

# WLAN und WLAN-Antennen



Ronald Nitschke  
Alexander Heine  
Christian Pelz

Potsdam, 02. Juli 2003

<http://www.802.11b.de.ms>

# Inhaltsverzeichnis

Einführung.....	3
Allgemeines zum Antennenbau.....	3
Frequenzbänder für drahtlose Übertragungen .....	4
Standards für die drahtlose Kommunikation .....	5
Das ISM-Frequenzband .....	5
Rechtliche Einschränkungen bei der Benutzung von WLAN .....	7
Signalausbreitung.....	8
Dämpfung.....	9
Weitere Effekte bei Signalausbreitung .....	9
Mehrwegeausbreitung.....	10
Multiplex .....	11
Raummultiplex (Space Division Multiplexing, SDM):.....	11
Frequenzmultiplex (Frequency Division Multiplexing, FDM): .....	12
Zeitmultiplex (Time Division Multiplexing .TDM):.....	12
Codemultiplex (Code Divison Multiplexing, CDM):.....	12
Modulation.....	13
Amplitudenumtastung (Amplitude Shift Keying, ASK): .....	13
Frequenzumtastung (Frequency Shift Keying, FSK): .....	14
Phasenumtastung (Phase Shift Keying, PSK): .....	14
Roaming.....	14
Das Hidden-Station-Problem in WLANs.....	15
Arten von Antennen .....	16
Bauanleitung für eine Hohlleiterantenne .....	16
Bauanleitung für eine W-LAN Bi-Quad Antenne .....	17
Testen der gebauten Antennen.....	19
Verfahren zum Prüfen von Antennen .....	19
Das Testen unserer Antennen .....	20
Ausblick.....	21
Abbildungsverzeichnis.....	22
Quellenangaben.....	23

## Einführung

Dieser Artikel beschäftigt sich vorrangig mit dem drahtlosen lokalen Netzwerk (wireless LAN, WLAN) und mit den Möglichkeiten zum Eigenständigen Bau von Antennen für dieses Anwendung.

Bei der Beschäftigung mit diesem Thema kommt man aber nicht darum herum, sich auch mit weiteren Gebieten zu beschäftigen. Wir werden deshalb auch, neben den technischen und rechtlichen Aspekten des WLAN's, etwas auf Frequenzen im Datenfunk und zum Antennenbau allgemein eingehen.

Die Autoren sehen sich aber selber als Einsteiger in dem komplexen Gebiet der Hochfrequenztechnik, so dass wir hier natürlich nur einen kleinen Einblick geben können.

Vielmehr ist es unser Ziel zu zeigen, wie man mit relativ einfachen und leicht beschaffbaren Mitteln sowie etwas handwerklichem Geschick, selber in der Lage sein sollte eine Antenne zu konstruieren.

Als Basis hierfür werden wir auf hauptsächlich auf Anleitungen aus dem Internet zurückgreifen. Diese nachbauen und prüfen welche Leistungssteigerungen man erzielen kann, bzw. ob sie überhaupt wie erhofft funktionieren.

Hierbei können wir natürlich nur einige Exemplare fertigen, da der Bau einer Antenne nicht nur mit technischem Aufwand verbunden ist, sondern je nach Antenne auch eine finanzielle Belastung darstellt.

Wir hoffen, dass uns bei der Erarbeitung des vorliegenden Textes keine Fehler unterlaufen sind. Sollte das dennoch der Fall sind wir für derartige Hinweise und auch für Anregungen dankbar.

## Allgemeines zum Antennenbau

Das elektromagnetische Felder zur Nachrichtenübertragung genutzt werden können entdeckte schon im Jahre 1886 der Physiker Heinrich Hertz. Er erzeugte das Sendesignal mit einer Funkenstrecke. Elektronenröhren oder Transistoren waren damals noch nicht verfügbar. Daher spricht man hier auch von der Funktechnik.

Erst später entdeckte man, dass lange Drähte die Reichweite der Sendeanlagen erheblich steigern konnten. Dabei hatte der Draht die Aufgabe die vom Sender abgegebene Hochfrequenz (HF) als elektromagnetische Welle in die Umgebung abzugeben. Damit war das Prinzip der Antenne angewendet worden.

Antennen übertragen das zu sendende Signal von einem Leiter, zum Beispiel einem Koaxialkabel, in den Raum und umgekehrt. Ein und dieselbe Antenne ist gleichermaßen zum Senden und Empfangen fähig. Antennen sind allerdings von der Frequenz der zu übertragenden Signale abhängig. Sie arbeiten immer nur in einem bestimmten Frequenzbereich. Das erschwert zwar den Bau, gerade im HF-Bereich, da eine hohe Genauigkeit nötig ist. Andererseits wäre eine ‚universelle Antenne‘, die alle Frequenzen gleichgut bedienen könnte, praktisch unbrauchbar, da sich dann am Empfänger alle möglichen Signale, zum Beispiel von Rundfunk, Sprechfunk und WLAN, überlagern würden. Dadurch würden die gewünschten Signale durch das Rauschen, das die Signale auf den anderen Frequenzen erzeugen, untergehen. Eine gute Antenne ist deshalb genau auf die zu nutzende Frequenz abgestimmt. Es können auch mehrere Antennen parallel verwendet werden um eine bessere Qualität der Signale zu erreichen. Hierbei ist aber zu beachten, dass die Phasenverschiebungen der einzelnen Antenne, die durch die Laufzeitunterschiede entstehen, ausgeglichen werden. Sonst können sich im schlechtesten Fall die Signale der Antenne durch Interferenzen auslöschen.

# Frequenzbänder für drahtlose Übertragungen

Datenübertragung mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen kann auf vielen verschiedenen Frequenzen realisiert werden. Jeder Frequenzbereich besitzt dabei charakteristische Vor- und Nachteile die Berücksichtigt werden müssen. Die folgende Abbildung gibt eine grobe Übersicht über die Frequenzbereiche.

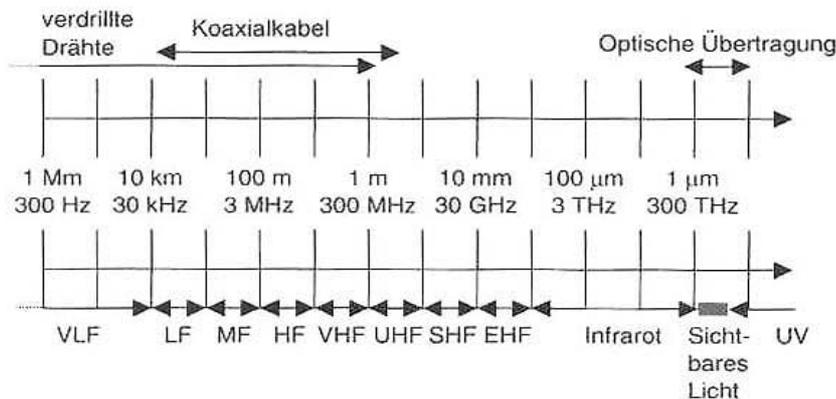


Abbildung 1 : Frequenzspektrum (Datenübertragung)

Die in der Abbildung dargestellte Wellenlänge  $\lambda$  ist über die Gleichung  $\lambda = c / f$  direkt an die Frequenz  $f$  gekoppelt.  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s ist hierbei die konstante Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

In herkömmlichen drahtgebundenen Netzen werden verdrillte Kupferadern für Frequenzen bis zu einigen 100 MHz genutzt. Koaxialkabel übertragen mehrere hundert MHz (z.B. Kabelfernsehen). In dem Bereich von mehreren hundert THz werden Glasfaserleitungen eingesetzt.

Die Funkübertragung beginnt in Bereichen von wenigen kHz, dem Very-Low-Frequency-Bereich (VLF). Diese Frequenzen können sich, wie die Frequenzen des Langwellenbereichs (Low Frequency, LF), im Wasser und entlang der Erdkrümmung ausbreiten. Sie werden z.B. zur Kommunikation bei U-Booten genutzt. Die Benutzung der WLAN-typischen Frequenzen im 2,4 GHz-Band, dem Mikrowellenbereich wäre hier natürlich undenkbar. Der Effekt von Mikrowellen auf Wasser sollte spätestens seit der Verbreitung des Mikrowellenherdes jedem bekannt sein.

Höhere Frequenzen im Bereich von 174-230 MHz (Very High Frequency, VHF) und 470-790 MHz (Ultra High Frequency, UHF) werden für die analoge TV-Übertragung genutzt. Neuerdings wird in diesem Bereich auch der digitale Rundfunk (Digital Audio Broadcasting, DAB) und das digitale Fernsehen (Digital Video Broadcasting, DVB) ausgestrahlt. GSM-Mobiltelefone arbeiten bei 1800 MHz.

Mikrowellenverbindungen nutzen typischerweise Frequenzen aus dem SHF- (Super High Frequency) Bereich, der zwischen 2 und 40 GHz liegt. Weitere Anwendungen in diesem Bereich sind zum Beispiel Satellitenverbindungen. Es sind auch schon Systeme im EHF- (Extremely High Frequency) Bereich geplant, der sehr nahe am Infrarotbereich liegt.

Alle diese Frequenzen werden reguliert, um Interferenzen zu minimieren. In Deutschland werden Frequenzen von 9 kHz bis 275 GHz reguliert. Zuständig ist dafür die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP).

Im IR- (Infrarot) Bereich werden neben den leitungsgebundenen Übertragungsverfahren mit Hilfe von Glasfaserkabeln auch drahtlose Verfahren eingesetzt. Beispiele hierfür sind Datenübertragungen zwischen Gebäuden mit Lasern. Die am meisten verbreitete IR-Technologie ist IrDA (Infrared Data Association), die Wellenlängen von 850 bis 900 nm benutzt, um Geräte wie z.B. Laptop, PDA oder Mobiltelefone miteinander zu vernetzen.

Noch höhere Frequenzen im Bereich des sichtbaren Lichts werden schon seit Tausenden Jahren eingesetzt.

## Standards für die drahtlose Kommunikation

Funkfrequenzen sind eine kostbare Ressource. Alle nutzbaren Frequenzen sind heutzutage praktisch belegt. Nationale Regelungen erschweren eine international einheitliche Regelung zusätzlich. Für die weltweite Regelung und Vergabe ist die ITU (International Telecommunications Union) in Genf zuständig. Die ITU ist eine Unterorganisation der VN (Vereinten Nationen). ITU-R (ITU – Radiocommunication sector) stellt die Untergruppe dar, die für den Bereich der drahtlosen Kommunikation, und somit für die weltweite Frequenzplanung, zuständig ist.

Damit eine weltweite Koordinierung überhaupt eine Chance hat, wurde die Welt in drei Regionen aufgeteilt. Zur Region 1 gehören zum Beispiel Europa der Nahe Osten, die Staaten der früheren Sowjetunion und Afrika. Die Region 2 umfasst Nord- und Südamerika und Grönland. In der Region 3 sind die Länder des Fernen Ostens, Australien und Neuseeland.

Innerhalb dieser Regionen sind wieder regionale Behörden zuständig. In Europa ist das die CEPT (European Conference for Posts and Telecommunications).

Die ITU-R hält regelmäßig die so genannte World Radio Conference (WRC) ab, um eine Harmonisierung der genutzten Frequenzen zu erzielen. Hier werden Frequenzbelegungen für alle drei Regionen diskutiert und weltweite Standards vorbereitet.

Da oft in den verschiedenen Regionen, die Frequenzen nicht harmonisieren, werden für ähnliche Techniken oft andere Frequenzbereiche genutzt (siehe Tabelle).

	Europa	USA	Japan
Mobiltelefone	GSM 890 – 915 MHz 935 – 960 MHz 1710 – 1785 MHz 1805 – 1880 MHz	TDMA, CDMA, GSM 1850 – 1910 MHz 1930 – 1990 MHz	PDC 810 – 826 MHz 940 – 956 MHz 1429 – 1465 MHz 1477 – 1513 MHz
Schnurlose Telefone	CT2 864 – 868 MHz	PACS 1850 – 1910 MHz 1930 – 1990 MHz	PHS 1895 – 1928 MHz
	DECT 1880 – 1900 MHz	PACS-UB 1910 – 1930 MHz	JCT 254 – 380 MHz
Drahtlose LANs	IEEE 802.11 2400 – 2483 MHz	IEEE 802.11 2400 – 2483 MHz	IEEE 802.11 2471 – 2497 MHz
	HIPERLAN 1 5176 – 5270 MHz		

**Tabelle 1 : Frequenzzuweisungen**

Der Bereich der drahtlosen lokalen Netze (wireless LAN, WLAN) ist insbesondere für die mobile Kommunikation zwischen Computern innerhalb von Gebäuden oder auf Firmengeländen geeignet. Hier gibt es bereits eine Vielzahl von Produkten die vorrangig im lizenzfreien ISM-Band arbeiten.

### Das ISM-Frequenzband

Wireless LAN nutzt das **ISM**-Band. Die Abkürzung ISM steht für "Industrial, Scientific and Medical", also für Hochfrequenzgeräte in Industrie, Wissenschaft und Medizin. ISM-Frequenzen sind international zugewiesene Frequenzen, die von Hochfrequenzgeräten und Hochfrequenzanlagen genutzt werden können. Die Frequenzbereiche des ISM-Bandes sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

6765 - 6795 kHz	40,66 - 40,7 MHz	24 - 24,25 GHz
13553 - 13567 kHz	433,05 – 434,79 MHz	61 - 61,5 GHz
26957 - 27283 kHz	<b>2400 – 2500 MHz</b>	122 - 123 GHz
	5725 – 5875 MHz	244 - 246 GHz

**Tabelle 2 : ISM-Frequenzbänder**

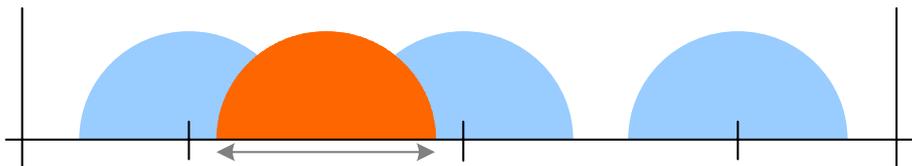
Der attraktivste Bereich liegt hier bei 2,4 GHz und ist mit nahezu weltweit verfügbar. Es gibt aber national divergierende Restriktionen bzgl. Sendeleistung und Bandbreite.

Beispiele für die Nutzung dieser Frequenzen sind Mikrowellenherde, Kurzwellenbestrahlung in der Medizin, aber eben auch WLAN und Bluetooth. Durch die dabei unvermeidbaren Ausstrahlungen von Störstrahlungen können die ISM-Frequenzen für Funkanwendungen in der Nähe von Hochfrequenzgeräten gestört werden. Es sollte kein Problem darstellen eine WLAN-Gerät auch in der näheren Umgebung eines Mikrowellenherd zu platzieren, doch bei einer hohen Dichte von WLAN-, bzw. Bluetooth-Geräten, z.B. bei Kongressen, kann es schon zu bemerkbaren Störungen der Datenübertragung kommen. Das WLAN-Band hat 13 Kanäle.

Kanal	Frequenz	Kanal	Frequenz
1	2412 MHz	8	2447 MHz
2	2417 MHz	9	2452 MHz
3	2422 MHz	10	2457 MHz
4	2427 MHz	11	2462 MHz
5	2432 MHz	12	2467 MHz
6	2437 MHz	13	2472 MHz
7	2442 MHz		

**Tabelle 3 : WLAN-Kanäle im 2,4 GHz-Band**

Direkt nebeneinander liegende Frequenzbänder überschneiden sich hier und können so untereinander zu Interferenzen führen, da ein Kanal eine Bandbreite von etwa 22 MHz hat, der Abstand zwischen den Kanälen aber nur 5 MHz beträgt. Wenn in einem engeren Umfeld mehrere WLAN-Netze betrieben werden ist es also ratsam einen Abstand von 6 Kanälen einzuhalten.



**Abbildung 2 : Kanalüberlagerungen im WLAN-Band**

Die 13 Kanäle stehen aber nicht immer zur Verfügung. Hier gibt es nationale Unterschiede. In Deutschland sind alle 13 zur Nutzung freigegeben. In Frankreich nur die Kanäle 10 bis 13, in den USA 10 bis 11. Da Funkfrequenzen nur begrenzt zur Verfügung stehen, und nicht wie z.B. drahtgebundene Übertragungsmedien einfach erweitert werden können, sollte deren Verwendung optimal genutzt werden. Es lag daher nahe, die ISM-Frequenzen für bestimmte Funkanwendungen vorzusehen. Eine Anwendung von ISM-Frequenzen ist möglich, wenn es nicht so sehr auf eine störungsfreie Funkverbindung ankommt, oder Störungen nur vorübergehend auftreten und hingenommen werden können und nur kurze Entfernungen zu überbrücken sind. Ziel der Gerätehersteller war es, Geräte zu entwickeln, die ohne gesonderte Anmeldung und gebührenfrei von jedermann frei genutzt werden dürfen.

## Rechtliche Einschränkungen bei der Benutzung von WLAN

Bei der drahtlosen Datenübertragung sind Interferenzen zwischen den verschiedenen Übertragungen ein Hauptproblem. Das ist auch der Hauptgrund, warum praktisch alle Frequenzen reguliert sind. In Deutschland ist dafür die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) zuständig.

Grundsätzlich ist zum betreiben eines WLAN-Hotspots keine Genehmigung der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) erforderlich.

Die Sendeleistung der gesamten WLAN-Anlage darf aber 20 dBm nicht überschreiten. 20 dBm bedeutet, dass bei einer Sendeleistung von einem Milliwatt eine Verstärkung um 20 dB erlaubt ist. Das entspricht einer Sendeleistung von 100 mW. Wenn eine WLAN-Karte mit 15 dBm sendet und die angeschlossene Antenne eine Verstärkung von 8 dB bringt, dann muss das dazwischen liegende Verbindungskabel mindestens eine Dämpfung von 3 dB haben um den rechtlichen Ansprüchen zu genügen. Sollte eine Anlage mit überhöhter Leistung betrieben werden kann das mit Geldbußen und dem Entzug der Sendeanlage geahndet werden. Allerdings ist es für die RegTP sehr schwierig solche Verstöße festzustellen. Angesichts der sehr beschränkten Reichweite müssten die entsprechenden Messungen schon in unmittelbarer Nähe zum Sender vorgenommen werden, gerade auch da die Signalstärke mit der Entfernung exponential abnimmt. Aber gerade deshalb ist es natürlich wichtig, dass jeder bei der Nutzung von Antennen selber auf die Einhaltung der Bestimmungen achtet.

In den USA ist es vorgeschrieben, dass der Anschluss von Accesspoint zur Antenne mit einem SMA-Stecker zu versehen ist, um die Nutzung von Antennen mit höherer Leistung, z.B. aus dem Amateurfunkbereich die über N-Stecker verfügen, zu unterbinden. Solche Regelungen haben aber auch nur so lange Wirkung bis ein SMA-N-Adapter auf dem Markt ist. Also höchstens ein paar Wochen.

In anderen Gegenden, zum Beispiel dem australischen Outback, werden WLAN-Anlagen mit mehreren Watt Leistung benutzt um entsprechend große Strecken zu überbrücken. Hier werden dann neben Richtantennen auch Verstärker, so genannte Booster, zur Leistungssteigerung eingesetzt.

Beim neueren, aber in noch nicht weit verbreiteten, WLAN-Standard 802.11a, der im 5 GHz-Band arbeitet, ist eine Sendeleistung bis zu einem Watt möglich.

Die ersten Verfügungen zur WLAN-Nutzung erlaubten nur den Betrieb von Access-Points innerhalb der Grenzen eines Grundstückes. Heute kann noch eine Genehmigung benötigt werden, wenn man eine Richtfunkstrecke, über die Daten für Dritte fließen, über Grundstücksgrenzen hinweg betreibt.

Der Standpunkt der Regulierungsbehörde ist es, hier eine freizügige und unbürokratische Nutzung zu gewährleisten. Die Nutzer brauchen die Geräte nicht anmelden oder Gebühren entrichten. Dafür kann ihnen aber auch nicht eine Betrieb ohne Störungen garantiert werden, die durch andere Funkanwendungen in diesem Bereich auftreten können.

## Signalausbreitung

In jedem Kommunikationsnetz gibt es Sender und Empfänger. Es gibt grundlegende Unterschiede zwischen drahtlosen Netzen und leitungsgebundenen Netzen in der Signalausbreitung. In leitungsgebundenen Netzen breitet sich das Signal entlang des Leiters ( Koaxialkabel, Glasfaser, usw. ), der Leiter gibt die Art der räumlichen Ausbreitung vor. In drahtlosen Netzen ist die Signalausbreitung von vielen Faktoren abhängig, z.B. Geländeform, atmosphärische Bedingungen, Bäume, Gebäude etc.

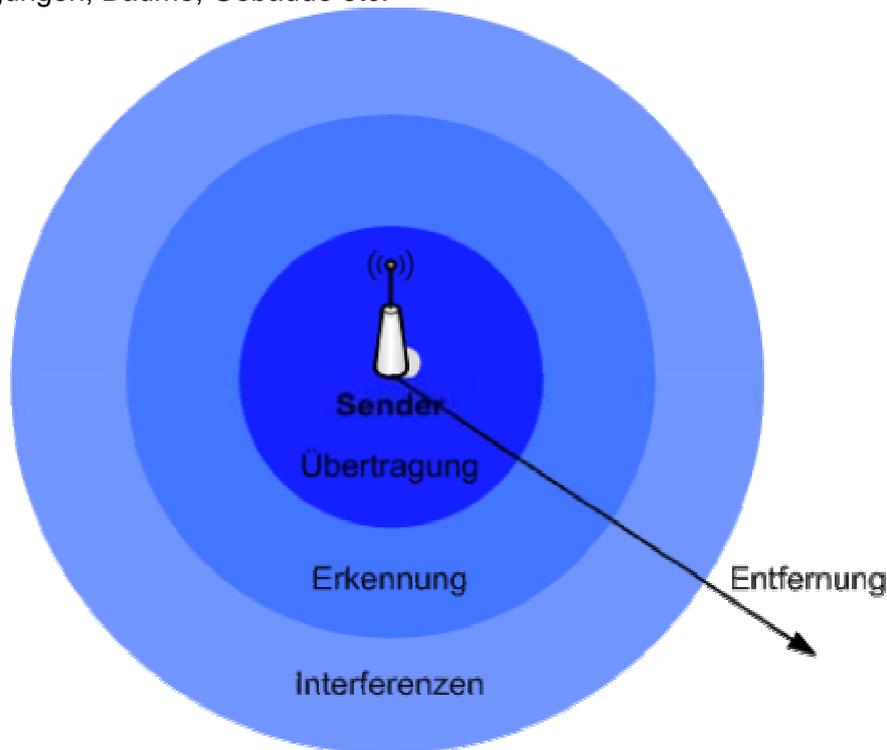


Abbildung 3 : Signalausbreitung (isotrope)

In Leiter kann sehr präzise ein Vorhersage über die Stärke und Reichweite eines Signals gemacht werden. Diese Vorhersage kann für drahtlose Netze nur im Vakuum, ohne Materie zwischen Sender und Empfänger, vorgenommen werden. Idealerweise kann man drahtlose Signalausbreitung durch diese Abbildung darstellen.

Man diese Signalausbreitung in drei Entfernungsbereiche unterteilen, den Übertragungsbereich, den Erkennungsbereich und den Interferenzbereich.

Im Übertragungsbereich ist eine Übertragung möglich. Der Empfänger empfängt innerhalb dieses Bereiches Signale des Senders mit einer kompensierbaren Fehlerrate. Diese Fehlerrate ist klein genug, um die gesendeten Daten wiederherstellen zu können. Eine Datenübermittlung in beide Richtungen (Sender wird zum Empfänger und anders herum) möglich.

In einem größeren Bereich um den Sender, kann der Empfänger noch erkennen, dass der Sender noch sendet, aber die Fehlerrate ist so hoch, dass keine Rekonstruktion der Daten mehr möglich ist. Der Sender hebt sich noch von dem Hintergrundrauschen ab.

Der letzte Bereich ist der Interferenzbereich, dieser ist der größte Bereich. In diesem kann der Empfänger nicht mehr feststellen, ob der Sender noch sendet. Der Sender trägt dann zum Hintergrundrauschen bei und ab einer gewissen Stärke des Rauschens kann dann ein anderer Empfänger keine Signale mehr von Sendern interpretieren.

Natürlich ist diese Darstellung ein ideales Schema und die Ausbreitung auf der Erde sind eher bizarr geformten von Polygonen. Die Ausbreitung hängt auch noch von der Sendefrequenz und der Dämpfung ab.

## Dämpfung

„Dämpfung“ bedeutet eine Schwächung der elektrischen Energie, mit der ein Signal übertragen wird.

Ohne Hindernisse breiten sich elektromagnetische Wellen, im freien Raum, geradlinig aus, genauso wie Licht. Eine direkte, gerade Verbindung zwischen Sender und Empfänger wird als Sichtverbindung (Line Of Sight, LOS) bezeichnet. Auch ohne Materie zwischen Sender und Empfänger verliert ein Signal in Abhängigkeit vom Abstand zum Sender dennoch an Leistung. In einem Punkt der den Abstand  $r$  zum Sender (dieser sendet mit der Leistung  $P_0$ ) hat, ist nur noch  $P_r \approx P_0/r^2$ .

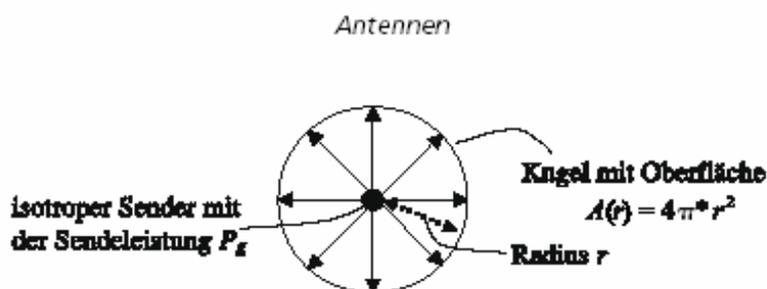


Abbildung 4 : Sendeleistung

Das resultiert aus dem Phänomen, das ein Punktstrahler bei Aussendung eines Signals mit Lichtgeschwindigkeit, die Signalenergie gleichmäßig auf eine Kugeloberfläche verteilt, deren Radius mit Lichtgeschwindigkeit wächst. Die Kugeloberfläche berechnet sich nun in Abhängigkeit vom Radius  $r$  mit  $s = 4 \pi r^2$ .

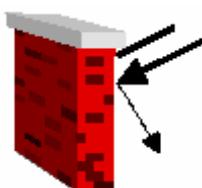
Es gibt auch noch andere Parameter, die die Signalausbreitung stören. Die empfangene Leistung hängt wesentlich von der Wellenlänge und der Richtcharakteristik der Antenne ab. Dies wird natürlich noch komplexer, wenn sich Objekte zwischen Empfänger und Sender befinden. Als Objekte sind nicht nur Gegenstände zu verstehen, sondern auch die Atmosphäre die Erde, Regen, Schnee, Nebel, Dunst, Smog und andere Verunreinigungen. Beispielsweise durch starken Regen kommen Mobilfunksysteme zur Beeinträchtigung. Wasser kann sehr viel abgestrahlte Energie absorbieren, deshalb ist ein Baum in der LOS für WLAN ein großes Hindernis.

Es ist von der Frequenz abhängig, ob Funkwellen in Objekte eindringen können oder nicht. Niedrigfrequente Signale durchdringen Objekte besser als solche mit hoher Frequenz. Langwellen können Ozeane durchdringen und bereits Signale im EHF-Bereich, werden durch ein Blatt am Baum blockiert.

## Weitere Effekte bei Signalausbreitung

Wenn sich Hindernisse zwischen Sender und Empfänger befinden, treten noch weitere Effekte bei der Signalausbreitung auf.

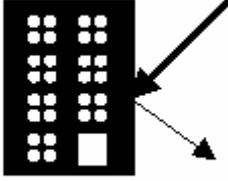
### Abschattung(Shadowing) :



Ist eine extreme Form der Dämpfung. Aufgrund eines großen Objektes wird die freie Signalausbreitung behindert. Je höher die Frequenz eines Signals ist, desto mehr verhält es sich wie Licht. Deshalb können bei hoher Frequenz bereits relative kleine Objekte eine Abschattung verursachen.

Abbildung 5 : Shadowing

### **Reflektion (Reflection):**



Wenn ein Objekt zur Wellenlänge groß genug ist, wird das Signal reflektiert. Das Signal hat nach der Reflektion eine kleinere Stärke, da die Objektoberfläche einen Teil absorbiert. Reflektion kann aber auch positiv genutzt werden, da gerade in Städten die Reflektion den Empfang ermöglicht.

Abbildung 6 : Reflection

### **Streuung (scattering):**



Bei der Streuung wird ein Signal an einem Objekt in mehrere schwächere Signale aufgespalten, die in verschiedene Richtungen weiterlaufen.

Abbildung 7 : Scattering

### **Beugung (diffraction):**



Radiowellen werden an Kanten von Hindernissen von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Damit lassen sich Empfänger erreichen die hinter Bergen liegen.

Abbildung 8 : Diffraction

## **Mehrwegeausbreitung**

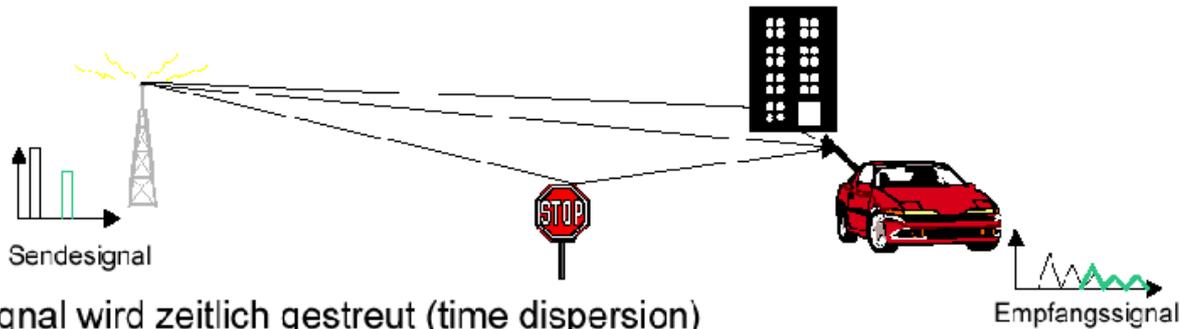
Auf Grund der verschiedenen Ablenkungseffekte erreichen ausgesendete Signale einen Empfänger oftmals auf mehreren Wegen. Diese Mehrwegeausbreitung stellt eines der größten Probleme der drahtlosen Kommunikation dar.

Probleme:

- Je nach zurückgelegtem Weg kann das Signal unterschiedlich stark sein.
- Je nach zurückgelegtem Weg erreichen die Signale den Empfänger zu unterschiedlichen Zeiten (Laufzeitdispersion).

Typische Werte der Laufzeitdispersion in Innenstädten liegen bei 3  $\mu$ s, allerdings können bis zu 15  $\mu$ s beobachtet werden.

Das GSM-System kann Laufzeitunterschiede von bis zu 16  $\mu$ s tolerieren, was einer Weglängen-Differenz von knapp 5 km entspricht.



Signal wird zeitlich gestreut (time dispersion)

→ Interferenz mit Nachbarsymbolen

Direkte und phasenverschobene Signalanteile werden empfangen

→ je nach Phasenlage abgeschwächtes Signal

Abbildung 9 : Mehrwegausbreitung

## Multiplex

Die Mehrfachnutzung eines Mediums durch verschiedene Nutzer wird allgemein als Multiplex bezeichnet. Multiplexverfahren beschreiben, wie verschiedene Nutzer ein gemeinsames Medium mit möglichst wenig Beeinflussung nutzen. In der drahtlosen Kommunikation können Multiplexverfahren in vier verschiedene Dimensionen eingesetzt werden: *Raum, Zeit, Frequenz und Code*.

### ***Raummultiplex (Space Division Multiplexing, SDM):***

Bei Raummultiplex werden den Kanälen  $k_i$  bis  $k_j$  jeweils dem Raum  $s_i$  bis  $s_j$  zugewiesen. Dadurch sind die Kanäle räumlich getrennt und können sich nicht mehr gegenseitig stören. Der Raum zwischen den Interferenzbereich  $s$  wird als Schutzabstand bezeichnet.

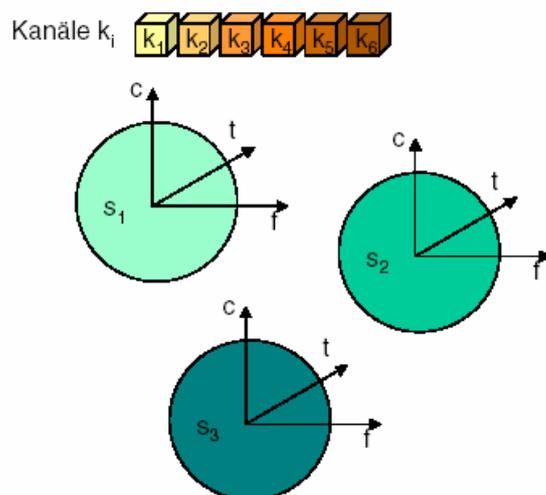


Abbildung 10 : Raummultiplex

## ***Frequenzmultiplex (Frequency Division Multiplexing, FDM):***

Unter Frequenzmultiplex werden alle die Verfahren zusammengefasst, die das Frequenzspektrum in mehrere, nicht überlappende Frequenzbänder aufteilen. Jedem Kanal  $k_i$  wird nun ein exklusives Frequenzband zugewiesen. Ein Sender kann dieses Frequenzband kontinuierlich nutzen. Wiederum ist ein Schutzabstand zwischen den Bänder nötig. Bei WLAN würde dies eine enorme Verschwendung der ohnehin knappen Frequenzressourcen bedeuten. Die feste Frequenzzuweisung macht das Verfahren also sehr unflexibel und begrenzt die Anzahl der Sender stark.

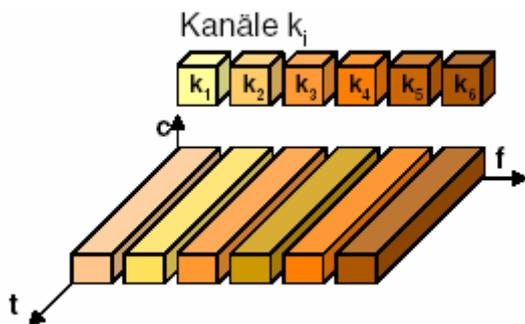


Abbildung 11 : Frequenzmultiplex

## ***Zeitmultiplex (Time Division Multiplexing .TDM):***

Bei diesem Verfahren kann ein Kanal  $k_i$  den gesamten Frequenzbereich für eine gewisse Zeit für sich alleine beanspruchen. Alle Sender nutzen also die gleiche Frequenz aber zu unterschiedlichen Zeiten. Es sind auch hier wieder gewisse Schutzabstände einzuhalten, in diesem Fall sind es kurze Pausen zwischen den Belegung einer Frequenz durch verschiedene Kanäle.

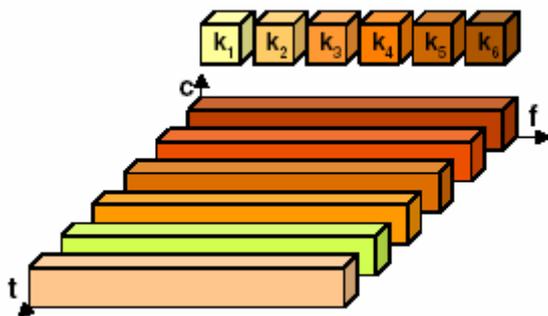


Abbildung 12 : Zeitmultiplex

## ***Codemultiplex (Code Divison Multiplexing, CDM):***

Alle Kanäle  $k_i$  nutzen bei dieser Technik zur selben Zeit dieselbe Frequenz zur Datenübertragung. Die Trennung der einzelnen Kanäle erfolgt in diesem Verfahren durch die Vergabe

eines eigenen, speziellen Codes pro Kanal. Auch hier finden sich wieder Schutzabstände zwischen unterschiedlichen Kanälen, jetzt aber realisiert durch Code.

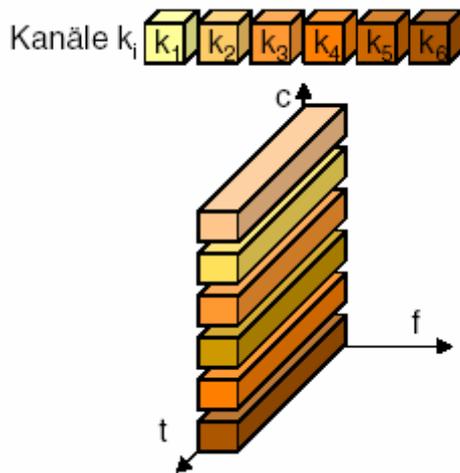


Abbildung 13 : Codemultiplex

## Modulation

Digitale Modulation wird immer dann benötigt, wenn das Medium, über das die Daten übertragen werden sollen, nur analoge Übertragung zulässt.

In drahtlosen Netzen ist jedoch keine digitale Übertragung möglich, daher muss der binäre Bitstrom in analoge Signale umgewandelt werden. Modulationsarten Amplituden-, Frequenz und Phasenmodulation.

### Amplitudenumtastung (Amplitude Shift Keying, ASK):

- Die binären Werte 0 und 1 werden hierbei durch unterschiedliche Amplituden einer Sinusschwingung dargestellt.

#### Amplitudenumtastung bei 50% Modulationsgrad

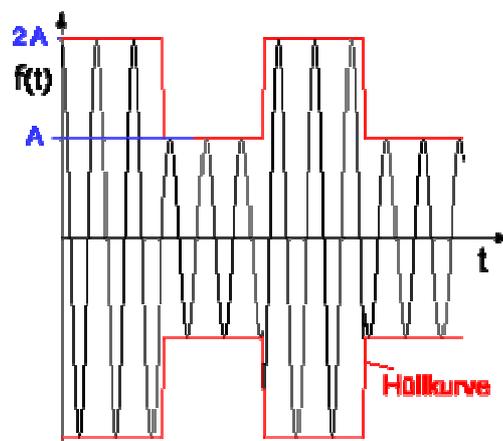


Abbildung 14 : Amplitudenmodulation

## **Frequenzumtastung (Frequency Shift Keying, FSK):**

- Die einfachste Variante weist der binären 1 die Frequenz  $f_1$  und der binären 0 eine andere Frequenz  $f_2$  zu.

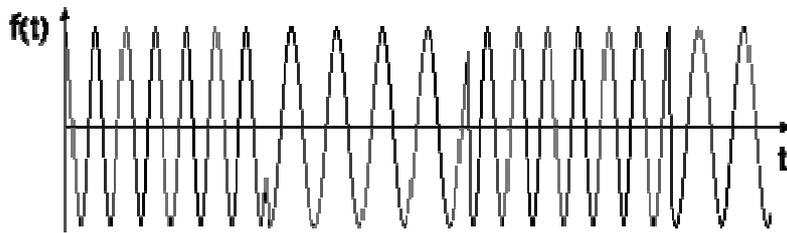


Abbildung 15 : Frequenzmodulation

## **Phasenumtastung (Phase Shift Keying, PSK):**

- Das dritte grundlegende Modulationsverfahren ist die Phasenmodulation. Codiert binäre Daten in Phasensprünge eines Signals. Z.B Phasensprünge von 180 Grad bzw.  $\pi$ , um Daten zu repräsentieren.

### **Phasenumtastung bei einem Phasensprung von 180°**

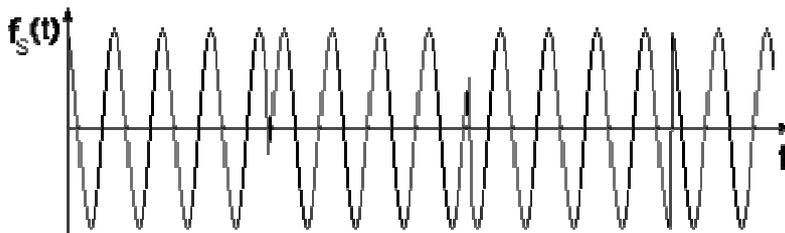


Abbildung 16 : Phasenmodulation

## **Roaming**

Da die Reichweite eines einzelnen Access Points beschränkt ist, benötigt man oft ein Netz aus mehreren Access Points, um eine ausreichende Abdeckung zu gewährleisten. Sobald sich ein Benutzer mit seinem Endgerät bewegt, muss es automatisch von einem Access Point zum anderen wechseln können. Dieser Wechsel wird Roaming genannt.

Im Gegensatz zur Verbindungsübergabe wird unter Roaming meist ein umfangreicher, komplexer Wechsel des Netzzuganges verstanden.

## Ablauf des Roamings:

1	Eine Station stellt fest, dass das Signal von Access Point1 zu schwach wird und sucht einen neuen AP bei dem der Empfang besser ist (Scanning).
2	Bei der Suche wird nach aktiver und passiver Suche unterschieden. Bei einer passiven Suche (passives Scanning) hört die Station zum Finden anderer Netze in das Medium hinein. Beim aktiven Suchen (active scanning) wird eine Probe auf jedem Kanal gesendet und auf eine Antwort abgewartet. Die Antwort auf eine Probe sowie ein Beacon-Frame enthalten alle nötigen Informationen, um an einem neu gefundenen BSS teilzunehmen.
3	Nun wählt die Station den für sie besten Access Point, beispielsweise auf der empfangenen Signalstärke basierend, und sendet eine Anfrage zur Aufnahme an den gewählten Zugangspunkt.
4	Der neue Zugangspunkt antwortet mit association response. Fällt diese positive aus, war das Roaming erfolgreich. Sonst geht die Suche weiter.
5	Nimmt der neue Access Point die Station auf meldet sich diese noch bei dem alten AP ab, damit dieser noch die entsprechenden Ressourcen für weitere Stationen wieder frei geben kann.

## Das Hidden-Station-Problem in WLANs

- Problem: Station A hört Übertragungen von AP, nicht aber von Station B →Kollisionsgefahr!
- Ursache: z.B. Dämpfung durch Hindernisse (Mauern, Bäume, etc.) oder zu große Entfernung zwischen den Stationen
- Lösung: Vor einer Übertragung müssen sich die Stationen einigen, wer senden darf!

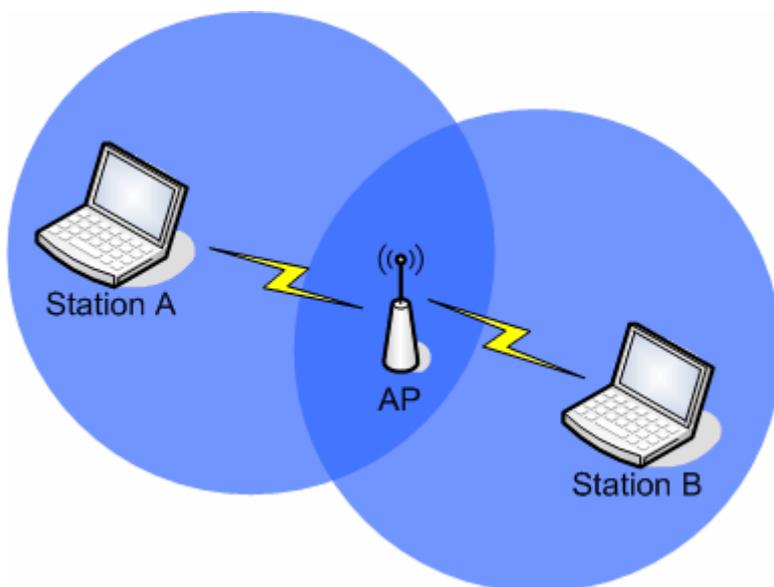


Abbildung 17 : Hidden-Station

## Arten von Antennen

Man unterscheidet im Allgemeinen die Antennen zwischen Rundstrahlantennen und Richtstrahlantenne. Je nach dem Verwendungszweck sollen sie die abgestrahlte Energie über ein großes Gebiet verteilen oder möglichst nur auf einen Punkt richten. Als Einsatzgebiete der Rundstrahlantennen seien die öffentlichen Fernseh- und Radiodienste genannt. Aber auch die Mobiltelefonie und die Navigationssysteme. Es gibt einen Sender und viele Empfänger. Eine Beispielantenne im WLAN Bereich ist der Omnistrahler.

Die Einsatzgebiete einer Richtstrahlantenne, die wie schon erwähnt ihre Sende- und Empfangsleistung nur auf einen Punkt richtet, sind zum Beispiel Punkt zu Punkt Verbindungen. Auch Satellitenverbindungen und drahtlose Richtfunknetze dienen als Beispiel. Es gibt einen Sender und einen Empfänger. Eine Beispielantenne im WLAN Bereich ist die Yagiantenne. Eine Hohlleiterantenne oder auch Dosenantenne genannt besitzt auch eine Richtwirkung und ist außerdem verhältnismäßig leicht selbst nachzubauen.

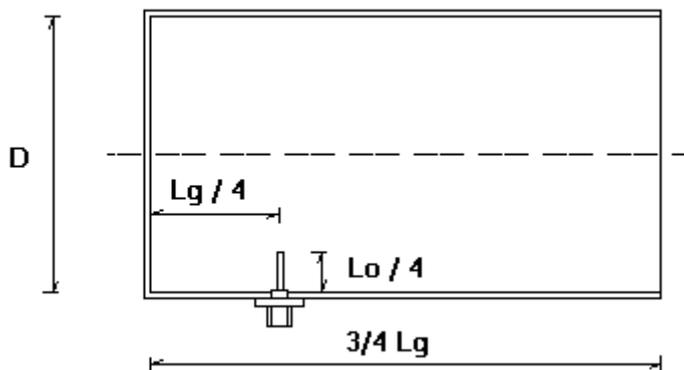
## Bauanleitung für eine Hohlleiterantenne

Als erstes benötigt man eine Dose mit einem Außendurchmesser zwischen 90 und 110 mm. Sie sollte nicht zu kurz sein. Umso kleiner der Durchmesser ist desto länger sollte die Dose sein. Eine Pringeldose, als klassische WLAN Antenne genannt, ist zum Beispiel schlecht geeignet. Sie müsste mit ihrem 74 mm Durchmesser über 800 mm lang sein. Als besonders effektive Antenne hat sich eine Dose mit 98 mm Durchmesser und 180 mm Länge herausgestellt. Mit etwas Glück findet man eine solche Bauart als Kaffeedose im Supermarkt.

Außerdem benötigt man eine N-Buchse die später in die Dose eingesetzt wird. Zu finden für ca. 2€ bei [www.reichelt.de](http://www.reichelt.de). Als Verbindung zwischen Antenne und der WLAN-Baugruppe benutzt man ein Koaxialkabel mit einer Impedanz (Wellenwiderstand) von  $50 \Omega$ . Ein wichtiger Punkt hierbei ist die unvermeidliche Dämpfung des Kabels die in Dezibel pro Meter (dB/m) angegeben wird. Bei Koaxialkabeln ist die Faustregel, dass dünnere Kabel mehr dämpfen als dickere. Es ist eine hohe Qualität des Kabels nötig um keinen zu starken Verlust des Signals zu verzeichnen. Wenn man hier am falschen Ende spart und ein billigeres dafür aber auch qualitativ schlechteres Kabel verwendet, verliert man schnell die gewonnene Leistung der Antenne im Widerstand des Kabels. Schon 5 Meter billiges Kabel, das aber auch schon ohne weiteres 1€ pro Meter kosten kann, können bei 2,4 GHz den gesamten Gewinn einer 9-dBi-Dosenantenne schlucken. Hochwertiges Kabel wird auf dieser Distanz kaum mehr als 1 dB Dämpfung verursachen, kann aber auch leicht 5€ pro Meter kosten.

Als nächstes benötigt man einen Erreger. Hierzu eignet sich ein Kupferdraht mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Länge von 40 mm. Zu finden ist ein solcher Draht in einem entsprechendem Kupferkabel, das es in jedem Baumarkt zu kaufen gibt. Man isoliert einfach ein Stück des Kabels ab. Es ist darauf zu achten das man ein gerades Stück benutzt. Falls es nötig ist kann man es durch mehrmaliges einspannen in einen Schraubstock begradien.

Da man nun alle nötigen Materialien zusammen hat, beginnt die Berechnung der Position des Erregers und der Erregerlänge. An diesem Punkt soll nicht weiter auf die nötigen Formeln eingegangen werden. Es empfiehlt sich die Benutzung des Onlinerechners von Marsak Oleno unter: [www.myteron.de/wavehan/waveguide/antenna2calc.php](http://www.myteron.de/wavehan/waveguide/antenna2calc.php).



**Abbildung 18 : Berechnung Dosenerreger**

Mit einer Frequenz von 2,437 MHz (die dem Kanal 6 des WLAN-Bandes zugeordnet ist) und einem Dosendurchmesser von 98 mm ergeben sich folgende Werte. Die Erregerlänge beträgt 31 mm ( $L_o/4$ ) und der Abstand zwischen Boden und Erreger ist 45 mm ( $L_g/4$ ).

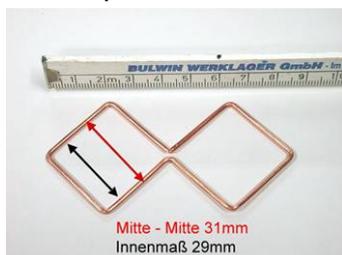
Man bohrt also mit einem Abstand von 45 mm ein Loch in die Dose. Dessen Durchmesser sollte 15 mm betragen, da dort später die N-Buchse montiert wird. Der Abstand wird von dem Mittelpunkt des Loches bis zum inneren Boden der Dose gemessen. Eventuell sollte der Lack im Umkreis des Loches entfernt werden damit die N-Buchse besseren Kontakt hat.

Nun beginnt die Vorbereitung des Erregers. Der Kupferdraht muss auf eine Länge von 31 mm zugeschnitten werden. Hierbei ist es besonders wichtig, dass genau gearbeitet wird. Bei einer Wellenlänge des WLAN's von nur 12,2 cm würde schon eine geringe Ungenauigkeit die Qualität der Antenne extrem negativ beeinflussen. Es ist auch darauf zu achten das man einen geraden Schnitt durchführt und keine Grad hinterlässt. Dieser sollte mit Sandpapier oder einer Pfeife vorsichtig entfernt werden. Nun verlötet man den Erreger im 90° Winkel mit der N-Buchse. Der Abstand zwischen der Oberkante der N-Buchse und der Oberkante des Erregers sollte dann 31 mm betragen. Man sollte darauf achten, dass die Teile beim verlöten sehr heiß werden können. Es ist deshalb zu empfehlen die N-Buchse vorsichtig in einen Schraubstock zu spannen und den Kupferdraht mit einer Zange zu halten. Am besten führt man diese Arbeit zu zweit durch.

Den fertigen Erreger montiert man dann mit einer Mutter in dem vorbereiteten Loch der Dose. Die fertige Hohlleiterantenne kann nun zum Beispiel mit einem Pigtail an eine entsprechende PCMCIA Karte des Laptops angeschlossen werden. Damit steht dem ersten Test der Antenne nichts mehr im Weg.

## Bauanleitung für eine W-LAN Bi-Quad Antenne

Man fertigt die Antenne aus einer ganz normalen 25er CD-Spindel. Alles was man braucht ist der Spindelhalter und eine CD. Die CD-Spindel wird mit einer Säge gekürzt. Die Länge des gekürzten Mittelteils sollte 18 mm betragen. Mit einer feinen Rundfeile erzeugen wir die Schlitze die unsere "Quadbrille" später fixieren sollen. Ein 25cm langes Stück 2,5mm<sup>2</sup> Kupferkabel dient als Material für den Quad. Genau nach 29 mm setzt man die Zange an und biegt scharf rechtwinklig um. Auch bei jedem weiteren Biegevorgang immer auf die 29mm achten, so dass sich ein Mitte-Mitte Kupferdraht Maß von ca. 30-31mm ergibt. Hier sind noch einmal die Dimensionen der "Brille" aufgeführt.





Das Innenmaß bezieht sich auf den verwendeten 2,5mm<sup>2</sup> Kupferdraht. Wichtig ist das Mitte-Mitte Draht Maß! Die "dritte Hand" hilft beim verzinnen der Brille. So sollte es in etwa aussehen, wenn man mit dem Verzinnen fertig ist. Wenn man nur ein kurzes Antennenkabel verwendet, kann man sehr flexibles RG 174, 50 Ohm verwenden. Gibt's z.B. bei Conrad.

Für längere Distanzen ist es ungeeignet. Hier sieht man, wie das Kabel an die Brille angelötet wird. Es werden Innen- und Außenleiter wie in der Abbildung in der Mitte des Quad angelötet.



Der Quad steht nun kurz davor auf dem Halter fixiert zu werden. Es empfiehlt sich noch die Brille mit einem Schutzlack zu überziehen. Der Kupferdraht oxidiert sonst sehr schnell. Es ist darauf zu achten, dass der Quad gleichmäßig 16mm über dem Boden der Spindel angebracht wird. Gegebenenfalls die Schlitzlöcher noch einmal korrigieren. Mit zwei Tropfen Heißkleber wird die CD auf dem Halter fixiert. Nun wird die Quad Brille auf dem Halter mit Heißkleber fixiert. Die Brille wird nunmehr durch den Heißkleber in Position gehalten. Auf der Rückseite wird ebenfalls Heißkleber angebracht, um eine Zugentlastung für das Antennenkabel zu erhalten.

## Testen der gebauten Antennen

Zum vergleichen der Leistung von WLAN-Antennen gibt es keine vordefinierten Benchmarks, wie etwa bei Prozessoren. Zu unterschiedlich sind die Anforderungen die an die Antennen gestellt werden. Eine passive Antenne die eine Rundumabdeckung sicherstellen soll kann nicht den gleichen Gewinn haben wie Richtantenne, die nur in einen begrenzten Bereich strahlt. Dazu kommen eine Vielzahl von Antennenparametern die in die Messung mit einbezogen werden müssten und auch vom Messaufbau sind die Ergebnisse abhängig. Bei Messungen sind Abweichungen von bis zu 1 dB ohne weiteres möglich.

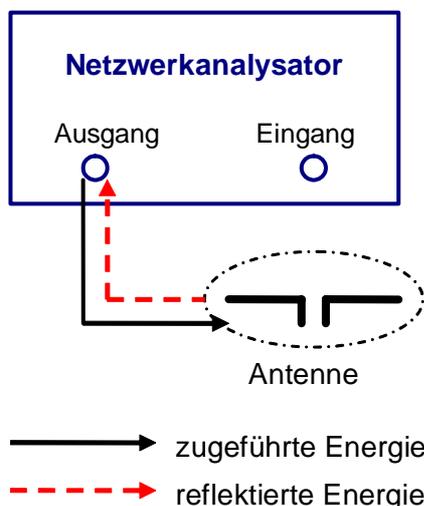
Der Gewinn einer Antenne wird üblicherweise in dBi angegeben. Das bedeutet Dezibel bezogen auf den isotropen Strahler. Bell ist ein Logarithmus zur Basis 10 der bezogenen Einheit. Zehn Milliwatt entspricht gegenüber einem Milliwatt eine Steigerung um einen Bell (10 dB). 100 Milliwatt zu einem Milliwatt entspricht 20 dB. Eine Antenne mit einer Verstärkung von 30 dBi wurde also mit der tausendfachen Leistung des isotropen Strahlers in die Hauptsenderichtung gesendet.

Um eine Verdopplung der Reichweite zu erreichen ist allerdings eine Vervierfachung der Sendeleistung (6 dBi) notwendig.

### Verfahren zum Prüfen von Antennen

Um Antennen zu prüfen kann man zum einem den Leistungsgewinn messen, der sich anhand der Signalstärke bzw. der Reichweite ablesen lässt.

Mann überprüft aber auch die Anpassung der Antenne auf den zu nutzenden Frequenzbereich. Hierzu benutzt man einen Netzwerkanalysator. Als erstes wird das Gerät kalibriert um die Eigenschaften der angeschlossenen Kabel, etc. herauszurechnen.



Ein Netzwerkanalysator enthält einen HF-Generator, mit dem nach Anschluss der Antenne ein Signal in einem vorher festgelegten Frequenzbereich in die Antenne eingespeist wird.

Bei der Frequenz, für die die Antenne optimiert ist, wird sie ein Maximum der durch den HF-Generator zugeführten Energie abstrahlen. Wird nur wenig oder gar keine Energie abgestrahlt, ist die Antenne für diesen Bereich nicht geeignet.

Es wird nun die Energie gemessen die die Antenne nicht abstrahlt, sondern zum Netzwerkanalysator zurück reflektiert. Dieses Signal sollte bei einer guten Antenne im vorgesehenen Frequenzbereich gegen Null laufen.

Hierbei spricht man von der s11-Messung. s11-Messwerte von -10 dB gelten als sehr gut. Ein Wert von -3 dB bedeutet hingegen, dass die Hälfte der eingespeisten Leistung nicht abgenommen wird.

Abbildung 19 : s11-Messaufbau (Schema)

Den Leistungsgewinn einer Antenne wird mit Hilfe einer s21-Messung festgestellt. Hierbei wird die zu untersuchende Antenne wieder an den Ausgang des Netzwerkanalysators angeschlossen. Eine geeichte Referenzantenne wird an den Eingang angeschlossen. Der Abstand zwischen beiden Antenne soll mindestens das Vierfache der Wellenlänge  $\lambda$  (Fernfeld) betragen. Beim 2,4 GHz-Band reicht hier in etwa ein halber Meter.

Der HF-Generator erzeugt jetzt auf einer speziellen Frequenz, hier aus dem WLAN-Band, mit einem genau definierten Pegel ein Signal. Das Signal wird über die Testantenne abgestrahlt und mit der Referenzantenne aufgefangen und zum Eingang des Netzwerkanalysa-

tors geleitet. Hier wird, unter Berücksichtigung der Referenzantenne und der verwendeten Kabel, der Empfangspegel gemessen und die Verstärkung errechnet.

Bei dieser Messung ist eine genaue Ausrichtung und Aufstellung der Antennen wichtig. Eine Änderung von Abständen und Senderichtungen der Antennen macht die Messergebnisse unvergleichbar, da der Signalpegel ja mit zunehmender Entfernung abnimmt, und bei Richtantennen nur in der Hauptsenderichtung am stärksten ist.

Auch Temperaturschwankungen sind zu berücksichtigen, da sich mit der Temperatur auch die Größe zum Beispiel des  $\lambda/4$ -Erregers ändern. Damit werden aber auch wieder die Frequenzeigenschaften beeinflusst.

## **Das Testen unserer Antennen**

Da uns bis heute leider keinerlei Messtechnik zur Verfügung stand mussten wir uns auf das Messen der Leistungssteigerung, der Antennen beschränken. Hierzu haben wir als erstes eine Referenzmessung mit Hilfe von Karten des Typs ‚Avaya Wireless PC Card (Silver)‘ an einem Laptop ohne zusätzliche Antenne gemacht.

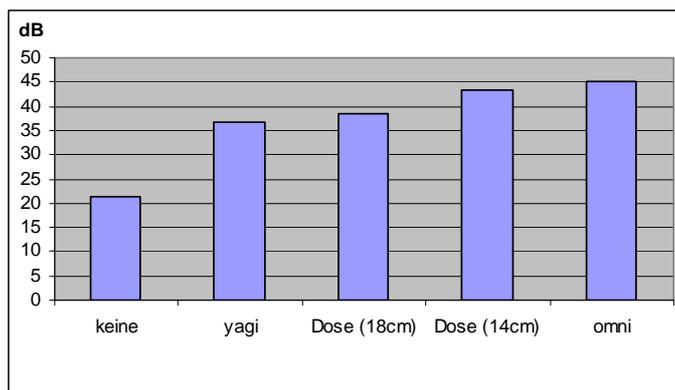
Die Sendeleistung der verwendeten Karten beträgt 35 Milliwatt (15 dBm).

Als Gegenstelle wurde ein Access-Point verwendet und die empfangene Signalstärke gemessen.

Danach wurde derselbe Versuch mit einer Antenne an der PC-Karte des Laptops gemacht. Getestet wurde vier Antennen. Zwei Industrieprodukte und zwei selbstgebaute Dosenantennen.

Die für den WLAN-Bereich konzipierte Yagiantenne erzielte die beste Leistung. Bei ihr hat sich die Empfangsleistung fast verdoppelt. Sie wird also in etwa eine Leistung von 6 dBi erreichen. Die Dosenantenne mit einer Länge von 14 cm erreichte nahezu die gleiche Verstärkung. Muss aufgrund ihrer Richtcharakteristik aber auf die Gegenstelle ausgerichtet sein.

Die zweite Selbstbauantennen mit einer Länge von 18 cm erzielte eine um 80 Prozent höhere Signalstärke als ohne zusätzliche Antenne. Die Yagiantenne erreichte eine Leistungssteigerung von etwas über 72 Prozent. Bei dieser Antenne handelt es sich aber um eine Antenne die für den Amateurfunkbereich gedacht ist und nicht optimal auf das WLAN-Band zugeschnitten ist. Ausserdem ist bei ihr eine sehr genaue Ausrichtung notwendig. Ein Faktor der auch zu Leistungseinbussen führen kann.



**Abbildung 20 : Antennenleistung im Vergleich**

## Ausblick

Bei einer Weiterentwicklung des WLAN's, dem Standard IEEE 802.11a, werden Daten von bis zu 54 Mbit/sec mit einer Sendeleistung von maximal einem Watt auf einer Frequenz von bis zu 5,7 GHz übertragen. Damit wird der Selbstbau von Antennen natürlich erheblich komplizierter. Die Wellenlänge beträgt etwas mehr als fünf Zentimeter. Damit ist eine noch höhere Präzision bei der Konstruktion erforderlich. Des Weiteren erhöht sich die Dämpfung in den Kabeln zwischen Antenne und Karte erheblich, so dass sich der Gewinn einer Antenne sehr schnell vermindern kann. Eine Alternative ist da vielleicht der Standard IEEE 802.11g, der mit ebenfalls 54 Mbit/sec im 2,4 GHz-Band arbeitet. Dann könnten vorhandene Antennen und auch andere 802.11b-konforme Technik weiterverwendet werden, da 802.11g zu 802.11b abwärtskompatibel ist.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Frequenzspektrum (Datenübertragung) .....	4
Abbildung 2 : Kanalüberlagerungen im WLAN-Band .....	6
Abbildung 3 : Signalausbreitung (isotrope) .....	8
Abbildung 4 : Sendeleistung.....	9
Abbildung 5 : Shadowing.....	9
Abbildung 6 : Reflection .....	10
Abbildung 7 : Scattering .....	10
Abbildung 8 : Diffraction .....	10
Abbildung 9 : Mehrwegausbreitung.....	11
Abbildung 10 : Raummultiplex.....	11
Abbildung 11 : Frequenzmultiplex .....	12
Abbildung 12 : Zeitmultiplex .....	12
Abbildung 13 : Codemultiplex.....	13
Abbildung 14 : Amplitudenmodulation.....	13
Abbildung 15 : Frequenzmodulation.....	14
Abbildung 16 : Phasenmodulation.....	14
Abbildung 17 : Hidden-Station.....	15
Abbildung 18 : Berechnung Dosenerreger .....	17
Abbildung 19 : s11-Messaufbau (Schema) .....	19
Abbildung 20 : Antennenleistung im Vergleich.....	20
Tabelle 1 : Frequenzzuweisungen .....	5
Tabelle 2 : ISM-Frequenzbänder.....	6
Tabelle 3 : WLAN-Kanäle im 2,4 GHz-Band .....	6

## Quellenangaben

- Jochen Schiller: Mobilkommunikation, Techniken für das allgegenwärtige Internet Addison-Wesley Verlag, München, Deutschland, 2000
- c't, magazin für computertechnik, Heise Verlag, 2003
- Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP), <http://www.regtp.de>
- TU Berlin, <http://www.tu-berlin.de>
- FU Berlin, <http://www.fu-berlin.de>
- Ping e.V. ,<http://www.ping.de>
- Finnische Seite zu HF-Technik, <http://www.saunalahti.fi/elepal/antenna2calc.php>