 CANDY**

Bei CANDY handelt es sich um ein Projekt des Lehrstuhls Rechnernetze der Fa-  
kultät Informatik, TU Dresden. Ziel des CANDY-Projektes ist es, Werkzeug zur  
Unterstützung der Netzwerkplanung zu schaffen. Dabei wird nicht nur die physi-  
sche Planung betrachtet, sondern auch viele weitere Aspekte wie Kosten, Simula-  
tion und verbesserte Zusammenarbeit zwischen Planer und Kunden. Seit einigen  
Jahren werden CANDY-Tools dabei auf Web-Basis portiert und entwickelt, um die  
Zusammenarbeit noch mehr zu erleichtern und eine hohe Kompatibilität zwischen  
verschiedenen Betriebssystemen zu erreichen.

Für den Planungsprozess ist ein Workflow-Management in CANDY integriert (siehe  
auch [Sch08]). Hier werden Projekte mit deren Basisinformationen (Kundendaten,  
Projektdateien und so weiter) angelegt. In diesem Projekt-Workflow können nun ver-  
schiedene Aufgaben angelegt werden, die den Ablauf des Projekts widerspiegeln.  
Nötige Daten werden dann in diesem Projekt hinterlegt und sind immer über die  
Projekt-Tasks abrufbar.

Die Datenhaltung eines Projekts erfolgt dabei bei CANDY mit Network Design

Markup Language (NDML), einer Beschreibungssprache die im CANDY-Projekt entwickelt wurde. Der Import von Gebäudedaten aus dem Industry Foundation Classes XML (IFCXML)-Format ist dabei auch möglich - so kann direkt mit den Gebäudedaten der Architekten gearbeitet werden.

## 6.1.2 Einbindung

Der zu entwickelnde und implementierende Algorithmus sollte zukünftig als Task im CANDY-Projekt integriert werden können. Der ideale Zeitpunkt für diesen Task muss nach dem Import der Gebäudedaten und vor dem Start einer WLAN-Simulation beziehungsweise vor Absegnung der Planung durch den Kunden stattfinden. Gut geeignet ist eine Integration in den von Thomas Weigelt [Wei10] in seinem großem Beleg entwickelten beziehungsweise von Stefan Bütow ([Büt10a, Büt10b]) in seinem großen Beleg beziehungsweise seiner Diplomarbeit weiterentwickelten Planungstool für WLAN. Dabei kann anstatt der manuellen Platzierung der APs durch einen Planer eine neue Funktion zur automatischen AP-Platzierung integriert werden.

## 6.1.3 Algorithmus

### Listing 6.1: Allgemeiner AP-Algorithmus

```
1 1. Suche Waende mit Daempfung 30dB oder mehr und filtere diese aus
2 2.1. Beginnend von Oben Links je 5 Meter von Aussenwand
3 2.2. Platziere APs alle 15 Meter
4 2.3. Sobald eine ausgefilterte Wand auftaucht
5 2.3.1. beginne ab virtuellem Schnittpunkt mit dieser den Algorithmus
6     rekursiv neu (mit Abstand zum Schnittpunkt) von da an
7 2.3.2. Rücke eine Reihe weiter, Platziere weiter mit 7,5 Meter Versatz
8 2.4. Platziere, bis entweder Schnittpunkt mit ausgefilterter Wand
9     oder Ende Raumplan
10 3. (Optional) Berechne Abdeckung
```

Im Codelisting 6.1 sieht man den Algorithmus zur Platzierung der APs. Bei ihm wird der zweidimensionale Raumplan genommen, und die APs werden nach dem angegebenen Algorithmus platziert.

In Abbildung 6.1 kann man den Ablauf dieses Algorithmus nochmals grafisch verdeutlicht nachvollziehen. Da der Algorithmus sich rekursiv immer wieder selbst aufruft, ist eine komplette Abdeckung der Fläche schnell berechnet. Der implementierte Algorithmus beachtet dabei noch einige Feinheiten und Details, die im

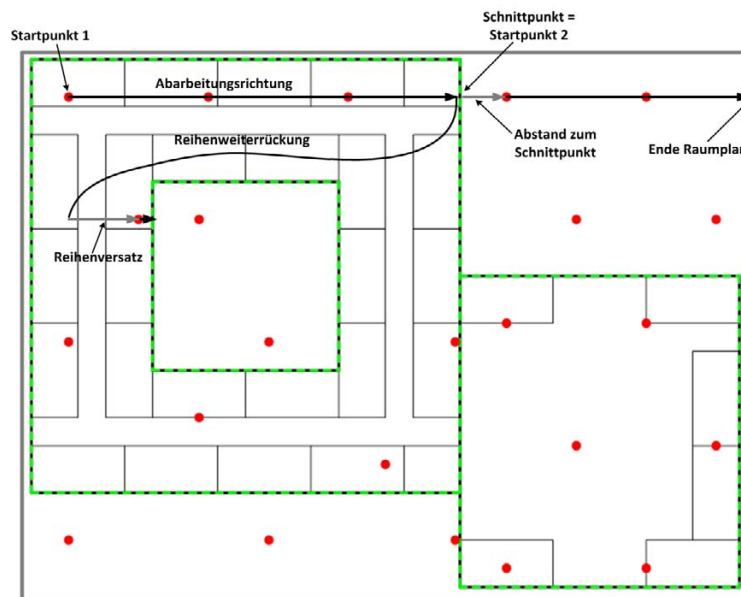


Abbildung 6.1: Grafische Darstellung des Platzierungs-Algorithmus

nächsten Kapitel beschrieben sind. Abgesehen von diesen Details funktioniert er aber genau wie beschrieben und liefert entsprechende Ergebnisse.

## 6.2 IMPLEMENTIERUNG

Den Algorithmus habe ich in Form eines Demonstrationstools implementiert. Dieses Tool läuft im Browser komplett online. Die Platzierung der APs und die Darstellung der entsprechenden Seite erfolgt mit Hypertext Preprocessor (PHP). Bei den Grafiken handelt es sich um Scalable Vector Graphics (SVGs).

Die Verarbeitung der Gebäudepläne erfolgt mittels einer Extensible Markup Language (XML)-Datei. Diese spezifische Datei wird geladen und mit deren Daten werden die APs platziert. In der Anwendung selbst erfolgt die Abarbeitung wie folgt: zuerst wird die XML geladen und alle Wände werden in ein Array geschrieben, dabei werden die Wände mit unter 30dB Dämpfung ausgefiltert. Alle Wände werden außerdem parallel in die SVG gezeichnet, die Wandstärke in der SVG entspricht dabei genau der Dämpfung der Wand in dB (zum Beispiel wird eine Wand mit 10dB Dämpfung in der SVG als 10 Zentimeter starke Wand dargestellt).

Mit Hilfe der Wanddaten in dem Array wird der Algorithmus gestartet, bei jeder AP-Platzierung wird geprüft, ob sich zwischen dem neuen und dem alten AP eine relevante Wand befindet. Weiterhin wird geprüft, ob sich bereits ein AP in der Nähe befindet. Ist das alles nicht der Fall, wird der AP platziert und der Algorithmus läuft weiter. Sollte bereits ein AP in der Nähe sein, wird kein neuer platziert und der

Algorithmus läuft weiter. Sollte eine Wand im Weg sein, so wird der Algorithmus rekursiv neu gestartet vom Schnittpunkt der Wand aus. Nach Abarbeitung des rekursiven Aufrufs läuft der Algorithmus weiter.

Dargestellt wird das Ergebnis in dem Demonstrationstool als SVG, wobei schwarze Linien die Wände darstellen. Deren Stärke entspricht deren Dämpfung. Wände mit über 30dB Dämpfung, die für die Berechnung der APs relevant sind, werden zusätzlich grün gestrichelt, APs werden als roter Punkt dargestellt.

## 6.2.1 Technische Grundlagen

Technisch läuft die Berechnung mittels PHP ab. Hierfür benötigt man nur einen Webserver mit mindestens PHP 5.3. Die Grafik wird als SVG ausgegeben. Durch die Verwendung von SVG-Grundelementen konnte eine maximale Kompatibilität erreicht werden, so funktioniert die Darstellung der Grafik problemlos in den aktuellen Browsern *Google Chrome 11*, *Mozilla Firefox 4* und *Microsoft Internet Explorer 9*.

Listing 6.2: DTD für die XML-Dateien

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <!ELEMENT building ((wall+))>
3 <!ATTLIST building
4   xmax CDATA #REQUIRED
5   ymax CDATA #REQUIRED
6 >
7 <!ELEMENT wall (startPoint, endPoint)>
8 <!ATTLIST wall
9   id CDATA #IMPLIED
10  damping24 CDATA #REQUIRED
11 >
12 <!ELEMENT startPoint EMPTY>
13 <!ATTLIST startPoint
14   x CDATA #REQUIRED
15   y CDATA #REQUIRED
16 >
17 <!ELEMENT endPoint EMPTY>
18 <!ATTLIST endPoint
19   x CDATA #REQUIRED
20   y CDATA #REQUIRED
21 >
```

Die Basis-Gebäudedaten werden aus einer XML-Datei ausgelesen. Diese ist mittels der Document Type Definition (DTD) in Quellcode 6.2 definiert. So ist die Grundstruktur derXML also zuerst ein Gebäude *building* mit den maximalen Ausmaßen des Bebauungsplans in den Attributen *xmax* und *ymax*. Jegliche Maßangaben erfolgen in Zentimeter. Dabei besteht jedes *building* aus einer Zahl von Wänden



*wall*. Diese haben die Attribute *id* zur Identifizierung und *damping24* zur Angabe der Dämpfung im 2,4GHz WLAN in dB. Das Attribut *id* wird allerdings nicht vom Algorithmus verwendet und kann entsprechend weggelassen werden. Jede *wall* wiederum besteht aus einem Startpunkt *startPoint* und einem Endpunkt *endPoint* jeweils mit den Koordinaten *x* und *y* als Argument. Es gilt zu beachten, dass der Ursprung des Koordinatensystems sich oben links befindet.

#### Listing 6.3: Beispiel einer XML-Datei

```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <building xmax="1000" ymax="1000">
3   <wall id="1" damping24="30">
4     <startPoint x="100" y="100">
5     </startPoint>
6     <endPoint x="100" y="700">
7     </endPoint>
8   </wall>
9   <wall id="2" damping24="5">
10    <startPoint x="500" y="100">
11    </startPoint>
12    <endPoint x="500" y="700">
13    </endPoint>
14  </wall>
15  <wall id="3" damping24="30">
16    <startPoint x="900" y="100">
17    </startPoint>
18    <endPoint x="900" y="700">
19    </endPoint>
20  </wall>
21  <wall id="4" damping24="30">
22    <startPoint x="100" y="100">
23    </startPoint>
24    <endPoint x="900" y="100">
25    </endPoint>
26  </wall>
27  <wall id="5" damping24="30">
28    <startPoint x="100" y="700">
29    </startPoint>
30    <endPoint x="900" y="700">
31    </endPoint>
32  </wall>
33 </building>
```

Eine beispielhafte Umsetzung der DTD aus Quellcode 6.2 ist in Quellcode 6.3 zu sehen. Dessen Anwendung mit dem Algorithmus ergibt das in Abbildung 6.2 zu sehende Gebäude.

Funktional wird nach dem Aufrufen der Website der Demo-Anwendung ein Auswahlmenü mit allen im Unterordner *XML* enthaltenen Dateien erzeugt. Wie in Abbildung 6.3 enthält die Demo-Anwendung vier verschiedene Demo-Pläne.

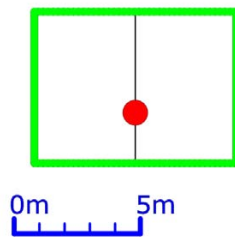


Abbildung 6.2: Grafische Darstellung von demo1.xml

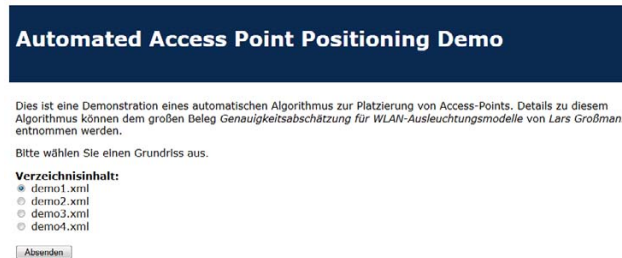


Abbildung 6.3: Auswahlmenü des Algorithmus

Nach Auswahl des Wunschplans wird auf der nächsten Seite direkt der Algorithmus ausgeführt und das Ergebnis direkt dargestellt. Da der Algorithmus sehr schnell arbeitet kommt es zu keiner spürbaren Wartezeit zwischen Auswahl des Gebäudeplans und Darstellung der Ergebnisse.

Die vier Demo-XMLs erzeugen die in Abbildung 6.4 dargestellten Räume. Speziell der aus demo4.xml erzeugte Raum (Abbildung 6.4(d)) stellt dar, wie verschiedenste Wanddämpfungen dargestellt werden. Die Wände sind unterschiedlich dick dargestellt, alle Wände über 30dB Dämpfung sind grün gestrichelt.

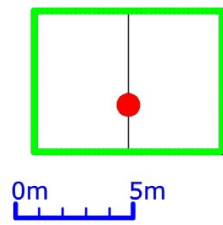
## 6.3 AUSBLICK

Der Algorithmus kann natürlich noch deutlich erweitert werden. Zum einen kann eine automatische Frequenzplanung integriert werden. Außerdem kann der Algorithmus daraufhin optimiert werden, nur innerhalb von geschlossenen Wänden APs zu platzieren und nicht wie jetzt über den gesamten Plan.

Weitere sinnvolle Erweiterungen sind zum Beispiel die automatische Dämpfungsberechnung für Wände, sofern deren Material und Stärke angegeben wird. So könnte der Algorithmus selbst die Wanddämpfung für 2,4GHz und 5GHz WLAN bestimmen.

**Automated Access Point Positioning Demo**

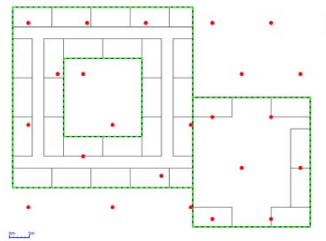
Dies ist eine Demo-Applikation.



(a)

**Automated Access Point Positioning Demo**

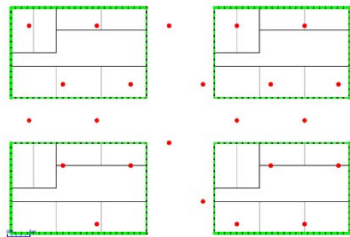
Dies ist eine Demo-Applikation.



(b)

**Automated Access Point Positioning Demo**

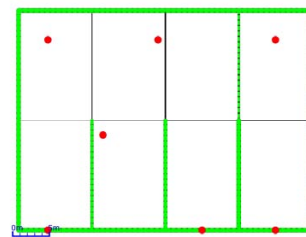
Dies ist eine Demo-Applikation.



(c)

**Automated Access Point Positioning Demo**

Dies ist eine Demo-Applikation.



(d)

Abbildung 6.4: Darstellung der vier Demo-Räume



## **7 FAZIT UND AUSBLICK**



## **7.1 GEWONNENE ERKENNTNISSE**

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Einfluss von verschiedenen Objekten auf ein geplantes WLAN sehr groß sein kann. Die ermittelten Abweichungen bei den Empfangsfeldstärken durch den Einfluss von veränderlichen und festen Objekten kann sich dabei schnell auf über 10dB aufsummieren. Daraus kann man schließen, dass die Berechnung von WLAN-Ausleuchtung mittels strahlenoptischer Modelle im praktischen Betrieb des WLANs völlig überzogen ist. Die Berechnung für den praktischen Betrieb mit seinen verschiedenartigen Einflüssen bedarf nur der Nutzung von semiempirischen Modellen für sinnvolle Genauigkeiten.

Auch eine auf den Zentimeter genaue Berechnung ist wenig sinnvoll im praktischen Betrieb. Es wurde gezeigt, dass eine Genauigkeit von einem bis zwei Metern vollkommen ausreichend für die Berechnung ist. Allein der Einfluss des verwendeten Empfangsgeräts ist schon höher als die Zusatzdämpfung durch zwei Meter mehr Abstand.

Es wurde gezeigt, dass die WLAN-Ausleuchtungsberechnung auf Basis kritischer Bereiche um einen hohen Faktor bis in den zweistelligen Bereich die Berechnung beschleunigen kann. Dabei ist die Implementierung dieser Erweiterung für semiempirische Modelle relativ leicht umzusetzen.

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse konnte ein Algorithmus zur automatischen Platzierung von APs entworfen und beispielhaft in einer Demoapplikation implementiert werden. Dieser zeigt unter Anwendung der Ergebnisse dieses Belegs, dass APs schnell und einfach automatisch platziert werden können. So ist schnell eine Grundlage für die weitere Planung vorhanden. Hier bietet sich auch noch viel Potential für die Erweiterung des Algorithmus um zusätzliche Fähigkeiten.

## **7.2 WEITERGEHENDE BETRACHTUNGEN**

Zukünftig kann der Algorithmus zur Platzierung von APs noch deutlich erweitert werden. Beispielsweise bietet sich die automatische Berechnung der Dämpfung von Wänden abhängig von der verwendeten Frequenz an.

Auch können sicher weitere Beschleunigungen der WLAN-Ausleuchtungsberechnung durch weitere Optimierungen der Algorithmen betrachtet werden.





## **8 ABGABEDATENTRÄGER**



## **ERKLÄRUNG**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig, unter Angabe aller Zitate und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Dresden, 29. April 2011



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

3.1	Allgemeiner Aufbau der Experimente . . . . .	13
3.2	Kanalbelegung anderer WLANs während der Experimente (Bildquelle: inSSIDer 2) . . . . .	14
3.3	Physikalische Effekte bei der Wellenausbreitung . . . . .	14
3.4	Überlagerung von Wellen durch Reflexion . . . . .	15
3.5	Wellenüberlagerung im guten und im schlechten Fall . . . . .	16
3.6	Empfangsfeldstärke: Grundlinie, leeres Regal und Regal mit Ordnern	18
3.7	Möglicher Einfluss von Menschen auf WLAN in einem flachen Bü- roraum . . . . .	19
3.8	Möglicher Einfluss von Menschen auf WLAN in einem hohen Hörsaal	20
3.9	Empfangsfeldstärke: Person stehend zwischen AP und Empfangsgerät	21
3.10	Empfangsfeldstärke: Person bewegt sich zwischen AP und Emp- fangsgerät . . . . .	21
3.11	Empfangsfeldstärke: Bluetooth Maus . . . . .	24
3.12	Empfangsfeldstärke: Bluetooth Headset . . . . .	25
3.13	Empfangsfeldstärke in Abhängigkeit von der Geräteauswahl . . . . .	27

3.14	Antennenausrichtungen, die im praktischen Vergleich verwendet wurden . . . . .	30
3.15	Diagramm der Empfangsfeldstärke in Abhängigkeit von der Antennenausrichtung . . . . .	31
3.16	Kanäle von 802.11g [Cis11] . . . . .	31
3.17	Kanalspektrum von 802.11g [Cis11] . . . . .	32
3.18	Kanalüberlagerung bei vier Kanälen, 802.11g [Cis11] . . . . .	32
3.19	Kanalabdeckung bei 3 bzw. 4 Kanälen . . . . .	33
4.1	Vergleich Genauigkeit Airmagnet Planner, Abb. 4.1(a): 1 Meter, Abb. 4.1(b): 0,15 Meter . . . . .	38
4.2	Vergleich Genauigkeit Psiber RF3D WifiPlanner 2, Abb. 4.2(a): niedrige Genauigkeit, Abb. 4.2(b): unten hohe Genauigkeit . . . . .	40
4.3	Vergleich Empfangsstärke Aerohive Online WifiPlanner, Abb. 4.3(a): Büro, Abb. 4.3(b): Lagerhaus . . . . .	41
4.4	Vergleich Dämpfung CANDY SiteFinder, Abb. 4.4(a): 20cm Genauigkeit, Abb. 4.4(b): 100cm . . . . .	42
5.1	Beispiel: Multi Wall Model . . . . .	50
5.2	Beispiel: Ray-Tracing . . . . .	52
5.3	Beispiel: Ray-Launching . . . . .	52
5.4	Berechnungsschritte in Abhängigkeit der Genauigkeit . . . . .	55
5.5	Darstellung eines Raumes mit Berechnung auf Basis kritischer Bereiche, beispielhafte Darstellung der Aufteilung in Abb. 5.5(b) . . . . .	58
6.1	Grafische Darstellung des Platzierungs-Algorithmus . . . . .	65
6.2	Grafische Darstellung von demo1.xml . . . . .	68
6.3	Auswahlmenü des Algorithmus . . . . .	68

6.4 Darstellung der vier Demo-Räume . . . . .	69
-----------------------------------------------	----





# TABELLENVERZEICHNIS

3.1 Vergleich der Dämpfungen der Baustruktur auf 5GHz und 2,4GHz WLAN[3Co05] . . . . .	17
3.2 Vergleich verwendeter Frequenzen . . . . .	22
3.3 Vergleich der Empfangsempfindlichkeit verschiedener USB WLAN-Adapter . . . . .	26
3.4 Empfangsverlust in Abhängigkeit der Antennenausrichtung [Mac10]	28
3.5 Entfernungsabhängige Genauigkeit . . . . .	34
5.1 Parameter des One Slope Model . . . . .	48
5.2 Parameter des Multi Wall Model . . . . .	49



# QUELLCODEVERZEICHNIS

6.1	Allgemeiner AP-Algorithmus . . . . .	64
6.2	DTD für die XML-Dateien . . . . .	66
6.3	Beispiel einer XML-Datei . . . . .	67



# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A2DP	Advanced Audio Distribution Profile
Abb.	Abbildung
AP	Access Point
CANDY	Computer Aided Network Design Utility
COST 231 HATA	COST 231 Hata Model
COST 231 WI	COST 231 Walfisch-Ikegami Model
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DPPM	Dominant Path Prediction Model
DTD	Document Type Definition
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FSPL	Free Space Loss
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFXML	Industry Foundation Classes XML
ISM	Industrial, Scientific and Medical Band
LAN	Local Area Network

MP3 MPEG Audio Layer III  
MWF COST 231 Multi Wall and Floor Model

NDML Network Design Markup Language

PHP Hypertext Preprocessor

RL Ray-Launching  
RSSI Received Signal Strength Indication  
RT Ray-Tracing

SIG Special Interest Group  
SNR Signal-to-noise ratio (Signal-Rausch-  
Verhältnis)  
SVG Scalable Vector Graphic

USB Universal Serial Bus

WLAN Wireless LAN

XML Extensible Markup Language

# SYMBOLVERZEICHNIS

- a Genauigkeit [ $m$ ].
- f Gewinnfaktor.
- g Genauigkeitsfaktor.
- k Anzahl der Accesspoints.
- s Anzahl Rechenschritte.
- t Zeit [ $s$ ].
- x Breite einer Fläche [ $m$ ].
- y Länge einer Fläche [ $m$ ].





# LITERATURVERZEICHNIS

- [3Co05] 3COM CORPORATION: 3Com Wireless Antennas PRODUCT GUIDE. April 2005. – [http://www.3com.com/other/pdfs/products/en\\_US/101900.pdf](http://www.3com.com/other/pdfs/products/en_US/101900.pdf)
- [Aer10] AEROHIVE NETWORKS, INC.: Aerohive Wi-Fi Planner. Dezember 2010. – <http://www.aerohive.com/planner/>
- [Ale04] ALEXANDER, Bruce E.: 802.11 Wireless Network Site Surveying and Installation. Cisco Press, 2004. – ISBN 1587051648
- [Blu11] BLUETOOTH SIG, INC.: Bluetooth Basics. März 2011. – <http://www.bluetooth.com/Pages/Basics.aspx>
- [Büt10a] BÜTOW, Stefan: Konzeption und Implementierung einer Client-/Server-Software zur Berechnung von WLAN-Ausleuchtungsmodellen / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2010. – Großer Beleg
- [Büt10b] BÜTOW, Stefan: Konzeption und Implementierung webbasierter Tools zur Unterstützung der WLAN-Projektierung in indoor-Szenarien / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2010. – Diplomarbeit
- [CDPA03] CONTI, A. ; DARDARI, D. ; PASOLINI, G. ; ANDRISANO, O.: Bluetooth and IEEE 802.11b coexistence: analytical performance evaluation in fading channels. In: Selected Areas in Communications, IEEE Journal on 21 (2003), Februar, Nr. 2, S. 259 – 269. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2002.807345>. – DOI 10.1109/JSAC.2002.807345. – ISSN 0733–8716

- [Cis10] CISCO CONSUMER BUSINESS GROUP (Hrsg.): Datenblatt Linksys WUSB54GC (EU). : Cisco Consumer Business Group, Dezember 2010. – 8121030NC-AI
- [Cis11] CISCO SYSTEMS, INC.: Channel Deployment Issues for 2.4-GHz 802.11 WLANs. März 2011. – <http://www.cisco.com/en/US/docs/wireless/technology/channel/deployment/guide/Channel.html>
- [CR02] CHIASSERINI, C.F. ; RAO, R.R.: Coexistence mechanisms for interference mitigation between IEEE 802.11 WLANs and Bluetooth. In: INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE Bd. 2, 2002. – ISSN 0743–166X, S. 590 – 598 vol.2
- [DJC98] D. J. CICHON, T. K.: DIGITAL MOBILE RADIO TOWARDS FUTURE GENERATION SYSTEMS COST 231 Final Report, Chapter 4. European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research, 1998
- [Flu10] FLUKE CORPORATION: Airmagnet Survey. Dezember 2010. – <http://www.airmagnet.com/products/survey/>
- [FM03] FILIP MIKAS, Pavel P. Stanislav Zvanovec Z. Stanislav Zvanovec: Measurement and prediction of signal propagation for WLAN systems. (2003)
- [GVDS+03] GOLMIE, N. ; VAN DYCK, R. E. ; SOLTANIAN, A. ; TONNERRE, A. ; RÉBALA, O.: Interference evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11b systems. In: Wirel. Netw. 9 (2003), May, 201–211. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1023/A:1022821110023>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022821110023>. – ISSN 1022–0038
- [Hän05] HÄNEL, Robert: Optimierung der Fachsprache NDML mit Abbildung in eine XML-basierte Datenbank / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2005. – Diplomarbeit
- [Hoc08] HOCHSTETTER, Thomas: Neukonzeption und Implementierung des Netzwerkdesigntools CANDY Site Finder unter der Eclipse Rich Client Platform / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2008. – Diplomarbeit
- [IEE03] IEEE: IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements Part Ii: Wireless LAN

- Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. In: IEEE Std 802.11g-2003 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edn. (Reaff 2003) as amended by IEEE Stds 802.11a-1999, 802.11b-1999, 802.11b-1999/Cor 1-2001, and 802.11d-2001) (2003), S. i –67. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2003.94282>. – DOI 10.1109/IEEESTD.2003.94282
- [Kar06] KARK, Klaus: Antennen und Strahlungsfelder. 2. Friedr. Vieweg und Sohn Verlag, 2006. – ISBN 978–3–8348–0216–3
- [KE97] KAMERMAN, A. ; ERKOCEVIC, N.: Microwave oven interference on wireless LANs operating in the 2.4 GHz ISM band. In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1997. 'Waves of the Year 2000'. PIMRC '97., The 8th IEEE International Symposium on Bd. 3, 1997, S. 1221 –1227 vol.3
- [Len11] LENOVO: Overview - ThinkPad Edge 13. Februar 2011. – <http://www-307.ibm.com/pc/support/site.wss/document.do?sitestyle=lenovo&lndocid=MIGR-74496>
- [LF01] LOTT, M. ; FORKEL, I.: A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation. In: Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd Bd. 1, 2001, S. 464 –468 vol.1
- [LSN01] LANSFORD, J. ; STEPHENS, A. ; NEVO, R.: Wi-Fi (802.11b) and Bluetooth: enabling coexistence. In: Network, IEEE 15 (2001), 10, Nr. 5, S. 20 –27. <http://dx.doi.org/10.1109/65.953230>. – DOI 10.1109/65.953230. – ISSN 0890–8044
- [Mac10] MACNAMARA, Thereza M.: Introduction to Antenna Placement and Installation. 1. John Wiley and Sons, Ltd, 2010. – ISBN 978–0–470–01981–8
- [Met11] METAGEEK, LLC: inSSIDer 2. Januar 2011. – <http://www.metageek.net/products/inssider>
- [PDA11] PDADB.NET: HTC Touch Pro T7272 (HTC Raphael 100) Specs. Februar 2011. – [http://pdadb.net/index.php?m=specs&id=1306&c=htc\\_touch\\_pro\\_t7272\\_htc\\_raphael\\_100](http://pdadb.net/index.php?m=specs&id=1306&c=htc_touch_pro_t7272_htc_raphael_100)
- [PPK+03] PARK, Jin-A ; PARK, Seung-Keun ; KIM, Dong-Ho ; CHO, Pyung-Dong ; CHO, Kyoung-Rok: Experiments on radio interference between wireless LAN and other radio devices on a 2.4 GHz ISM band. In: Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual Bd. 3, 2003. – ISSN 1090–3038, S. 1798 – 1801 vol.3

- [Pre06] PREUSS, Sandro: CANDY - Site Finder: Tool zur Projektierung von WLAN und WiMAX-Netzen / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2006. – Diplomarbeit
- [Psi10] PSIBER DATA SYSTEMS INC.: Psiber RF3D WifiPlanner2. Dezember 2010. – <http://www.psiber.com/en/home/products/wifi-simulation/rf3d-wifiplanner2.html>
- [Sch08] SCHÜTZE, Georg: Entwicklung eines Tools für das CANDY-Projekt zur Organisation der verteilten Bearbeitung von Workflowschritten / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2008. – Diplomarbeit
- [SMC10] SMC NETWORKS INC. (Hrsg.): Datenblatt SMC SMCWUSB-G. : SMC Networks Inc., Dezember 2010
- [TP-10] TP-LINK TECHNOLOGIES CO., LTD. (Hrsg.): Datenblatt TP-Link TL-WN321G. : TP-LINK Technologies Co., Ltd., Dezember 2010
- [Tro06] TROFIMOVA, Taissia: Entwicklung eines Vorschlages zum Standardentwurf der Fachsprache NDML / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2006. – Diplomarbeit
- [Wei10] WEIGELT, Thomas: ENTWICKLUNG WEB-BASIERTER KOMPONENTEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER PLANUNG VON ANWENDUNGS-NEUTRALER VERKABELUNG NACH EN 50173 / Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur, Professur Rechnernetze. 2010. – Großer Beleg
- [Zyr99] ZYREN, Jim: Reliability of IEEE 802.11 Hi Rate DSSS WLANs in a High Density Bluetooth Environment. 6 1999
- [ZyX11] ZYXEL COMMUNICATIONS CORP.: WLAN-Chipsätze in ZyXEL WLAN-Komponenten. Februar 2011. – [http://www.zyxel.de/web/faq.php?x=&mod\\_id=2&id=104](http://www.zyxel.de/web/faq.php?x=&mod_id=2&id=104)