

# WLAN-Antennen

## Auszug aus einer Bachelorarbeit von Michael Reimann

Wesentliche Hardware-Komponenten bei der Planung von WLANs sind die eingesetzten Antennen. Im folgenden Kapitel werden deshalb die Einsatzmöglichkeiten der bekanntesten Antennentypen im Rahmen von WLAN erläutert und der Eigenbau einer Yagi-Antenne beschrieben.

### 1 Arten und Charakteristiken von WLAN-Antennen

Bei aller Verschiedenheit der existierenden Antennentypen gibt es einige grundlegende Kriterien, die für den Einsatz maßgeblich sind. Diese sind die Form der Wellenausbreitung (engl. "propagation pattern") und das Maß der Verstärkung (engl. "gain").

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Ausbreitungsmuster, die omnidirektionalen und die direktionalen Antennen. Omnidirektionale Antennen senden kreisförmig in horizontaler Richtung, d.h. der Empfang ist dann am besten, wenn man sich auf der selben Höhe befindet und am schlechtesten direkt unter der Antenne. Direktionale Antennen ermöglichen, wie der Name schon sagt, die Ausrichtung der Wellen in einer bestimmten Richtung. Eine häufig verwendete Anordnung ist z.B. ein Access-Point mit einer Omnidirektionalen Antenne, auf die ein Client-Rechner seine direktionale Antenne richtet. Wegen der verwendeten hohen Frequenz wird zwischen den Antennen Sichtverbindung (engl. "line of sight") benötigt, d.h. zwischen Punkt A und B sollten sich keine physikalischen Hindernisse wie Gebäude, hohe Hecken, Mauern oder dergleichen befinden. Auch Bäume können ein Hindernis darstellen. Da die Wellen die Luft durchdringen müssen, leidet die Verbindungsqualität auch unter hoher Luftfeuchtigkeit, Regen oder Schneefall. Die Qualität eines Signals wird als "Signal-to-noise ratio" (SNR) angegeben. Der Signal/Rauschabstand gibt an, um welchen Pegel sich das Signal über den Grundrauschen am Empfänger abhebt. Ist das Verhältnis zu klein, so können keine Daten mehr empfangen werden. Umgangssprachlich sagt man in diesem Fall: „Das Signal geht im Rauschen unter“.

Oftmals stimmen die Charakteristiken der mitgelieferten Sendeantennen an WLAN-Accesspoints nicht mit dem geforderten Ausleuchtungsgebiet überein. Die meisten Hersteller von WLAN-Systemen bieten daher ein breites Spektrum an zusätzlichen Antennen an. Durch die Wahl der richtigen Antenne kann der eine oder andere zusätzliche Access-Point eingespart und das Signal dadurch in einer bestimmten Umgebung optimiert werden.

WLAN arbeitet im 2,4 GHz ISM Band mit einer Mittenfrequenz von 2,450GHz. Darauf sind die meisten Antennen angepasst, um einen symmetrischen Wellen Reflexionsverlauf zu gewährleisten. Äußerst wichtig ist eine optimale Verbindung zwischen dem Sender und der Antenne. Da es sich bei der eingesetzten Wellenlänge bereits um Mikrowellen handelt, sind auch entsprechende Kupplungen und Stecker zu verwenden. Die Kabel- und Steckereigenschaften können anhand von Datenblättern meist schnell ermittelt und entsprechend gewählt werden.

Im Bezug auf die Wellenausbreitung gibt es jedoch kein „Patentrezept“. Abhilfe kann hier nur die Wahl der „richtigen“ Antenne schaffen. Deshalb sollte bereits bei der Planungsphase vor allem auch auf Behinderungen in der Wellenausbreitung geachtet werden.

#### **Behinderungen können sein:**

- *Absorbtionen*
- *Biegungen*
- *Blockierungen*
- *Brechungen*
- *Durchdringungen*
- *Reflexionen/Mehrwegeempfang*

Alle hier aufgeführten Punkte wirken sich als Dämpfungsfaktor aus und können das Signal zum Teil vollständig auslöschen.

Bei Antennen ist es auch besonders wichtig, dass diese zueinander ausgerichtet sind. Dies muss nicht immer über eine direkte Sichtverbindung erfolgen. Eine Verbindung kann z. B. auch über eine reflektierende Hauswand aufgebaut werden.

**Generell ist zu sagen, dass die in einem System eingesetzten Antennen möglichst...**

- *...die gleiche Mittenfrequenz aufweisen*
- *...die gleiche Polarisationssebene benutzen*
- *...abgeschirmt von Störquellen sein*
- *...nicht auf Störquellen ausgerichtet sein*

## 1.1 Signalverstärkende Eigenschaften von Antennen

Um das Maß des Antennengewinns in einem Zahlenwert angeben zu können, soll nachfolgend der Begriff dBi (dB-„Verstärkung“) erläutert werden:

Ein Access-Point besitzt z.B. eine Sendeleistung von ca. 35mW (Milliwatt) an einem 50Ohm Abschluss. Dies entspricht einem Wert von 15dBm (dB, bezogen auf 1 Milliwatt). Um den Verstärkungsgrad einer Antenne in einer Zahl auszudrücken, wird dieser Zahlenwert jedoch in dBi angegeben; also auf die Verstärkung „i“ bezogen. Wird nun diese Sendeleistung an einen isotropen Kugelstrahler gelegt, so ergibt dies eine äquivalente Strahlungsleistung von 15dBm EIRP. Der Wert dB gibt somit den Gewinn in der Hauptstrahlrichtung gegenüber einem isotropen Kugelstrahler an, welcher einen Antennengewinn von 0dBi besitzt. Folgendes Beispiel soll dies veranschaulichen:

**Rechenbeispiel:**

- *Sendeleistung am Access-Point: 10dBm (10mW)*

- Gewinn der Antenne: 5dBi

*EIRP = Sendeleistung [dBm] + Antennengewinn [dBi]*

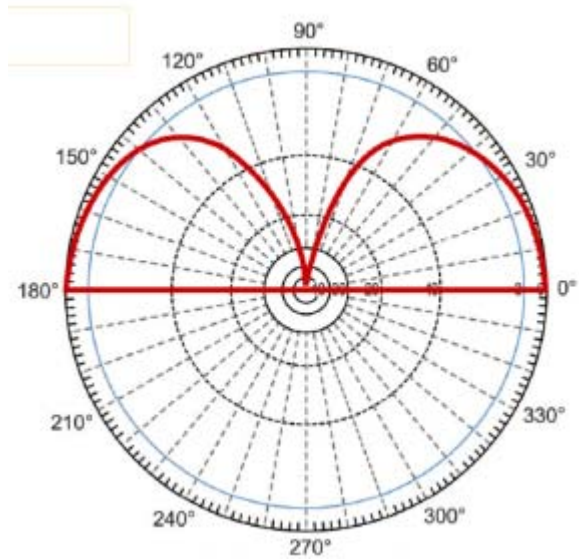
*Ergebnis: 10dBm + 5 dBi = 15dBm EIRP*

Die Abstrahleigenschaft einer Antenne unterscheidet sich meist deutlich zwischen horizontaler und vertikaler Richtung. Um dies zu veranschaulichen, wird ein Rundstrahldiagramm in einem Polarkoordinatensystem erzeugt. Die Antenne befindet sich in der Mitte des Diagramms. Nun wird gemessen, ab wann das Signal in einer bestimmten Richtung und in einer bestimmten Entfernung um 3dB abfällt. Am Ende erhält man eine oder mehrere Flächen, in der das Signal nicht um 3dB kleiner wird. Diese Fläche(n) sind außer beim Rundstrahler meist keulenförmig. Oftmals bilden sich auch weitere Flächen ab, die dann als so genannte Nebenkeulen der Antenne bezeichnet werden. Der Antennengewinn wirkt sowohl sende- als auch empfangsseitig!

## 1.1 Antennenarten und deren Besonderheiten

### **Der Rundstrahler:**

Die wichtigste und am meisten verbreitete Antenne ist der Rundstrahler. Er besitzt eine Strahlerlänge von  $\lambda/2$ . Dieser Antennentyp weist eine sehr radiale abstrahlende Charakteristik mit vertikaler Polarisierung auf. Durch eine Stockung des Strahlers kann zudem ein höherer Gewinn erzielt werden. Allerdings wird dadurch die wirksame Ebene (Scheibe) flacher und stärker gerichtet (Bild 1a, 1b). Der  $\lambda/2$  Rundstrahler weist einen typischen Gewinn von 3dBi auf und ist für eine PTMP-Versorgung ausgelegt.



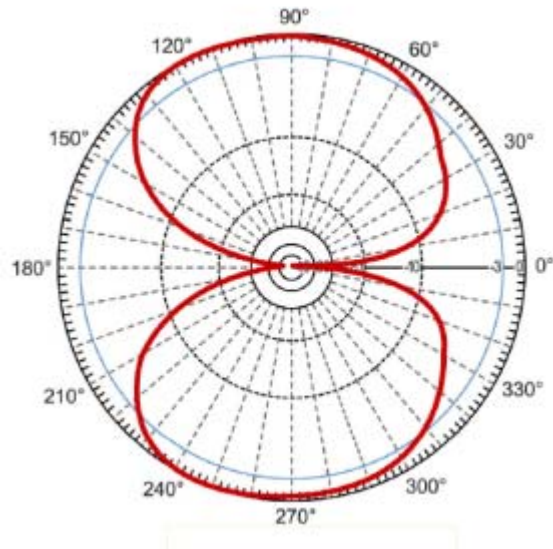
(Bild 1a) links, Rundstrahlantenne mit Montage- oder Magnetfuß. (Bild 1b) rechts, das antennentypische Strahlungsdiagramm.

(Quelle: Fa. HyperGain)

Optimale Ergebnisse können mit dieser Antennenart z.B. in Gebäudegeschossen mit hochfrequenzdurchlässigen Trennwänden erzielt werden. Die meist aus Holz oder Gips bestehenden Trennwände verursachen kaum Reflexionen und die Höhe des Aufstellpunkts entspricht meistens der Höhe eines Schreibtisches, auf dem sich der mit WLAN zu versorgende Client befindet. Zu beachten ist jedoch, dass sich keine elektromagnetischen Hindernisse im Nahfeld des Access-Point befinden. Diese könnten die Charakteristik durch Reflexionen stark negativ beeinflussen.

### **Die Disccone-Antenne:**

Die Disccone-Antenne weist ähnliche Ausleuchtungseigenschaften auf, wie der Rundstrahler. Sie bündelt jedoch die Wellen noch stärker in einer Ebene. Somit bildet sich ein flacher Ausleuchtungskegel. (Bild 2a, 2b). Die Polarisation ist ebenfalls vertikal. Der Gewinn ist mit 3dBi bis 3,5dBi typisch und für eine PTMP ausgelegt.



(Bild 2a) links, Discantenne mit Abdeckkappe.  
(Bild 2b) rechts, das vertikale Strahlungsdiagramm weist eine Nierencharakteristik auf.  
(Quelle: Fa. HyperGain)

Das Einsatzgebiet umfasst insbesondere Räume mit hohen Zimmerdecken, um eine optimale Ausleuchtung im gesamten Raumvolumen zu bekommen. Diese homogene Ausleuchtung wäre mit einem Rundstrahler nicht möglich.

### Die Yagi-Antenne:

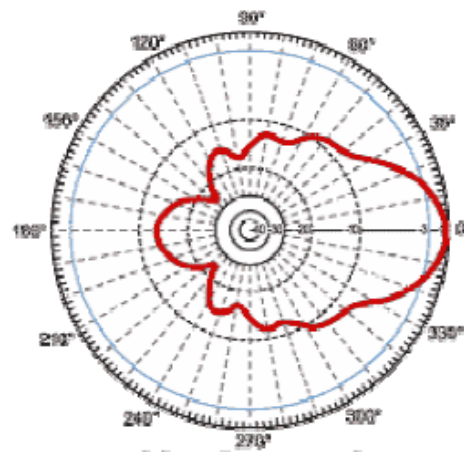
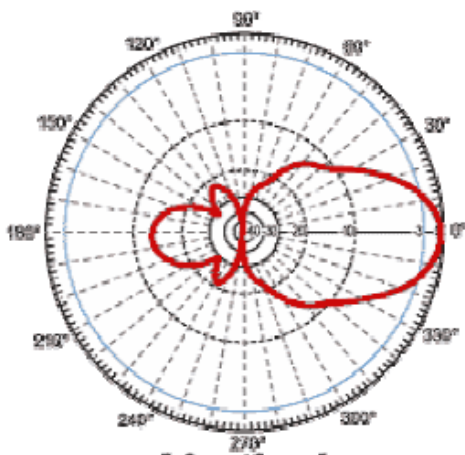
Durch den variabel bündelbaren Strahlengang in der horizontalen Ebene, abhängig von der Antennenlänge und dessen Gewinn, ist diese Antenne sowohl für PTMP als auch für PTP geeignet. Sie weist zudem einen sehr hohen Polarisationsgrad auf, der bei einer PTP-Anwendung wesentlich zur Beseitigung von Störfaktoren beitragen kann. Je länger der Boom dieser Antenne ist, desto größer werden die Wellen gebündelt und desto größer ist der Gewinn. Zwischen Länge und Gewinn besteht allerdings kein linearer Zusammenhang, so dass es ab einem bestimmten Gewinn nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll ist, die Antenne weiter zu verlängern. Die Bandbreite wird durch die Länge und den Abstand der passiven Elemente bestimmt. Ein Antennendesign mit einem Gewinn von mehr als 18dBi ist für eine PTP Yagi-Antenne durchaus ein gebräuchlicher Wert. Für eine gebündelte PTMP sind Werte in den Bereichen zwischen 5dBi und 15dBi zu verwenden.

Die horizontale Polarisierungsebene sollte bevorzugt benutzt werden, da die meisten Störquellen vertikal polarisiert wirken und dadurch stark gedämpft werden.

(Bild 3a) rechts, Yagi-Antenne mit Schutzkappe gegen Korrosion und Feuchtigkeit. Um eine ideale Ausrichtung zu erreichen ist das Mastelement im Winkel einstellbar.



(Bild 3b) unten links das vertikale Strahlungsdiagramm, rechts die horizontale Komponente. (Quelle: Fa. HyperGain)

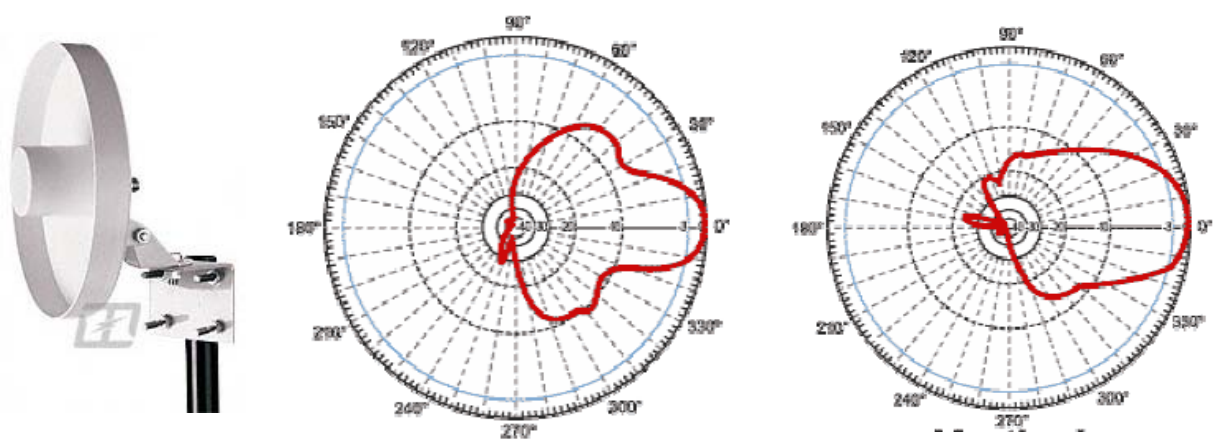


### Die Parabol-Antenne:

Für die reine PTP-Verbindung ist eine Parabolantenne die Lösung mit dem größten Antennengewinn in Bezug auf die Antennengröße. Für den Antennengewinn ist die vom Erreger bestrahlte Fläche maßgebend. Der Erreger kann horizontal, vertikal oder zirkular polarisierend eingesetzt werden und wird im Brennpunkt des Spiegels montiert. Die Antennenform kann entweder aus dem klassischen Parabolspiegel oder der Offsetbauweise bestehen. Der Spiegel selbst besteht aus Vollmaterial oder einem Drahtgeflecht, welches je nach Richtung (horizontal oder vertikal angeordnet) für die Polarisierung maßgeblich ist. Der Vorteil des Offsetspiegels besteht in der Neigung der Antennen. Bei horizontaler PTP-Verbindung kann sich im Offsetspiegel

nahezu kein Schnee ablagern bzw. keine Eisschicht bilden. Ein Spiegel aus Drahtgeflecht bietet weniger mechanische Angriffsfläche und besitzt daher eine geringere Windlast (Bild 4). Durch die extrem starke Bündelung können schon bei Durchmessern ab 0,3m bis zu 15dBi erreicht werden. Aufgrund der starken Bündelung ist eine sehr exakte Ausrichtung bei Verwendung von zwei Parabolantennen notwendig.

(Bild 4b).



(Bild 4a) links, Parabol-Antenne in Vollmetall-Ausführung

(Bild 4b) rechts, entspricht das Strahlungsdiagramm

(Quelle: Fa. HyperGain)

Entsprechend eines definierten Bedarfs kann somit entweder eine große Entfernung überbrückt oder gezielt eine bestimmte Fläche mit WLAN versorgt werden. Zu beachten ist jedoch, dass der jeweilige Höchstwert am Aufstellungsort eingehalten wird. Auch wenn der Sender selbst die geforderte Höchstleistungsvorschrift erfüllt, darf nicht jede beliebige Antenne angeschlossen werden. Maßgebend ist, welche Leistung im Abstand Null zur Antenne abgestrahlt wird. Eine Verstärkung der Sendeleistung durch einen kaskadierten Verstärker ist derzeit in Deutschland generell verboten. Ein gegebenenfalls erforderlicher Eingangsverstärker kann



hingegen bei einer PTP-Verbindung nochmals eine Schlechtwetter-Reserve (Margining) bewirken.

## 2 Design und Fertigung einer Yagi-Antenne für 2,4GHz

Wie im Kapitel 1.2 behandelt, besitzt eine Yagi-Antenne wesentliche Vorteile gegenüber den anderen gebräuchlichen Antennenarten bezüglich einer PTP-Verbindung. Da es sich bei WLAN um einen sehr hohen Frequenzbereich handelt, liegen die mechanischen Abmessungen meist unter einem Meter. Die auf dem Markt erhältlichen Yagi-Antennen sind zwar qualitativ sehr hochwertig, aber angesichts des geringen Absatzes noch stark überteuert. In dem nachfolgenden Projekt soll nun gezeigt werden, wie mit geringem Materialaufwand und einfachen Mitteln eine Yagi-Antenne in Eigenbauweise hergestellt werden kann. Anschließend wird ein Antennenabgleich im Labor der Firma IAT Starnberg erfolgen. Ein Vergleich mit einer am Markt erhältlichen vergleichbaren Antenne soll zum Schluss zeigen, dass mit geringem Kostenaufwand eine gleichwertige Antenne selbst hergestellt werden kann

### 2.1 Berechnung und Design

Eine Yagi-Antenne besteht aus einem Boom, den passiven Elementen und dem aktiven Element, dem so genannten Dipol. Letzterer speist die Antenne und besteht meist aus einem  $\lambda/4$  Dipol. In Abhängigkeit des Durchmessers kann hier die maximale Leistung ermittelt werden, die der Antenne zugeführt werden darf. Das passive Element hinter dem Dipol wird als Reflektor, das passive Element vor dem Dipol wird als Direktor oder parasitäres Element bezeichnet. Der Direktor ist das kritischste Element im gesamten System, da hier bei der Fertigung der errechnete Abstand präzise eingehalten werden muss, um einen möglichst kleinen Reflektionsfaktor zu bekommen. Die Länge und der Abstand der passiven Elemente bestimmen die Bandbreite der Antenne. Bei exakt gleichem Abstand und gleicher Länge der Elemente würde die Antenne theoretisch eine Bandbreite von 0 MHz besitzen.

Weiterhin von Bedeutung ist, ob der Boom metallische Eigenschaften aufweist und ob die Elemente durch den Boom isoliert verlaufen oder einen elektrischen Kontakt aufweisen. Im Falle des elektrischen Kontakts oder einer bloßen Isolierung ist ein Korrekturfaktor notwendig.

**Für das Projekt „Yagi-Antenne“ wurden folgende Materialien ausgewählt:**

- *Boom: Rundholz, 10mm*
- *Passive Elemente: Messing, rund, 2mm Durchmesser*
- *Aktives Element: Messing, rund, 2mm Durchmesser*

Die Berechnung einer Yagi-Antenne kann sowohl „von Hand“, als auch durch zahlreiche Software-Lösungen erfolgen. Besonders wenn die Antenne eine hohe Bandbreite aufweisen soll, wird die Anzahl der Gleichungen sehr schnell unüberschaubar. Mittlerweile sind zahlreiche Programme auf dem Markt, welche zuverlässig das geforderte Design mit den entsprechenden Parametern errechnen. Für dieses Projekt wird auf eine Software des Amateurfunkers DL6WU zurückgegriffen. (Bild 5).

**Das Antennendesign soll mit folgenden Vorgaben und Parametern errechnet werden:**

- *Typ: Yagi, 1 aktives Element*
- *Gewinn: 15dB*
- *20 – 25 Grad Öffnungswinkel*
- *VSWR: 1:1,2 – 1:1,4*
- *Boom: PVC, rechteckig, 10mmx10mm*
- *Passive Elemente: Messing, rund, 2mm Durchmesser*
- *Aktives Element: Messing, rund, 2mm Durchmesser*

```
D:\Install\YAGI25~1\dl6wu-gg.exe
----- DL6WU-YAGI DESIGN SUMMARY -----
      Design frequency = 2438.000 MHz
      Number of elements = 23
      Element diameters:
        Driven element = 2.00 mm = 0.0787 inches = 0.016 wavelengths
        Parasitic elements = 2.00 mm = 0.0787 inches = 0.016 wavelengths
      Electrical boom length = 887 mm = 34.9 inches = 7.22 wavelengths
      (allow for overhang when cutting boom to length)
      Estimated performance:
        Gain = 15.9 dBd
        Horizontal beamwidth = 24.0 deg
        Vertical beamwidth = 24.6 deg
      Suggested stacking distances for 2 yagis:
        Horizontal = 261 mm = 10.3 inches = 2.12 wavelengths
        Vertical = 255 mm = 10.0 inches = 2.07 wavelengths

      Elements are INSULATED FROM the metal boom, or the boom material is
      nonconducting. NO BOOM-EFFECT CORRECTION HAS BEEN APPLIED.

      Dimensional tolerance required for element lengths:
        +/- 0.37 mm = 0.015 inches = 0.003 wavelengths

      Preview dimensions? <Y/n> >
```

(Bild 5), das DOS-Programm errechnet aus den eingegebenen Parametern den Durchmesser des Booms, sowie den notwendigen Antennengewinn entsprechend dem Öffnungswinkel und zusätzlich die Abstände für eine gestockte Antennenvariante

Nachdem die angezeigten Werte den Vorgaben entsprechen, kann nachfolgend das errechnete Antennendesign angezeigt werden. Sollten die Werte nicht den Anforderungen entsprechen, so können die Parameter „Boomlänge“, „Elementdurchmesser“ oder „Gewinn“ verändert werden.

Das Antennendesign wird tabellarisch anschaulich ausgegeben. Es zeigt einerseits auf der linken Seite den Abstand (bezogen auf den Reflektor) der nachfolgenden Elemente an und andererseits auf der rechten Seite die Länge der Einzelelemente. (Bild 6).

Die Einhaltung der vorgegebenen Toleranz bestimmt den Reflektionsfaktor. Wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt, ist besonders das 3. Element der Antenne, der Direktor, maßgebend für diesen Faktor. Da die maximalen Abweichungen bei diesem Projekt nicht eingehalten werden konnten, war es möglich, durch Vor- oder Zurückbiegen des Direktors ebenfalls den niedrigsten Reflektionsfaktor per Fine-Tuning ausfindig zu machen. Der Einfluss aller anderen Elemente auf den Reflektionsfaktor ist relativ gering, so dass hier größere Abweichungen bei den Bohrabständen toleriert werden können.

CUMULATIVE SPACING			ELEMENT LENGTH		
mm	inches		mm	inches	
Zero	Zero	REFL	59.36	2.337	
24.6	0.968	D 0	57.80	2.276	
33.8	1.331	D 1	51.15	2.014	
55.9	2.203	D 2	50.38	1.983	
82.4	3.244	D 3	49.58	1.952	
113.1	4.454	D 4	48.84	1.923	
147.6	5.809	D 5	48.19	1.897	
184.5	7.262	D 6	47.63	1.875	
223.2	8.787	D 7	47.15	1.856	
263.8	10.384	D 8	46.73	1.840	
306.2	12.055	D 9	46.36	1.825	
350.5	13.797	D 10	46.03	1.812	
396.6	15.613	D 11	45.72	1.800	
444.5	17.501	D 12	45.45	1.789	
493.7	19.438	D 13	45.20	1.779	
542.9	21.374	D 14	44.96	1.770	
592.1	23.310	D 15	44.74	1.762	
641.3	25.247	D 16	44.54	1.754	
690.5	27.183	D 17	44.35	1.746	
739.6	29.120	D 18	44.17	1.739	
788.8	31.056	D 19	44.00	1.732	
838.0	32.993	D 20	43.83	1.726	
887.2	34.929	D 21	43.68	1.720	

(Bild 6) Auf der linken Seite der Tabelle befindet sich der Abstand bezogen auf das Reflektorelement, auf der rechten Seite die Länge des jeweiligen Elements.

## 2.2 Antennenanpassung

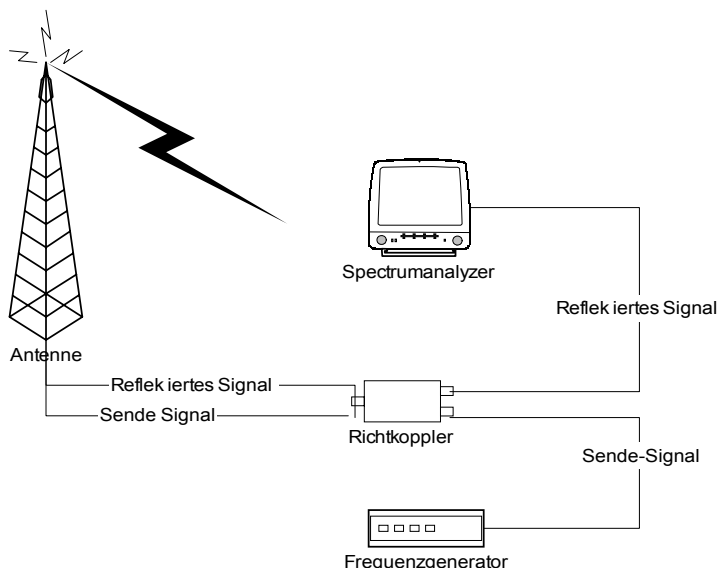
Da am aktiven Element, dem Dipol, keine symmetrische Speisung angelegt wird, muss eine Anpassung erfolgen. Die Anpassung erfolgt mit Hilfe eines asymmetrischen Schleifendipols ( $\lambda/4$ -Transformator). Dies hat zur Folge, dass der Fußpunktwiderstand der Antenne mit der Impedanz des Senders übereinstimmt. Der hier erforderliche Wert beträgt  $Z = 50 \text{ Ohm}$ . Im diesem Fall wird eine Leistungsanpassung vorgenommen.

Dieses Verfahren besitzt, wenn es sehr genau angewendet wird, den höchsten Wirkungsgrad. Das bedeutet, die an der Antenne angelegte Leistung wird auch zu fast 100% abgestrahlt. Die Ohmschen Verluste durch das Material sind vernachlässigbar gering. Je niedriger die Frequenz ist, desto einfacher ist die Anpassung. Jede Abweichung der Metallverbindungen von der ursprünglichen Position (z.B. durch Erschütterung, Transport, etc.) wirkt sich negativ auf den Reflektionsfaktor aus.

**Die Anpassung des Dipols wurde im Labor der Firma IAT, Starnberg mit folgenden Geräten vorgenommen:**

- *Spectrumanalyser: HP 70206A*
- *Frequenzgenerator: Wandel & Goltemann SNA62*
- *Richtkoppler: HP 86205A, 100KHz – 6GHz, 50Ohm, 16dB Koppeldämpfung, 1,5dB loss*

Die Anpassung wurde nach dem Aufbau Bild 7 vorgenommen:

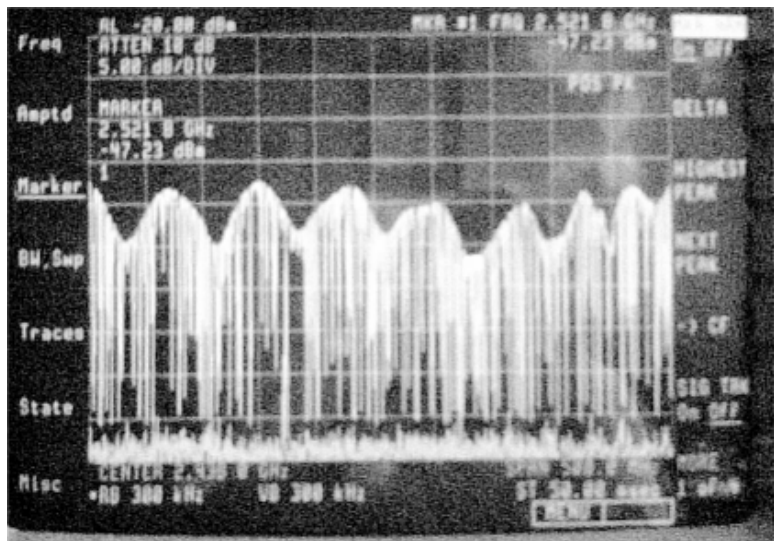


(Bild 7), Messauf zur Bestimmung des Reflektionsfaktors. Der Richtkoppler zweigt die reflektierte Welle ab und gibt diese an den Spektrumanalyser weiter.

Der Frequenzgenerator liefert ein durchlaufendes Signal von 2200MHz bis 2600MHz (Sweep-Mode). Dieses Signal durchläuft anschließend einen Richtkoppler. Am ersten

Ausgang wird die abzustimmende Antenne angeschlossen. Bei einer falschen Anpassung wird die Welle am Dipol reflektiert und über den Richtkoppler am zweiten Ausgang ausgekoppelt. An diesem Ausgang ist ein Spectrumanalyser angeschlossen, der auf die Mittenfrequenz der Antennen eingestellt ist und ein Frequenzintervall von ca. 300MHz durchläuft. Nach einer gewissen Zeit bildet der Bildschirm den Reflexionsverlauf der Antenne ab (Bild 8).

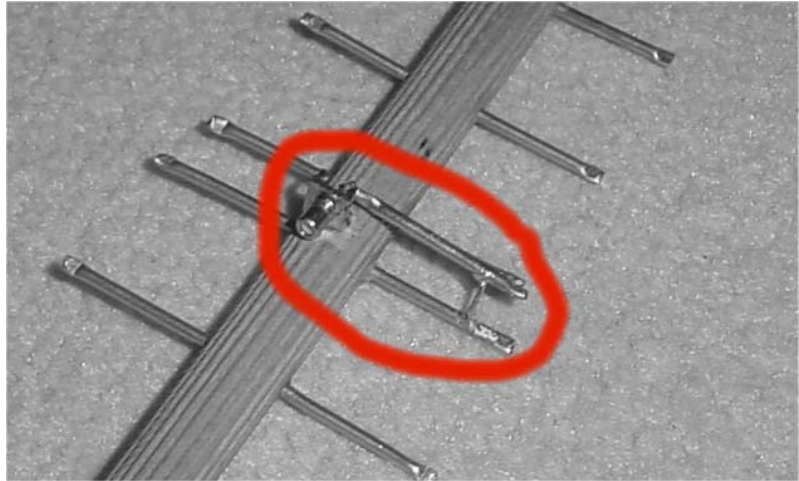
(Bild 8), Reflektions-Spektrum der Yagi-Antenne. Deutlich sind die Maxi- und Minima zu erkennen. Das kleinste Minima stellt die Frequenz mit der geringsten Reflexion dar.



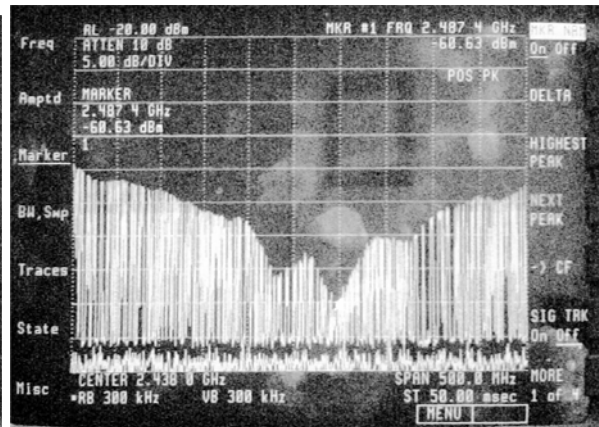
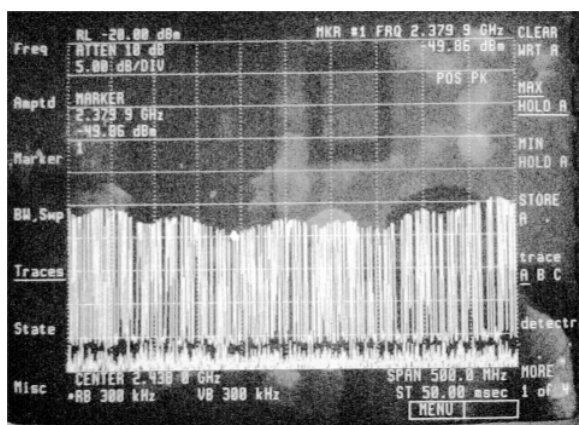
Durch die Kabelzuführung entstehen Maxima und Minima nach dem Richtkoppler. Da Wellen unterschiedlicher Frequenz durch die Leitung hin- und zurücklaufen, kommt es bei bestimmten Frequenzen zu einem Minima und bei anderen zu einem Maxima. Je Länger das Kabel vom Richtkoppler zur Antenne ist, desto größer wird die Periodendauer. Wenn die Antenne daher direkt hinter dem Richtkoppler angeschlossen wäre, würde lediglich das Minima der Anpassung auftreten.

Um nun einen Punkt der minimalen Reflexion zu finden, muss der Verbindungsdraht jeweils in Millimeterschritten in Richtung Dipolmitte verschoben und die obige Messung wiederholt werden. An manchen Drahtpositionen wird sich die Reflexion verstärken an anderen wiederum abschwächen. Ist der minimale Wert ermittelt, so ist die Antenne bestmöglich angepasst (Bild 9).

(Bild 9), als besonders schwierig erwies sich die Anpassung des Dipols über diese  $\lambda/4$  - Anpassung



Nicht jede Antenne weist das gleiche Reflexionsverhalten auf. Bei breitbandigen Antennen ist das Minima sehr flach abfallend und ansteigend, bei schmalbandigen Antenne ist es wiederum sehr steil ausgeprägt (Bilder 10a und Bild 10b).



(Bild 10a, links), Reflektionsspektrum zum Testempfang eingesetzten Disccone. Das Minimum zeigt einen sehr flachen Verlauf, d.h. die Antenne ist sehr breitbandig in der Anpassung.

(Bild 10b, rechts), Reflektionsspektrum der Parabolantenne. Diese Antenne wird später als Vergleichsantenne im Freifeldtest verwendet. Das steile Minimum „steht für sehr schmalbandig“.

Die bisher erwähnte Bandbreite bezieht sich nur auf die Anpassung, nicht auf den Antennengewinn. Es ist durchaus möglich, eine Antenne für eine bestimmte Frequenz anzupassen, ohne dass diese auch den maximalen Gewinn bei dieser Frequenz besitzt!

## 2.3 Fernfeldmessung im Labor

Nachdem die Anpassung des Dipols optimiert wurde, wird nun ein Fernfeldtest durchgeführt. Bei diesem Projekt wurde auf eine Fernfeldmessung in einem gesonderten Labor (z.B. Compact Range) aus Kostengründen verzichtet.

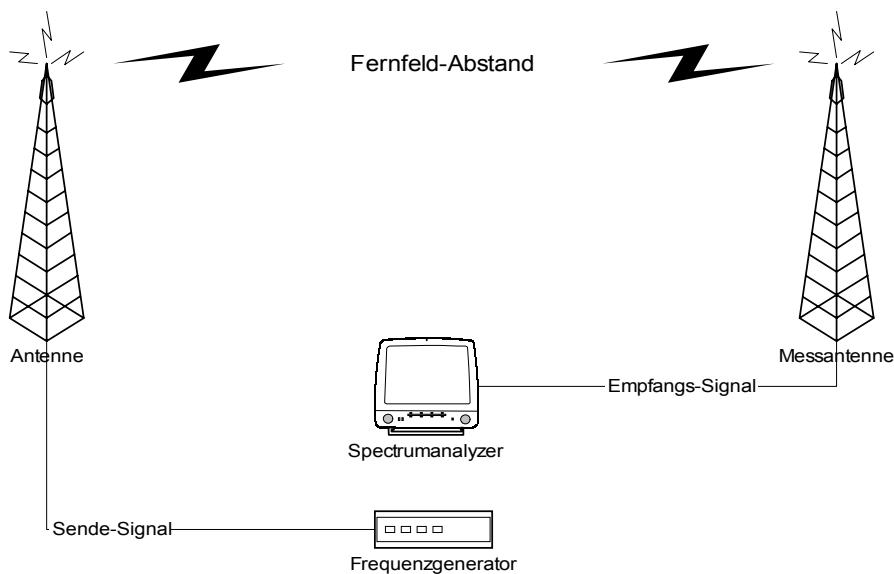
### Das Fernfeldberechnung einer Antenne mit einer 2,4GHz Betriebsfrequenz.:

**Fernfeldbedingung:**

$$r = \frac{2Dg^2}{\lambda}$$

**Mit:** D = größte strahlende Abmessung  
lamda = Wellenlänge  
r = Mindestdistanz für Fernfeldeigenschaften

Nachdem sich die Empfangsantenne bei 6m Abstand zur Sendeantenne nicht einmal annähernd im Nahfeld befindet, kann nun ein entsprechender Messaufbau erfolgen (Bild 11).

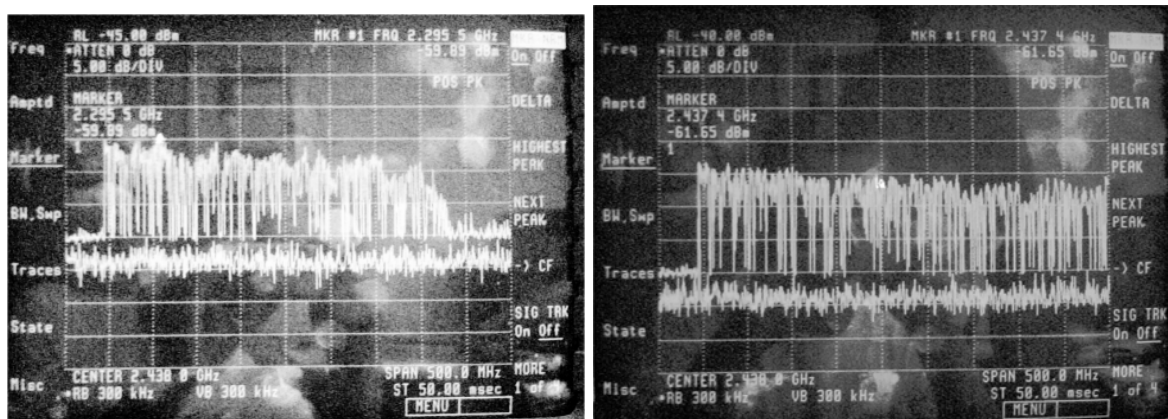


(Bild 11), Aufbau der Fernfeldmessung im Labor. Der Abstand der beiden Antennen muss größer oder gleich dem vorherigen errechneten Wert betragen.



Zum ermitteln der qualitativen Charakteristik wird die Antenne an den Messender angeschlossen. Der Messsender arbeitet nun nicht mehr im Sweep-Mode, sondern sendet einen konstanten unmodulierten Träger aus (CW-Mode). Eine Messantenne wird zum Empfang im Fernfeld positioniert. Bei diesem Projekt wird die im vorigen Abschnitt vermessene Discone verwendet, da diese Antenne sehr breitbandig ist und daher keine Pegelkorrektur notwendig ist. Der Spectrumanalyzer zeigt nun die an der Messantenne einfallende Empfangsleistung an.

Um einen spektralen Überblick zu bekommen, wird der Messsender wieder in den Sweep-Mode geschaltet. Empfangsseitig erscheint am Bildschirm der qualitative Frequenzgang der Antenne (Bilder 12a und Bild 12b).



(Bild 12a, links), Frequenzgang der selbst entworfenen Yagi-Antenne. Der Empfangspegel beträgt -59dBm

(Bild 12b, rechts), Frequenzgang der Parabolantenne der Firma HyperGain. Der Empfangspegel beträgt -61dBm

Deutlich ist zu erkennen, dass sich die abgestrahlte Leistung der Parabolantenne trotz der schmalbandigen Anpassung sehr konstant verhält. Die abgestrahlte Leistung über die Yagi-Antenne „bricht“ bei ca. 2,6GHz plötzlich ein. Beide Antennen verhalten sich jedoch im Intervall der Betriebsfrequenzen konstant.

## 2.4 Freifeldmessung

Um einen realitätsnahen Vergleich für eine PTP-Verbindung mit der Eigenbau-Antenne und der Parabolantenne der Firma Hypergain zu bekommen, werden die

beiden Strahler in der freien Umgebung, also im „Freifeld“ getestet. Auch hier muss vorher geprüft werden, ob der zu messenden Frequenzbereich frei von Störungen ist. Die Messung wurde auf einer Anhöhe in der Nähe von Palsweis (Landkreis Fürstfeldbruck) vorgenommen. Dieser Standort (ehemaliges Gelände für das Flugfunkfeuer FFB) erwies sich aus eigener Erfahrung als am besten geeignet, da es dort keine Hindernisse in der Frenel-Zone gibt.

#### **Zur Messung wurden folgende Geräte verwendet:**

- *12V Gel-Akku zur Spannungsversorgung am Feld*
- *WLAN Access-Point: AllNet*
- *Notebook: Toshiba Satellite, zirkular polarisierte Antenne*
- *Software: Network-Stumbler, v2.04*
- *GPS-Modul:*
- *Antennenstativ zur Ausrichtung des DUT*

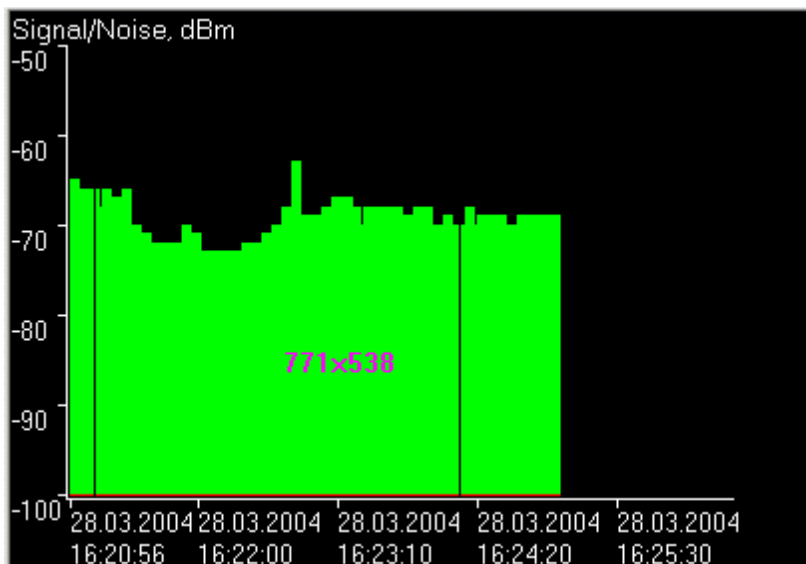
Die Speisung der jeweiligen Antenne erfolgt über den Access-Point (Bild 13). Die installierte Software am Notebook erstellt ein log-File mit den Empfangspegeln der integrierten WLAN-Karte an einer bestimmten Position. Die Positionsdaten werden über GPS ermittelt. Um eine gleichwertige Messung zu erhalten, wird bei beiden Antennen über die gleiche Entfernung gemessen.

Die Sende-Antenne befindet sich auf einer Anhöhe (615 m NN). Der Empfänger ist ebenfalls auf einer Anhöhe (611 m NN). Die Entfernung zum Empfänger beträgt 810 m. Die beiden Messpunkte werden durch ein Tal getrennt.



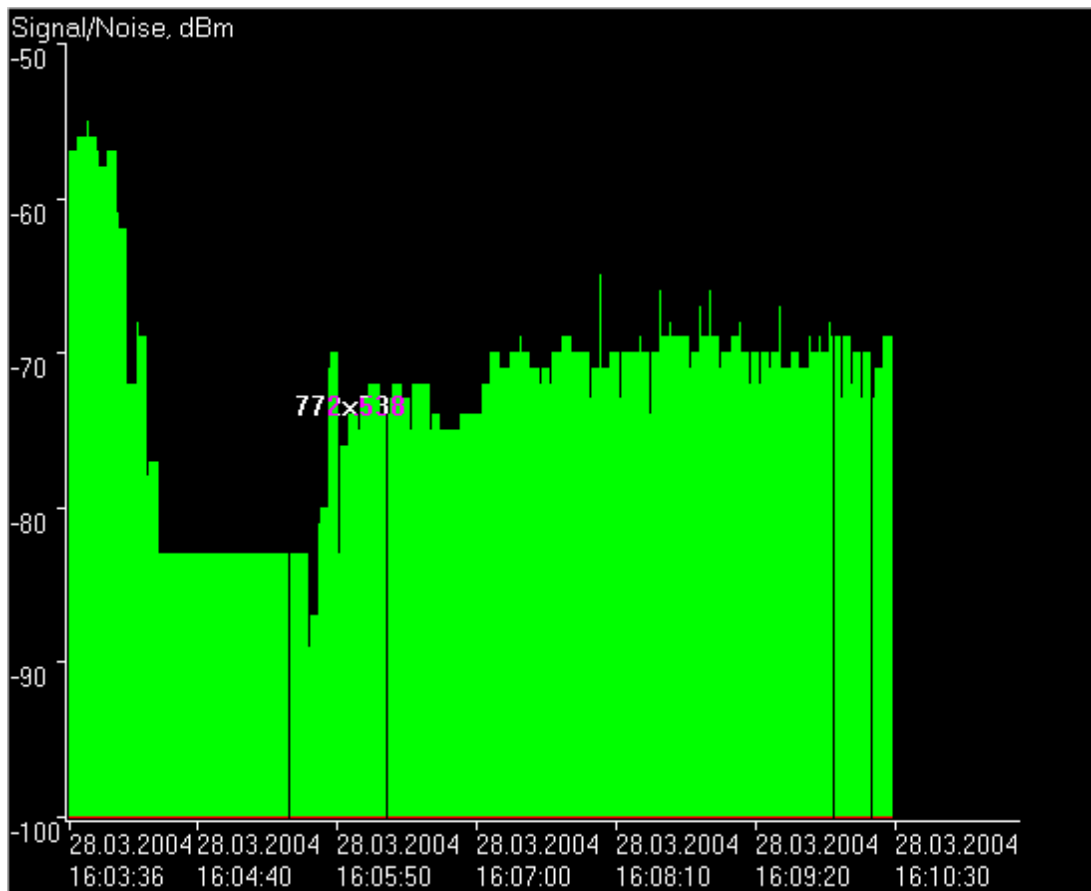
(Bild 13), Messaufbau der Parabolantenne auf einem Stativ mit angeschlossenem Access-Point und einem Gel-Akku als Stromversorgung.

Der Empfangspegel wird am Bildschirm grafisch in der Einheit dBm dargestellt. Es erfolgt eine Messung pro Sekunde über einen Zeitraum von ca. fünf Minuten. Als erstes wird der Empfangspegel der Referenzantenne (Firma HyperGain, Datenblatt im Anhang) gemessen (Bild 14).



(Bild 14), Empfangspegel nach ca. 800m Entfernung zum Sender. Gemittelt über die Zeit ergibt sich ein Wert von ca. -68dBm.

Der gemessene Wert der Parabolantenne wird nun als Referenzwert verwendet. In Anbetracht der entnommenen Werte aus dem Datenblatt der Parabolantenne und den errechneten Werten der Yagi-Antenne, kann nun ein quantitativer Vergleich erfolgen (Bild 15).



(Bild 15), Empfangspegel der Yagi-Antenne. Die Messung beginnt ab 16:07:00. Gemittelt über die Zeit ergibt sich ein Wert von -69dBm.

## 2.5 Zusammenfassung der Vergleichsmessung

Trotz der unterschiedlichen Bauart weisen beide Antennen etwa die gleiche Charakteristik auf. Die Vergleichsmessung zeigt, dass mit relativ geringem Aufwand durchaus akzeptable Werte mit einer selbst entworfenen Antenne erreicht werden können. Vernachlässigt man den Anpassungsfehler am Dipol, so könnten durchaus noch höhere Signalpegel am Empfänger erreicht werden. Der Abgleichaufwand von über vier Stunden spricht jedoch nicht gerade für hohe Wirtschaftlichkeit.

Ein großes Problem liegt in der Serienfertigung von Antennen in diesem und in höheren Frequenzbändern. Die Serienfertigung erlaubt bei einer kostengünstigen Produktion nur eine schlechte Einhaltung der Toleranzwerte. Bezogen auf die kurze Wellenlänge ist allerdings die Einhaltung von großer Bedeutung, um eine optimale Endstufenanpassung zu erreichen und damit 100% der gespeisten HF-Energie über die Antenne abstrahlen zu können. Die meisten Hersteller gehen davon aus, dass die Antenne mit sehr geringer Sendeleistung betrieben wird und schließen die daraus resultierende Zerstörung der Sende-Endstufe durch einen zu großen Reflektionsfaktor aus.

Wird eine Antenne mit höherer Sende-Leistung betrieben, so ist darauf zu achten, dass diese unbedingt angepasst wird. Die Anpassung kann mit einer sogenannten Matchbox realisiert werden. Sie wird in Reihe zwischen Antenne und Sender geschaltet und kann durch Verstimmen diverser Anpassungskreise einen nahezu reflexionsfreien Betrieb gewährleisten.

### 3 Passive Störungen

- *Fading und Mehrwegeempfang*
- *Dämpfung*
- *Beugung (aufgrund der geringen Distanzen bei WLAN meist nicht vorhanden)*

Wenn von passiven Störungen die Rede ist, sind meistens die beiden am häufigsten auftretenden Störungen, das Fading und die Dämpfung, gemeint.

#### **Fading und Mehrwegeempfang:**

Das durch Fading belastete Signal zeichnet sich durch extreme Pegelschwankungen aus. Das Signal wird von Wänden oder anderen physischen Hindernissen reflektiert und kommt zeitversetzt mehrfach beim Empfänger an (Mehrwegeempfang). Durch die Überlagerung der einzelnen Signale entsteht ein Versatz gegenüber dem ursprünglichen Phasenverlauf. Je nach Standort des Empfängers und des Senders, sowie der reflektierenden Objekte ist der Signal-Pegel stärker oder schwächer.

Theoretisch ist bei 90 Grad Phasenversatz sogar eine völlige Auslöschung möglich. Bewegen sich reflektierende Objekte, kommt es zu Schwankungen. Solche Objekte können z.B. vorbeifahrende Autos an einer angrenzenden Straße sein. Auch nicht-metallische Objekte, wie etwa der Mensch, reflektieren die Wellen im 2,4GHz-Band.

Gegenmaßnahmen sind generell nur mit stark gerichteten Antennen möglich. Durch die Vermeidung von Objekten in der Frenel-Zone ist ein Fading weitgehend auszuschließen, da ein Mehrwegeempfang durch Reflektionen nicht zustande kommen kann.

Für manche Anwendungen im 2,4GHz-Band ist eine Mehrwegeausbreitung sogar erwünscht. Ein größerer Raum könnte rein rechnerisch niemals vollständig mit einer Antenne mit WLAN versorgt werden. Nur durch die Reflektionen an den Wänden ist eine vollständige „Ausleuchtung“ möglich.

### **Dämpfung:**

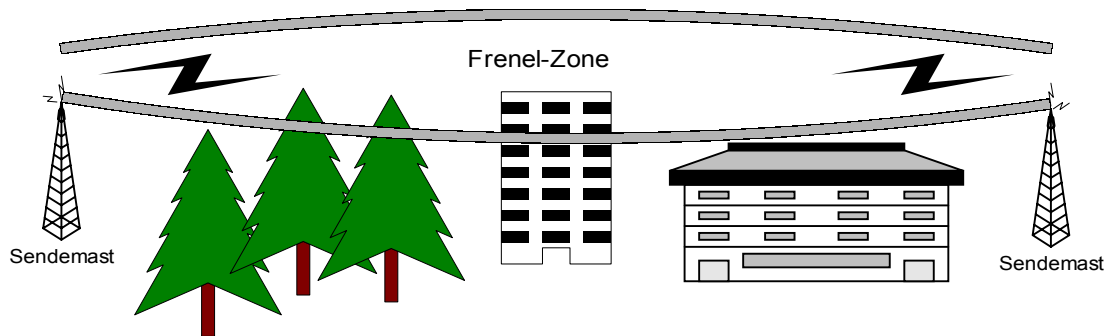
Ein gedämpftes Signal tritt theoretisch ab dem ersten Millimeter nach der Antenne auf. Allerdings ist man sich im Klaren darüber, wie sich die gedämpfte Welle nach einer bestimmten Entfernung verhält. Oftmals lassen aber die örtlichen Gegebenheiten keine direkte Sichtverbindung (LOS) zwischen Sende- und Empfangsstation zu. In solch einem Fall müssen sogenannte Zusatzdämpfungen bei der Berechnung der Gesamtdämpfung mit einkalkuliert werden (Bild 16).

Für eine PTP-Verbindung ist es wichtig, dass in der Frenel-Zone keine Hindernisse hineinragen. Dieser geforderte Fall wird als „Freiraumbedingung“ bezeichnet. Eine reine Sichtverbindung zwischen den Antennenstandorten untereinander gewährleisten nicht immer einen einwandfreien Empfang.

### **Freiraumbedingung:**

$$A > \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d_1 + d_2}}$$

- Mit:** A = Radius der 1. Frenel-Zone  
d<sub>1</sub> = Abstand des Empfängers vom Hindernis  
d<sub>2</sub> = Abstand des Senders vom Hindernis



(Bild 16), durch Objekte innerhalb der Frenel-Zone kommt es zusätzlich zu Dämpfungen

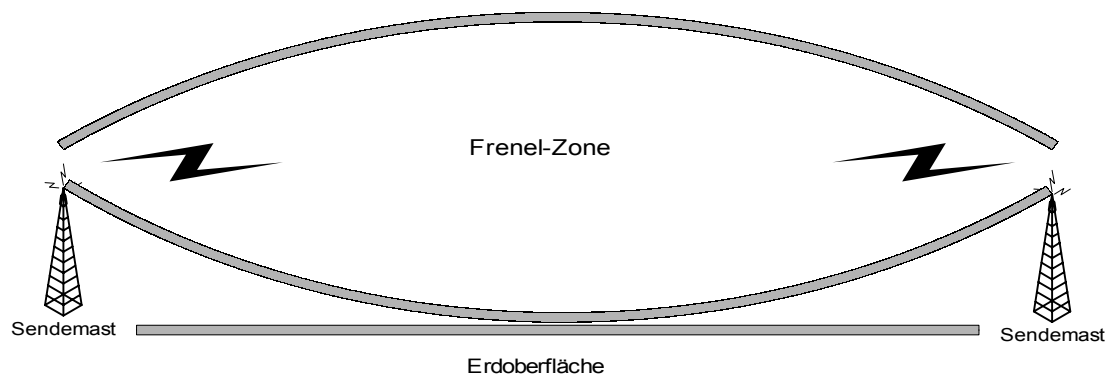
Wenn von einer Ebene ohne Hindernisse ausgegangen und die Erdkrümmung vernachlässigt wird, so kann mit Hilfe der nachstehenden Gleichung die Mindesthöhe von Sender und Empfänger berechnet werden, bei der die Frenel-Zone gerade nicht den Erdboden berührt (Bild 17).

Grundsätzlich kann im günstigsten Fall (keine Zusatzdämpfung!) mit folgender Gleichung der Empfangspegel am Empfänger berechnet werden:

$$P_e = P_s G_s G_e \left( \frac{\lambda \pi D}{4r^2} \right)^2$$

- Mit:** P<sub>e</sub> = die am Empfänger ankommende Leistung  
P<sub>s</sub> = die von Sender Abgegebene Leistung  
G<sub>s</sub> = der Gewinn der Sendeantenne  
G<sub>e</sub> = der Gewinn der Empfangsantenne

Der quadratische Faktor beschreibt die Dämpfung im Freiraum



(Bild 17), eine „freie“ Frenel-Zone, die gerade nicht die Erdoberfläche berührt.

Aber nicht nur statische Objekte dämpfen das Signal. Luftfeuchtigkeit, Regen und Schneefall können das S/N-Verhältnis soweit abschwächen, dass eine Kommunikation zwischen Access-Point und Client nicht mehr möglich ist.

Um einer Dämpfung entgegenzuwirken gibt es die folgenden beiden Möglichkeiten:

- *Höhere Sendeleistung (auf beiden Seiten)*
- *Größerer Antennengewinn*

Diese Maßnahmen werden als „Margining“ bezeichnet. Das Margining ist als redundante Leistung EIRP über der notwendigen Leistung definiert. Somit kann auch unter schlechteren Bedingungen eine konstante Bitrate übertragen werden.