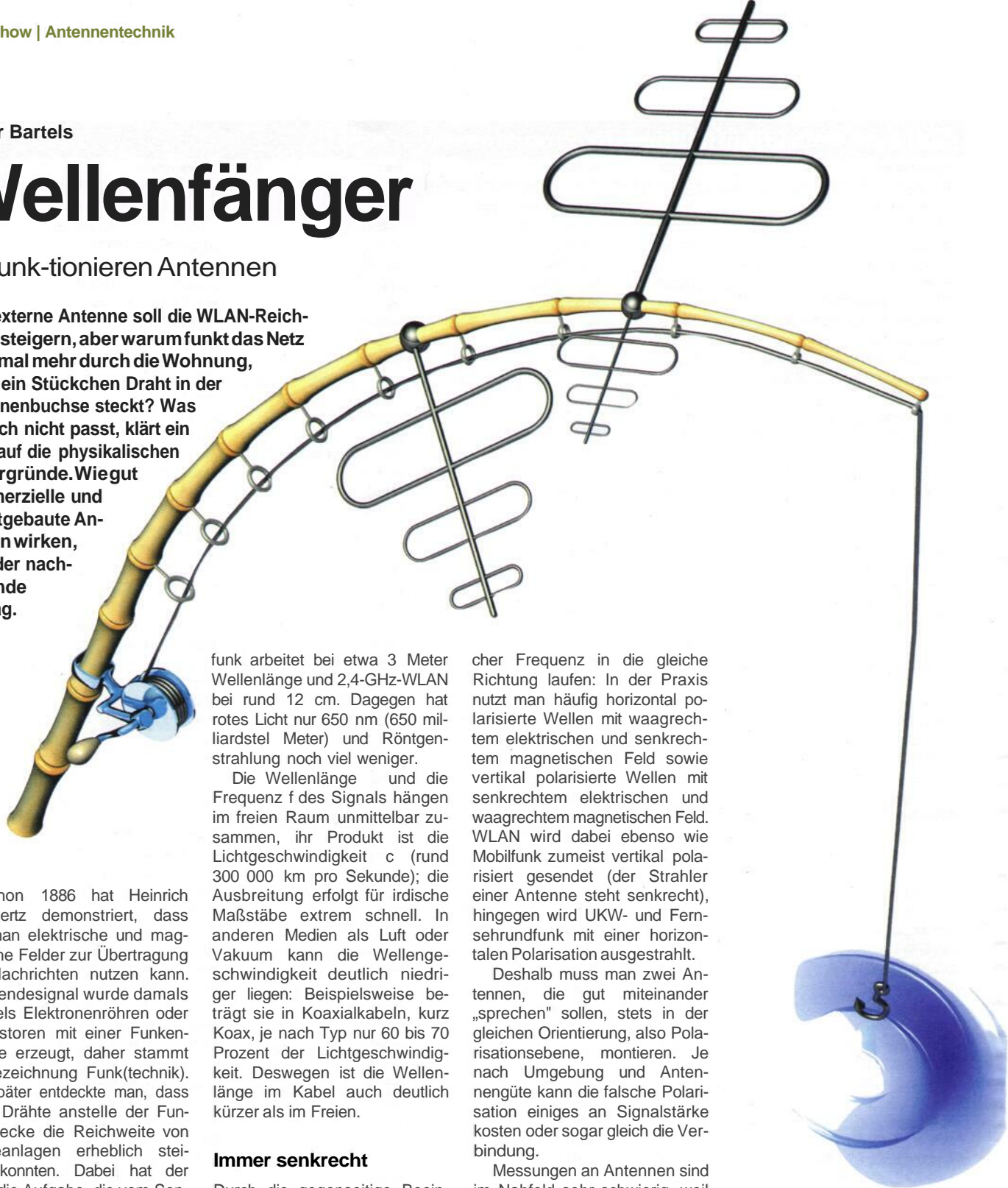


Oliver Bartels

Wellenfänger

So funktionieren Antennen

Eine externe Antenne soll die WLAN-Reichweite steigern, aber warum funkt das Netz nicht mal mehr durch die Wohnung, wenn ein Stückchen Draht in der Antennenbuchse steckt? Was da noch nicht passt, klärt ein Blick auf die physikalischen Hintergründe. Wie gut kommerzielle und selbstgebaute Antennen wirken, klärt der nachfolgende Beitrag.



Schon 1886 hat Heinrich Hertz demonstriert, dass man elektrische und magnetische Felder zur Übertragung von Nachrichten nutzen kann. Das Sendesignal wurde damals mangels Elektronenröhren oder Transistoren mit einer Funkenstrecke erzeugt, daher stammt die Bezeichnung Funk(technik). Erst später entdeckte man, dass lange Drähte anstelle der Funkenstrecke die Reichweite von Sendeanlagen erheblich steigern konnten. Dabei hat der Draht die Aufgabe, die vom Sender abgegebene Hochfrequenz (HF) als elektromagnetische Welle in die Umgebung auszukoppeln, das Prinzip Antenne war geboren.

Zum Bereich der elektromagnetischen Wellen gehört nicht nur der Funk zwischen Langwelle und Mikrowelle, auch Wärmestrahlung, Licht und Röntgenstrahlung sind nichts anderes als elektromagnetische Wellen. Diese unterscheiden sich nur erheblich in der Wellenlänge vom gewöhnlichen Funk. UKW-Rund-

funk arbeitet bei etwa 3 Meter Wellenlänge und 2,4-GHz-WLAN bei rund 12 cm. Dagegen hat rotes Licht nur 650 nm (650 milliardstel Meter) und Röntgenstrahlung noch viel weniger.

Die Wellenlänge und die Frequenz f des Signals hängen im freien Raum unmittelbar zusammen, ihr Produkt ist die Lichtgeschwindigkeit c (rund 300 000 km pro Sekunde); die Ausbreitung erfolgt für irdische Maßstäbe extrem schnell. In anderen Medien als Luft oder Vakuum kann die Wellengeschwindigkeit deutlich niedriger liegen: Beispielsweise beträgt sie in Koaxialkabeln, kurz Koax, je nach Typ nur 60 bis 70 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Deswegen ist die Wellenlänge im Kabel auch deutlich kürzer als im Freien.

Immer senkrecht

Durch die gegenseitige Beeinflussung des elektrischen und magnetischen Feldes ergibt sich aus den Maxwell'schen Gleichungen, dass sich elektromagnetische Wellen bei Abwesenheit weiterer Einflüsse grundsätzlich als Transversalwelle (transversal: quer verlaufend) ausbreiten. Das elektrische Feld steht dabei stets senkrecht auf dem magnetischen Feld, beide stehen senkrecht zur der Ausbreitungsrichtung.

Daraus folgt, dass es viele getrennte Wellen gibt, die mit glei-

cher Frequenz in die gleiche Richtung laufen: In der Praxis nutzt man häufig horizontal polarisierte Wellen mit waagrecht elektrischen und senkrecht magnetischen Feld sowie vertikal polarisierte Wellen mit senkrecht elektrischen und waagrecht magnetischen Feld. WLAN wird dabei ebenso wie Mobilfunk zumeist vertikal polarisiert gesendet (der Strahler einer Antenne steht senkrecht), hingegen wird UKW- und Fernsehgrundfunk mit einer horizontalen Polarisation ausgestrahlt.

Deshalb muss man zwei Antennen, die gut miteinander „sprechen“ sollen, stets in der gleichen Orientierung, also Polarisationsebene, montieren. Je nach Umgebung und Antennengüte kann die falsche Polarisation einiges an Signalstärke kosten oder sogar gleich die Verbindung.

Messungen an Antennen sind im Nahfeld sehr schwierig, weil sich die Felder hier noch nicht sphärisch ausgebildet haben und Beugungs- und Streuungseffekte hereinspielen. Als Daumenregel geht man davon aus, dass das Fernfeld bei Entfernungen größer als der vierfachen Wellenlänge beginnt, bei WLAN also ab etwa einem halben Meter. Dort lassen sich Hochfrequenz-Antennen (HF-Antennen) dann sehr einfach mit einem Richtdiagramm beschreiben: Man denkt sich eine Kugel um die Antenne und misst, wie stark

das Signal in welche Richtung abgestrahlt wird. Dabei gibt es das Idealbild des isotropen Strahlers, der in alle Richtungen gleichstark sendet.

Umgekehrt ist eine Antenne denkbar, die eine ganz bestimmte Richtung bevorzugt und ihr Signal nur in einen Kegel mit wenigen Grad Öffnungswinkel leitet. Weil diese Antenne dazu die gesamte Sendeleistung verwenden kann, die ursprünglich für die gesamte Kugel gedacht war,

erhält ein in Vorzugsrichtung liegender Empfänger ein viel stärkeres Signal. Deshalb spricht man von einem Antennengewinn. Allerdings wird bei Richtantennen der Rest der Welt wesentlich schlechter bedient. Eine Antenne, die ohne zusätzlichen Verstärker sowohl einen sehr hohen Gewinn als auch eine möglichst gute Rundumabstrahlung leisten soll, kann es entgegen mancher Marketingaussage nicht geben.

Gewinn und Reichweite

Den Antennengewinn geben die Hersteller üblicherweise in dBi an, Dezibel (zehntel Bel) bezogen auf den isotropen Strahler. Das Bel - benannt nach Alexander Graham Bell - ist der Logarithmus zur Basis 10 der bezogenen Einheit. 10 Milliwatt gegenüber 1 Milliwatt entspricht 1 Bel oder 10 dB, 100 mW zu 1 mW entsprechen 20 dB. Demnach würde ein Gewinn von 30 dBi bedeuten, dass solch eine Antenne in ihre Hauptrichtung das Tausendfache dessen abstrahlt, was der isotrope Strahler dorthin senden würde. Sind Vorzeichen angegeben, dann kennzeichnen positive dB-Angaben stets eine Verstärkung (Ausgangsleistung größer als Eingangsleistung), negative dagegen eine Dämpfung (Ausgangsleistung kleiner als Eingangsleistung).

Wenn man sich die Kugel um die Antenne vorstellt, dann lässt sich leicht berechnen, wie viel Leistung tatsächlich beim Empfänger ankommt: Die Kugeloberfläche wächst mit dem Quadrat des Radius, und die Ausbreitung der Wellen ist im Fernfeld unabhängig von der Antenne. Damit verteilt sich die Leistung in einem immer größeren Abstand auf eine quadratisch wachsende Kugeloberfläche: Verdoppelt man die Distanz, „sieht“ der Empfänger nur noch ein Viertel des Signals. Deshalb bewirkt eine verdoppelte Sendeleistung (+3 dB) keineswegs doppelte Reichweite, man brauchte mindestens eine Vervierfachung (+6 dB).

Weiter als bis zum sichtbaren Horizont kommt man bei WLAN-Frequenzen aber generell nicht, da sich die Wellen bei 2,4 GHz quasioptisch ausbreiten. Kurzwelle (3 bis 30 MHz) reicht über den Horizont hinaus, da je nach

Frequenz verschiedene Atmosphärenschichten als Reflektor wirken und das Signal um die Erdkrümmung lenken.

Antennen verhalten sich zudem reziprok: Eine Antenne, die beim Senden die Abstrahlung in eine bestimmte Richtung bündelt, wird auch beim Empfangen aus dieser Richtung besonders gut funktionieren. Am Antennenfuß steht ein um den Gewinn stärkeres Signal bereit, ohne dass ein elektronischer Verstärker sein unvermeidliches Rauschen dazu gibt. Daraus resultiert ein bei Funkamateuren gängiger Spruch: Eine gute Antenne ist der beste Verstärker.

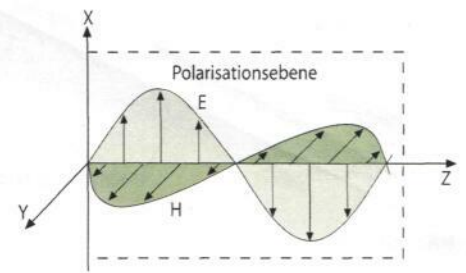
Grenzwertig

Für WLAN ist die zulässige Sendeleistung hierzulande gesetzlich beschränkt. Sie liegt im 2,4-GHz-Band bei 100 mW EIRP (20 dBm). EIRP (Effective Isotropy Radiated Power) ist die Sendeleistung, mit der man eine in alle Raumrichtungen gleichmäßig (isotrop) abstrahlende Antenne versorgen müsste, damit die Anlage im Fernfeld dieselbe Feldstärke erreicht wie mit einer bündelnden Richtantenne. dBm steht für Dezibel bezogen auf ein Milliwatt. Alles, was über 20 dBm EIRP hinausgeht, ist illegal und kann als Ordnungswidrigkeit geahndet werden. Bei 5,7 GHz sind unter bestimmten Voraussetzungen neuerdings bis zu 1 Watt erlaubt.

Das bedeutet für WLAN-Richtfunker, dass der Betrieb von Antennen mit hohem Gewinn unter Umständen illegal ist: Eine typische WLAN-Karte sendet mit +15 dBm (30 Milliwatt). Wenn die Antenne nun +8 dBi bringt, dann hätte die Anlage ohne das Antennenkabel eine Sendeleistung von +23 dBm (200 Milliwatt) am isotropen Strahler, 3 dB über dem Grenzwert. Man muss also ein Kabel mit mindestens 3 dB Verlust - zur Kabeldämpfung folgt weiter unten mehr - einsetzen, um legal zu bleiben. Alternativ bieten auch manche

Das Richtdiagramm einer Antenne gibt für die horizontale und vertikale Ebene an, wie gut sie in jede Raumrichtung sendet und empfängt: Je schmaler die Keule, desto höher der Gewinn in Vorzugsrichtung.

Weil sich elektromagnetische Wellen transversal ausbreiten, gibt es zwei Polarisationsrichtungen: waagrecht und senkrecht, jeweils auf das elektrische Feld E bezogen.



Access Points Optionen, um die Sendeleistung stufenweise anzupassen. Beispielsweise hat der derzeit verbreitete DWL-900+ von D-Link vier Stufen: 100% (19 dBm), 50 % (16 dBm), 25 % (13 dBm) und 12,5 % (10 dBm).

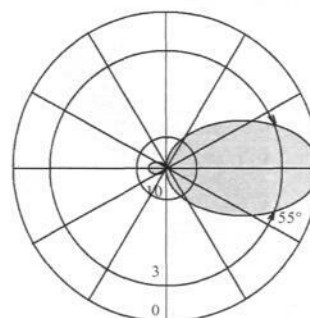
Angepasste Kabel

Ein oft vernachlässigtes Detail ist der Anschluss der Antenne an die WLAN-Baugruppe über das Kabel. Bei derart hohen Frequenzen taugt ein gewöhnlicher Klingeldraht nicht, weil sich das Feld eines WLAN-Signals über 2,4 Milliarden mal pro Sekunde ändert. Da ist die Selbstinduktion des Kupferdrahts so stark, dass das Signal praktisch nicht weitergeleitet werden kann. Die einzige Chance dagegen liegt im Ausnutzen eines entgegengesetzten Effektes: Im Kondensator nimmt das Aufbauen der Ladung Zeit in Anspruch, während dieser Zeit fließt anfänglich ein besonders hoher Strom. Wenn

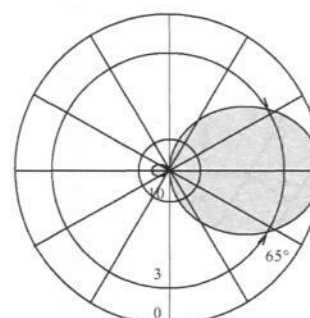
man nun an bestimmten Stellen des Kabels einen zur Selbstinduktion passenden Kondensator einbaute, dann würden sich beide Effekte kompensieren und das Signal kann im Kabel laufen. Dieser Überlegung folgt der Aufbau des Koaxialkabels.

Hinzu kommt, dass sich das elektrische Feld ausschließlich im Inneren des Kabels zwischen Innenleiter und Mantel befindet. Es kann infolge der Schirmung durch den Mantel nicht abgestrahlt werden. Zwar sind die magnetischen Felder von Innenleiter und Mantel außerhalb des Kabels gleich stark, jedoch heben sie sich wegen der gegensinnigen Stromrichtung auf. Das Kabel strahlt nach außen also E- und H-Felder so gut wie gar nicht ab und hat damit beste Voraussetzungen für den Einsatz als Antennenzuführung.

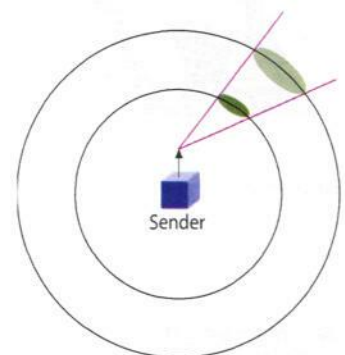
Bei Koax-Kabeln ist eine wesentliche Kenngröße der Wellenwiderstand (Impedanz). Dieser resultiert über die „Telegraphengleichung“ aus dem induktiven Belag (virtuelle Spulen) pro Längeneinheit und dem kapazitiven Belag (virtuelle Kondensatoren). Der Wellenwiderstand ist deshalb wichtig, weil das Kabel die Sendeleistung nur dann ohne Verluste übernimmt, wenn der Sender sie mit gleicher Impe-



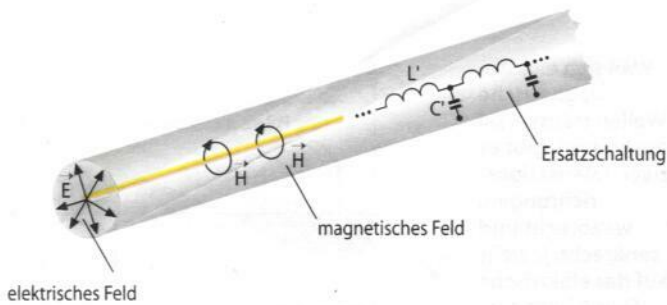
Horizontal



Vertical



Richtantennen „leuchten“ einen Kegel aus. Verdoppelt man die Entfernung zum Sender, dann vervierfacht sich die bestrahlte Fläche.



Ein Koax-Kabel ist kein simpler Draht: In seinem Inneren läuft die Leistung als elektromagnetische Welle aus E- und H-Feld. Es verhält sich quasi wie eine Kettenschaltung aus Spulen und Kondensatoren.

danz einspeist. Das gleiche gilt antennenseitig: Nur wenn Wellenwiderstand von Kabel und Antenne gut übereinstimmen, wird die Leistung optimal ausgekoppelt.

Eine Fehlanpassung, bei der die Impedanzen von Sender, Kabel oder Antenne stark voneinander abweichen, bewirkt sende- wie empfangsseitig erhebliche Leistungseinbußen. Das ist beispielsweise dann der Fall, wenn man den 50-Ohm-Ausgang einer WLAN-Karte über ein 75-Ohm-Kabel (typisch in Sat-

TV-Anlagen oder zwischen TV-Antenne und Fernsehgerät) mit dem 50-Ohm-Eingang einer WLAN-Antenne verbindet. Der Effekt tritt auch schon bei sehr kurzen Kabelstücken auf.

Im Sendefall kann solch eine Fehlanpassung sogar zum Elektronikkiller werden: Die im Kabel zwischengespeicherte Energie kehrt wie bestellt und nicht abgeholt an der „Bruchstelle“ zum Sender zurück, aber sie kann wegen der Energieerhaltung nicht verschwinden. Der Sender muss nun außer mit seiner eige-

nen Verlustleistung auch mit der reflektierten Leistung fertig werden. Der Effekt hat schon so manche CB-Funk-Endstufe das Leben gekostet. Zwar ist er bei 2,4-GHz-WLAN mit 100 mW noch unproblematisch, könnte aber bei den neuen 5,7-GHz-WLAN-Karten mit einem Watt Sendeleistung wieder relevant werden. Man sollte daher niemals einen Sender ohne angeschlossene Antenne betreiben.

Immer weniger

Die zweite wichtige Kenngröße bei Kabeln ist die unvermeidliche Dämpfung. Nur Supraleiter übertragen elektrische Energie verlustfrei, aber die sind in der Praxis noch nicht einsetzbar, und wenn dereinst, dann wohl nur für niederfrequente Energieübertragung. Bei Koax-Kabeln gilt als Faustregel, dass dünnere Kabel stärker dämpfen als dickere [1]. Außerdem steigt die Dämpfung, die die Kabelhersteller in Dezibel pro Meter (dB/m) angeben, generell mit der Frequenz.

Schon fünf Meter billiges Kabel, das aber auch schon ohne weiteres einen Euro pro Meter kostet, können bei 2,4 GHz den gesamten Gewinn einer 10-dBi-Patchantenne schlucken. Hochwertiges Kabel wird auf dieser Distanz kaum mehr als 1 dB Dämpfung verursachen, kann aber leicht mit fünf Euro pro Meter zu Buche schlagen.

Die Wellenlänge beträgt bei 2,4-GHz-WLAN im Kabel wegen der niedrigeren Wellengeschwindigkeit typischerweise nur noch 6 cm, also 3 cm zwischen Plus und Minus der Amplitude auf dem Mittelleiter. Daher fordern hohe Frequenzen hohe Fertigungspräzision bei Antennen und anderen Komponenten. Extrem wird dies im 5,7-GHz-Band, bei den Steckverbindern beträgt die typische Toleranz dann typischerweise wenige Mikrometer.

Unfeiner Umgang

Sorgsames Handhaben der Stecker [2,3] ist dabei zwingend für gute Übertragungseigenschaften. So darf man niemals eine SMA-Buchse durch Drehen um die eigene Achse in einen widerpenstigen Stecker hineinzwingen. Durch die Drehung des Stiftes in der Buchse kann letztere

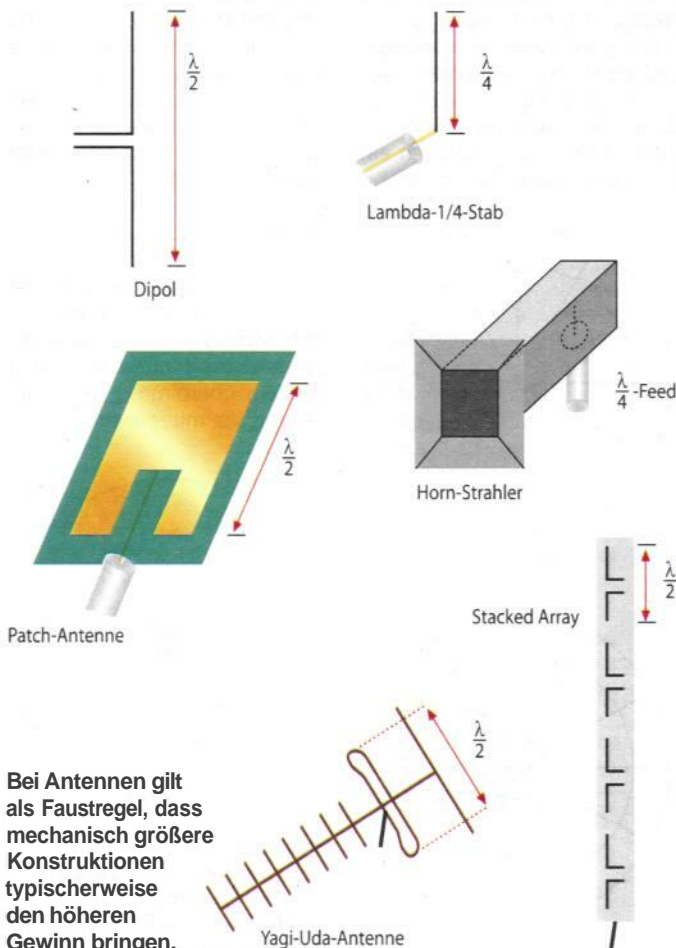
irreparabel beschädigt werden, sodass es zu ungewollten Reflexionen und damit Signalverlust kommt. Daneben ist das maximale Drehmoment bei SMA unbedingt einzuhalten, wofür man passende Drehmomentschlüssel hernimmt. Lüsterklemmen, fliegende Lötstellen und ähnliches haben in einer HF-Anlage nichts zu suchen.

Ein weiterer HF-Aspekt ist, dass die Leistung nicht auf dem Leiter läuft, sondern als Feld im isolierenden Dielektrikum des Kabels steckt. In Extremfällen kann man den Innenleiter sogar weglassen, man erhält dann einen runden oder quadratischen Hohlleiter, der die Basis aller selbstgebauten Dosen-Antennen ist. Diese funktionieren aber erst ab einer bestimmten Mindestfrequenz, die von den Dimensionen des Hohlleiters abhängt. Sind diese für eine Frequenz zu klein, dann gibt es keine geeigneten „Moden“, der Hohlleiter sperrt [4]. Mit einem Trichter, der die Hohlleiter-Öffnung sanft aufweitet, wird aus der Hohlleiter-Antenne ein Horn-Strahler.

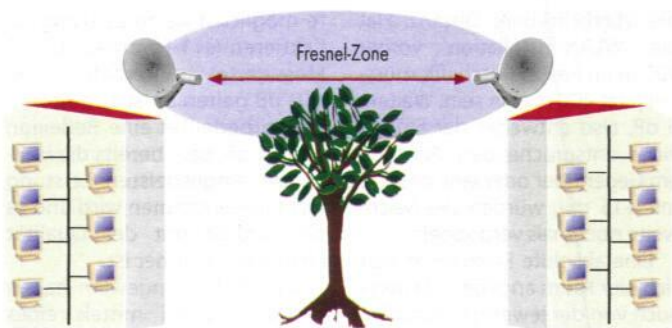
So siehts aus

Die einfachste Antenne, die häufig als Behelf UKW-Tunern als Wurfantenne beiliegt, ist der Dipol mit zwei Drähten. Die Funktion ist einleuchtend: Durch den im ungeschirmten Draht fließenden Strom bis zu den Spitzen entsteht ein Magnetfeld, an den Spitzen bauen sich Ladungen auf und erzeugen ein elektrisches Feld. Beides strahlt in den freien Raum. Allerdings sollte die Länge des Dipols auf die Wellenlänge abgestimmt sein. Der Dipol funktioniert nur in der Dimension der halben Wellenlänge gut, denn die Laufzeit im Draht und damit die Resonanzfrequenz muss zur Sendefrequenz passen. Eine genaue Feldberechnung würde den Rahmen dieses Artikels allerdings bei weitem sprengen.

Der Dipol benötigt gegebenenfalls am oder im Antennenfuß ein Bauteil (Balun), das seinen Wellenwiderstand an die Leitung anpasst und gegebenenfalls für eine Symmetrierung sorgt, denn der Dipol ist ein symmetrischer, Koax aber ein unsymmetrischer Leiter. Einfacher ist in der Tat der Anschluss eines simplen Antennenstabs,



Bei Antennen gilt als Faustregel, dass mechanisch größere Konstruktionen typischerweise den höheren Gewinn bringen.



WLAN funkt nur dann gut, wenn Sichtverbindung besteht. Die Fresnel-Zone, ein gedachter Football-förmiger Körper zwischen Sender und Empfänger muss weitgehend hindernisfrei sein.

dessen Gegenpol die Erde ist, die Physik hat netterweise dessen Fußimpedanz mit ungefähr 40 Ohm in die Nähe der Impedanz der üblicherweise verwendeten 50-Ohm-Kabel gelegt, wenn dieser Stab eine Länge von einem Viertel der Wellenlänge hat.

Eine weitere Möglichkeit, das WLAN-Signal in die Luft zu bekommen, sind Patch-Antennen. Dabei handelt es sich um eine geeignet gespeiste rechteckige Fläche, den Patch, die sich vor einer großen Massefläche befindet. Mindestens eine Kantenlänge des Patches entspricht dabei der halben Wellenlänge, wobei sich durch die Wahl eines geeigneten Dielektrikums zwischen Patch und Massefläche die Länge verkürzen lässt. Derartige Antennen eignen sich besonders gut für den Aufbau auf Leiterkarten.

Braucht man eine noch stärkere Richtwirkung, die eine Einzelantenne allein nicht schafft, kann man über Koppelglieder auch mehrere Patch-Antennen zu Gruppen zusammenschalten. Durch die Interferenz der Wellen im freien Raum bildet sich eine Hauptkeule, auf die sich die Abstrahlung konzentriert, allerdings sind Nebenkeulen unvermeidbar. Je größer die Anzahl der Einzelantennen ist, umso größer ist die Richtwirkung und damit der Antennengewinn. Bei einem Stacked Array liegen beispielsweise mehrere Stabantennen übereinander.

Die Zusammenschaltung muss nicht unbedingt per Kabel erfolgen: Bei der Yagi-Uda-Antenne reichen in Richtung der Ausstrahlung angeordnete Stäbe, die im Grunde kurzgeschlossene

Einzelantennen repräsentieren, welche die Welle führen. Hinter dem eigentlichen Empfangsdipol befindet sich noch ein Reflektorstab oder sogar ein Maschenetz. Die Yagi kommt häufig noch auf Hausdächern als Empfangsantenne für terrestrisches Fernsehen vor, sie wird aber auch gern für WLAN genutzt, weil es ein breites Angebot mit passender Wellenlänge im Amateurfunkfachhandel gibt.

Die beste Antenne nützt bei WLAN allerdings nichts, wenn sich zwischen Sender und Empfänger große Hindernisse befinden. Noch immer gilt beim Funk mit Frequenzen über 100 MHz: Richtfunk ist Sichtfunk, das sogenannte Fresnel-Ellipsoid - ein imaginärer „Football“ zwischen Sender und Empfänger - sollte möglichst frei sein. Dabei dürfte leicht verständlich sein, dass kleinere Hindernisse in der Mitte der Funkstrecke, wo das Ellipsoid die größte Weite aufweist, weniger stören als solche unmittelbar vor der Antenne.

Wetterschutz

Eine Gefahr für WLAN-Antennen sind die Naturgewalten. Patch-Antennen besitzen zumeist eine Kunststoffhülle (Radom), die bei Eisansatz einen Totalausfall infolge einer Verstimmung der Antenne vermeidet. Auch bei Selbstbauantennen sollte man auf den Wettereinfluss achten, also die Antennenelemente mit einem wetterfesten Klarlack versehen, der vor Korrosion schützt, bei geschlossenen Röhren (Kaffeedosenantennen) einen Kondenswasserablauf anbringen, Kabel generell nach unten herausführen (damit kein

Wasser vom Kabel in den Stecker läuft), nach dem Aufbau die Steckverbinder mit Lack versiegeln und so weiter.

Ein Koaxialkabel, in das Feuchtigkeit eingezogen ist, verändert seine elektrischen Eigenschaften drastisch und ist normalerweise ein Totalschaden, da man es mit Hausmitteln nicht wieder trockenlegen kann. Wenn nur die ersten Meter betroffen sind, kann man das Ende großzügig abschneiden und eventuell den Rest retten.

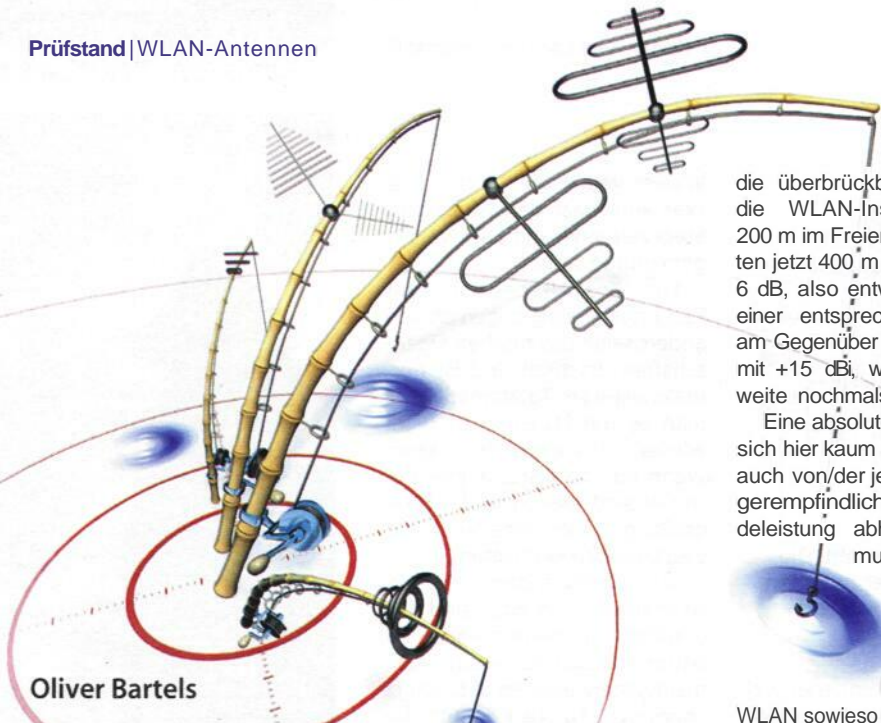
Von einem anderen Wetterphänomen, dem Blitz, sind alle draußen montierten Antennen betroffen. Dort sollte ein Fachmann einen äußeren Blitzschutz anbringen. Für den Schutz der Antennenzuleitung bietet der Fachhandel zwischenschaltbare Elemente an. Schließlich muss man bei der Montage großer Antennen an Masten auf die Windlast achten: Bei Sturm können sie starke Kräfte auf den Mast ausüben, die ihn im schlimmsten Fall umknicken.

Nach all dem Aufwand nun am Kabel zu sparen rächt sich schnell: Schon wenige Meter billiges Kabel können leicht den gesamten Gewinn einer guten Antenne schlucken. Bei der Verbindung zwischen Antenne und WLAN-Karte etwas großzügiger zu sein ist gut angelegtes Geld, denn es wäre schade, wenn die guten Ideen, die hinter den vielfältigen Antennenkonstruktionen stecken, auf dem Weg zum WLAN-Gerät verloren gingen.

(ea)

Literatur

- [1] Kabeldämpfung bei 2,4 GHz, www.wireless-lans.de/de/outdoor/antennen/kabel.asp
- [2] Übersicht Steckertypen, www.wireless-lans.de/de/outdoor/antennen/stecker.asp
- [3] Anleitung Stecker montage, www.steckerprofi.de/montage.htm
- [4] Meinke, Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag
- [5] Prof. Dr. U. Gysel, Vorlesungsbeilage Antennen, Zürcher Hochschule Winterthur, www.zhwin.ch/~gys/HFf/Antennenf/Antennen.pdf
- [6] Karl Rothammel, Antennenbuch, z. B. bei www.darc.de oder www.funkamateurl.de
- [6] WLAN-Antennenselbstbau, www.myteron.de/wavehan/ c't



Oliver Bartels

Weiter funkten

WLAN-Antennen unter der Lupe

Mit den Standardantennen an Access Points oder Bridges stößt man schnell an die Reichweitengrenzen drahtloser Netzwerke. Im Freien ist schon nach einigen hundert Metern Schluss. Doch dabei muss es mit externen Antennen nicht bleiben, c't hat Industrieprodukte und Selbstbaulösungen untersucht.

Wer seine WLAN-Reichweite steigern will, braucht eine gute, externe Antenne. Das Angebot ist groß und damit Grund genug, einige Exemplare einer genaueren Betrachtung zu unterziehen. Wir haben zwei Rundumstrahler, zwei passive Richtantennen, ein aktives Kit sowie zwei selbst gebaute Hohlleiterantennen nach einem besonders einfachen Bauprinzip messtechnisch untersucht. Bei den kommerziellen Antennen wurden zwei Exemplare gemessen, um eventuelle Serienausreißer zu erwischen.

Um die bei einer bestehenden WLAN-Anlage gegebene Reichweite zu erhöhen, muss man Richtantennen einsetzen, die die Ausgangsleistung der WLAN-Sender in eine bestimmte Richtung bündeln und beim Empfang aus dieser Richtung als passive Signalverbesserer wirken. Grundsätzlich lässt sich schon mit nur einer Antenne entweder am Client oder am Access Point die Reichweite zwischen diesen beiden Stationen erhöhen. Bei Einsatz am Access Point deckt dieser freilich nicht

mehr alle Richtungen gleich gut ab (siehe vorstehenden Beitrag).

Clients mit zusätzlichen Antennen können sich jedoch weiter vom Access Point entfernen, ohne dass Mobilstationen in anderen Bereichen schlechter versorgt werden. Ein Access Point mit einer Richtantenne versorgt nur Clients in einem bestimmten Raumsektor, die aber besonders gut. Entsprechend lassen sich auch Richtfunkstrecken als Ersatz für Mietleitungen aufbauen, bei denen zwei fest installierte Stationen nur miteinander sprechen. Dabei setzt man an jeder Station eine Richtantenne ein. Grundstücksüberschreitende Richtfunk-Installationen, über die Daten für Dritte fließen, können jedoch eine RegTP-Genehmigung erfordern.

Welchen Reichweitzuwachs eine externe Antenne gegenüber der vorhandenen bringt, lässt sich grob anhand des Antennengewinns abschätzen: Hat die vorhandene Antenne +3 dBi (typischer Wert für ein einfaches Stäbchen an Access Points) und die neue bringt +9 dBi, also 6 dB mehr, dann verdoppelt sich etwa

die überbrückbare Distanz. Hat die WLAN-Installation vorher 200 m im Freien geschafft, müssten jetzt 400 m drin sein. Weitere 6 dB, also entweder der Einsatz einer entsprechenden Antenne am Gegenüber oder eine bessere mit +15 dBi, würden die Reichweite nochmals verdoppeln.

Eine absolute Reichweite lässt sich hier kaum angeben, da diese auch von/der jeweiligen Empfängerempfindlichkeit und der Sendeleistung abhängt. Außerdem muss die Strecke zwischen den Stationen weitgehend frei sein, spätestens am Horizont ist mit WLAN sowieso Schluss.

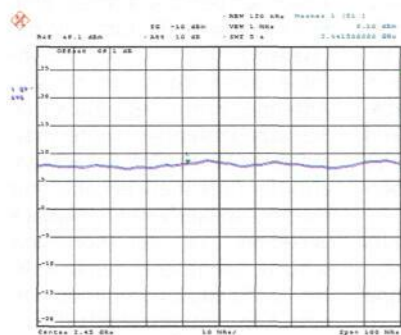
Im Unterschied zu Prozessoren gibt es bei WLAN-Antennen keine vordefinierten Benchmarks, denn zu vielfältig sind die Anforderungen. Eine passive Antenne, die möglichst eine Rundumabdeckung sicherstellen soll, kann physikalisch bedingt nicht den gleichen Gewinn wie eine Richtantenne haben. Hinzu kommt, dass es reichlich Antennenparameter gibt, teilweise eine Abhängigkeit vom Messaufbau besteht und Messungenauigkeiten in der Größenordnung von etwa 1 dB unvermeidlich sind.

Um die Korrektheit der Herstellerangaben zu verifizieren und einen Überblick über die Qualität zu bekommen, haben wir zunächst die Anpassung (siehe vorstehenden Artikel) am Antennenfuß mit einem Netzwerkanalysator HP8753E der Firma Agilent überprüft. Nach einer vorhergehenden Kalibrierung speist dieses Gerät über den zu prüfenden Frequenzbereich ein Signal in die Antenne ein, koppelt die von der Antenne reflektierte Leistung mittels Richtkoppler aus und misst diese. Eine ideale Antenne soll-

te möglichst keine Leistung reflektieren (S11-Parameter), S11-Messwerte unterhalb von -10 dB gelten als sehr gut. Hingegen bedeutet eine Reflexion von -3 dB, dass bereits die Hälfte der eingespeisten Leistung nicht abgenommen wird und es demzufolge mit der Qualität nicht allzu weit her ist.

Den Antennengewinn haben wir im Freifeld mittels eines Spektrum-Analysators FSP7 von Rohde & Schwarz mit eingebautem Tracking-Generator ermittelt. Ein Spektrum-Analysator zeigt die innerhalb des gewählten Frequenzbandes bei einer Frequenz vorhandene HF-Leistung an. Der Tracking-Generator erzeugt nun an der Stelle im Spektrum ein HF-Signal mit definiertem Pegel, an der der Spektrum-Analysator das Signal misst. Damit kann man die Dämpfung oder den Gewinn einer Übertragungstrecke erfassen. Diese Messung hätte zwar auch mit dem Netzwerkanalysator durchgeführt werden können, im Freifeld kann der Spektrum-Analysator mit Tracking-Generator seine höhere Empfindlichkeit und bessere Selektivität gegenüber Störsignalen ausspielen. Den Antennengewinn zeigt er nach geeigneter Kalibrierung unmittelbar über der Frequenz an.

Zur Kalibrierung und Verifikation des Messaufbaus wurde die Zwei-Antennenmethode verwendet. Wir haben uns zu diesem Zweck ein Prüflingspaar gleicher Bauart mit möglichst konstantem Frequenzgang herausgesucht; nach der vorangegangenen Reflexionsmessung und einem ersten Überblick kam die Huber+Suhrer-Antenne zum Einsatz. Der Abstand von 8 m und die Höhe der Antennen von 1,5 m auf einem geeigneten Stativ über Boden wurde exakt vermessen, ebenso die Dämpfung



Die Planarantenne von Huber+Suhrer zeigte über das WLAN-Band einen recht konstanten Gewinn von etwa 8 dBi. Sie kam deshalb als Referenzantenne zum Einsatz.

Materialquellen

www.hf-kabel.de	Adapter, Antennen, Kabel, Montagematerial, Stecker/Buchsen
www.reichelt.de	Adapter, Kabel, Stecker/Buchsen
www.steckerprofi.de	Adapter, Antennen, Kabel, Stecker/Buchsen
www.ukw-berichte.de	Adapter, Antennen, Kabel, Montagematerial, Stecker/Buchsen

der Zuführungskabel. Bei einer Wellenlänge von etwa 12 cm befindet sich die gegenüberliegende Antenne sicher im Fernfeld, sodass eine individuelle Kompatibilität der Antennen zueinander keine Rolle spielt, sofern nur die Messantenne die Polarisation richtig selektiert. Die Gegenrechnung ergab einen Gewinn von 8,0 dBi. Da dies knapp oberhalb der Spezifikation im Datenblatt liegt, war der Messaufbau korrekt.

Die Messung mit der Zwei-Antennen-Methode setzt keine rechnerische Einbeziehung von Herstellerangaben voraus. Deshalb wird dieser zu prüfende Antennentyp weder bevorzugt noch benachteiligt, wenn mit der nun vorliegenden Kalibrierung der Freifeld-Messstrecke weitere Antennenmuster gegen ein solches Exemplar getestet werden. Die hervorragende Konstanz des Gewinns über das gesamte WLAN-Frequenzband erlaubt zudem Messungen über die Frequenz. Mit der Nutzung einer realen WLAN-Antenne als Gegenüber möchten wir den teilweise von Anbieterseite geäußerten Bedenken entgegen-treten, dass Labormessungen eine Sache seien, der praktische Einsatz aber ganz andere Ergebnisse bringen würde. Die in den meisten Fällen gute Übereinstimmung der Messungen mit den Herstellerangaben zeigt, dass Hochfrequenz kein Voodoo ist - aber auch kein Kinderspiel.

Auf die Erstellung eines kompletten Richtdiagramms wurde wegen des hohen Aufwands verzichtet, im Wesentlichen ging es bei den Messungen nur darum, den Produktdatenblättern auf den Zahn zu fühlen, ob sich die gemachten Angaben verifizieren lassen und ob es sich um Spitzenwerte bei lediglich einer Frequenz oder um zuverlässig für das gesamte WLAN-Band zutreffende Angaben handelt. Es sei noch einmal betont, dass die Messmethode im Freifeld bestimmte Unsicherheiten aufweist. Unsere Messunsicherheit dürfte auf jeden Fall kleiner als ± 2 dB sein.

Allnet 5-dBi-R-SMA-Antenne

Das Produkt wurde mit einem Reverse-SMA-Verbinder geliefert. Dieser Verbinder verdankt seine Existenz US-Bestimmungen, nach denen für WLAN-Zusatzantennen keine marktüblichen Stecker zu verwenden seien, um den Anschluss anderer Antennen mit höherem Gewinn zu verhindern. Solch eine Vorgabe hält genau solange, bis geeignete Adapter aus Fernost verfügbar



Allnet 5-dBi-R-SMA-Antenne: Schlanker Rundstrahler, gut für den Einsatz am Access Point geeignet.

sind, typischerweise vier Wochen. In Europa besteht für die Verwendung dieser Steckverbinder keine Notwendigkeit.

Die Stabantenne scheint von ihrer Bauart her hauptsächlich für den direkten Einsatz an Access Points bestimmt zu sein, der R-SMA hat hier tragende Funktion. Die Antenne ist bei Bedarf über ein eingebautes Gelenk abwinkelbar. Die Messungen zeigten keinen wesentlichen Unterschied zwischen dem geraden und abgewinkeltem Betrieb. Der Antennengewinn lag über die Frequenz eher etwas oberhalb der versprochenen 5 dBi als darunter, die Welligkeit war gering, die s11-Reflexion blieb über das gesamte WLAN-Band deutlich unter -10 dB, die Resonanz lag klar in der Bandmitte und der Unterschied zwischen beiden

Testexemplaren war gering. Alles in allem ist diese Antenne für den direkten Einsatz am Access Point sehr gut geeignet.

Allnet 12-dBi-Outdoor-Antenne

Bei der 12-dBi-Outdoor-Antenne handelt es sich offenbar um ein Exemplar der Gattung Stacked Array: In einem Stab mit 1,2 m Länge stecken mehrere Rundstrahlelemente, sodass eine vertikal schmale, horizontale Ebene mit hohem Gewinn versorgt wird. Beim Einsatz dieses Antennentyps geht man davon aus, dass Stationen, die sich in größerer Entfernung befinden, in einem kleinen Winkel zu dieser Ebene liegen. Die Antenne hat einen Anschluss für einen N-Steckverbinder. Mechanisch ist der Aufbau solide, leider fehlte eine Montageanleitung.

Messtechnisch hinterließ diese Antenne trotz des interessanten Konzeptes einen durchwachsenen Eindruck: Schon bei der Messung der s11-Reflexion bestand zwischen beiden Exemplaren ein deutlicher Unterschied, generell scheint diese Antenne eher auf das untere WLAN-Band abgestimmt zu sein. Damit korrespondiert auch die Messung des Gewinns, mehr als +6 dBi erreichte die Antenne lediglich im unteren Teil des WLAN-Bands.

Trotz intensiver Bemühungen konnten wir die versprochenen +12 dBi nicht nachvollziehen, in Einzelfällen sind wir bei manuellen Schwenks der Antenne auf +8 dBi gekommen. Ein Vergleich mit ähnlichen Produkten anderer Hersteller zeigt, dass dort die Grenze bei +8 dBi bis maximal +10 dBi in den Datenblättern gesehen wird. Nach Aussage von Allnet wird dieser Typ nur für den Diversity-Einsatz (zwei Antennen an einem Access

Allnet Outdoor-Antenne: Mit 12 dBi Gewinn im Katalog, maximal 8 dBi in der Freifeldmessung.



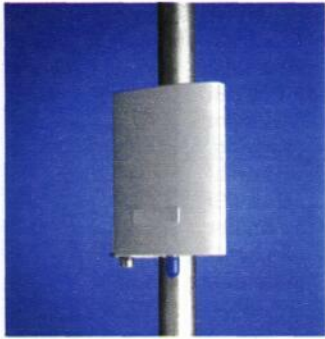
Point) empfohlen und sei für eine versetzte Montage zweier Exemplare gedacht, ein Datenblatt wurde uns leider nicht nachgeliefert.

Huber+Suhner SPA2400/75/8/0/V

Beim Produkt des Schweizer Herstellers Huber+Suhner handelt es sich um eine Flachkonstruktion mit SMA-Anschluss. Die Antenne steckt in einem kleinen und leicht zu montierendem Kunststoffgehäuse, das als Radom (Wetterschutzhülle um Antennen) fungiert. Weil die gemessenen elektrischen Eigenschaften über einen sehr weiten Frequenzbereich konstant sind, der s11 -Reflexionsfaktor liegt über mehr als 200 MHz - weit über das WLAN-Band hinaus - unter -10 dB, braucht man sich über solche Einflüsse ohnehin wenig Gedanken zu machen. Der Unterschied zwischen beiden Mustern war minimal, was diese Antennen schon fast zu Messantennen qualifiziert. Der Gewinn lag mit 8 dBi etwas über dem im Datenblatt spezifizierten Wert. Über alles betrachtet re-

Nur im unteren Teil des WLAN-Bandes erreichte der 12-dBi-Rundstrahler von Allnet einen brauchbaren Gewinn, doch auch dort nicht mehr als 6 dBi.





Huber+Suhner SPA 2400: konstanter Gewinn über das WLAN-Band, sehr kompakt und unauffällig

präsentiert dieser Antennentyp die sprichwörtliche Schweizer Präzision.

WiMo PA-13R

Die WiMo PA-13R ist etwas tiefer als das Huber+Suhner-Produkt gebaut und macht einen ähnlich soliden Eindruck. Der Steckverbinder ist in diesem Fall vom N-Typ, für die Befestigung am Mast



WiMo PA-13R: etwas klobig, aber mit hohem Gewinn

bestehen vielfältige Möglichkeiten. Von der Bauart her handelt es sich bei dieser Flachantenne um ein Hybridquad, eine Drahtstruktur befindet sich vor einer großen Massefläche. Der Gewinn lag mit 9 dBi etwas höher als bei der Huber+Suhner-Flachantenne und blieb über das gesamte WLAN-Band in dieser Größenordnung. Bei der Reflexionsmessung trat zwischen den beiden Mustern eine Differenz auf, die aber in der praktischen Anwendung für WLAN-Karten keine Bedeutung hat. Auch für dieses Produkt gilt, dass es den beabsichtigten Zweck sicher erfüllt.

Selbstbau-Hohlleiterantennen

Über die beruhend auf einer Internet-Anleitung selbst gebaute Pringles-Antenne sollte man lieber den Mantel des Schweigens breiten. Obwohl wir uns vergewissert haben, dass die Chips wirklich weggegessen waren, sind die elektrischen Eigenschaften unserer Selbstbau-Antenne mit 73 mm Innendurchmesser schlicht eine Katastrophe. Bei diesem Durchmesser müsste die Pringles-Dose nämlich rechnerisch mindestens einen halben Meter lang sein, um überhaupt als Hohlleiter in der oberen Hälfte des WLAN-Bandes zu funktionieren. Die Reflexionsmessung mit einem kompromissweise 65 mm vom Dosenboden montierten /4-Strahler zeigte eine viel zu hohe Resonanzfrequenz, und in der Mitte des WLAN-Bandes wurden über 85 % der Leistung zum Sender zurückgeworfen. Ein leistungsstarker Sender würde dies kaum überleben. Von einem Antennengewinn kann hier keine Rede sein, über weite Bereiche steht der Marker im negativen Bereich. Der Selbstbau war für die Katz, hätte selbige das Antennenkabel einfach nur abgenagt, wäre das Ergebnis vermutlich besser ausgefallen.

Während die für 2,4-GHz-WLAN zu dünne Pringles-Dose mit Pauken und Trompeten durchfällt, funktioniert das Hohlleiterkonzept mit Dosen von 10 cm Durchmesser recht zuverlässig. Das probierten wir mit zwei unterschiedlichen Typen aus, einer aus Vollblech (nur natur Fruchtkaffee) und einer aus beschichteter Pappe (Karo Landkaffee). Das Konzept braucht keine Voodoo-Konstruktionen aus Alu-Stäben und Unterlegscheiben im Inneren, ein einfacher Antennenstab (versilberter Kupferdraht) mit einem Viertel der Wellenlänge reicht völlig aus.

Die Pringles-Dose (links) reflektiert fast die gesamte Leistung zum Sender, die s11-Kurve liegt über weite Strecken fast auf der 0-dB-Linie. Die Kaffeedose schickt dagegen wesentlich weniger Leistung zum Sender zurück.

Und siehe da, plötzlich bringt die Dose mit N-Verbinder einen gescheiten Gewinn von rund 9,5 dBi mit nur geringem Abfall zu den Bandgrenzen hin. Sie zeigt auch ein durchaus ansprechendes Reflexionsverhalten, das es über das gesamte Band mit den Industrieprodukten aufnehmen kann. Bei den Messungen wurden interessehalber auch die Abstrahlwinkel $\pm 30^\circ$ überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Dose erwartungsgemäß mit etwa 15° leicht nach oben schießt, wenn der Kabelanschluss nach unten weist.

Bei der Dose aus beschichteter Pappe war das Reflexionsverhalten messbar schlechter. Der Ge-



Die selbstgebaute Pringles-Antenne schlug sich in der Messung zwar besser als ein loses Kabelende, aber deutlich schlechter als die Kaffeedose.

winn lag trotzdem noch bei gut 9,5 dBi, wenn auch mit etwas mehr Abstrichen zu den Bandgrenzen hin. Offenbar taugt Vollblech besser als beschichtete Pappe. Der entscheidende Unterschied zur Pringles-Antenne liegt aber im Durchmesser der Dose. Wählt man diesen ausreichend groß, dann funktioniert eine solche Selbstbau-Antenne als Hohlleiter erstaunlich gut. Wichtig ist dabei in jedem Fall eine hohe Fertigungspräzision. Ein Problem beim Selbstbau ist freilich, dass eine messtechnische Prüfung nur mit hohem Aufwand möglich ist.



Das Innenleben der Dosenantennen ist denkbar einfach: Für 2,4-GHz-WLAN genügt ein 31 m langer /4-Strahler aus versilbertem Kupferdraht.

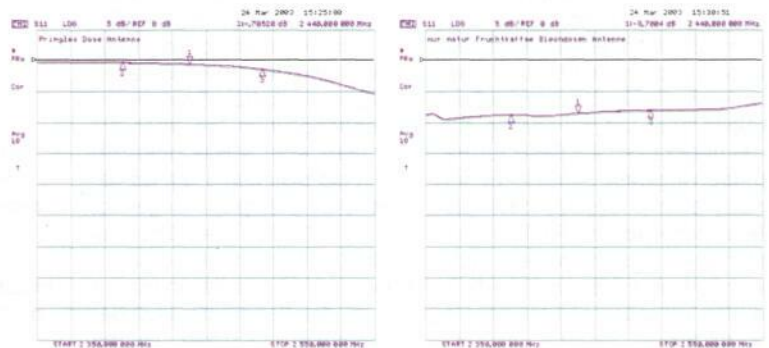
Alternativ empfiehlt sich der Vergleich mit einer Industrieanenne unter Verwendung der Feldstärkeanzeige der WLAN-Karte.

Eine Bauanleitung für diesen Antennentyp findet man im Web (www.saunalahti.fi/elepal/antenna2.html). Das dort zu findende Javascript-Applet rechnet für den anzugebenden Dosendurchmesser und die gewünschte Betriebsfrequenz die nötige Länge und den Montagepunkt des Strahlers aus. Passende N-Buchsen und Stecker sowie Kabel gibt es im Fachhandel, siehe Kästchen „Materialquellen“ auf Seite 181.

SSB-Electronic Link 45 Set

Das Kit von SSB-Electronic nimmt eine Sonderstellung ein, da es aus einer Richtantenne plus aktivem Vorverstärker besteht. Außerdem gehören zwei Koaxstücke (1 und 20 m) aus hochwertigem Kabel sowie ein Einspeiseadapter zum Lieferumfang. Der Vorverstärker hängt über das kurze Kabel direkt an der Antenne, das lange Kabel führt man dann zum WLAN-Gerät weiter. Dort speist man über den Adapter die Versorgungsspannung ein. Der typische Einsatzbereich dieses Kits sind Richtfunkstrecken.

Zwecks Vergleichbarkeit wurden zunächst die Antennen im



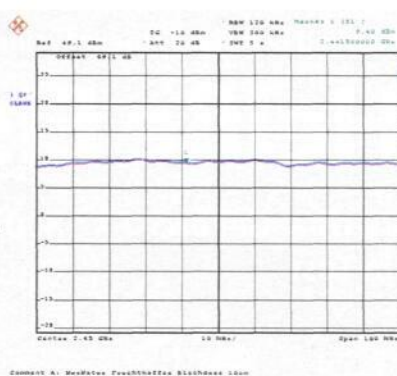
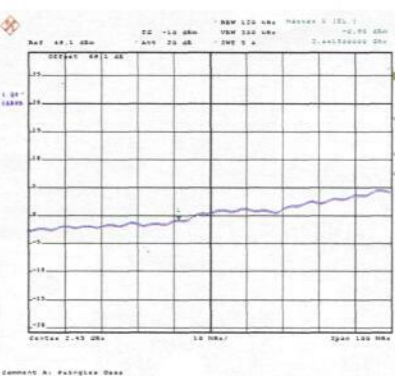
selben Messaufbau wie die übrigen Kandidaten geprüft. Das ergab mit über +15,5 dBi den höchsten Gewinn dieses Tests, wobei sich die beiden Prüflinge leicht unterschieden. Die Differenz kann aber bei einer so starken Bündelung auch aus nicht hundertprozentig exakter Ausrichtung resultieren. Gerade bei hochgradig auf Richtwirkung getrimmten Antennen kann der Messaufbau bezüglich der letzten dB Genauigkeit an seine Grenzen kommen.

Das Reflexionsverhalten ist ebenfalls über das gesamte Frequenzband ordentlich, wobei auch hier ein Exemplar bessere Werte zeigte. Eine Messung des beigelegten Kabels ergab etwa 4,5 dB Dämpfung über 20 m; die resultierenden 0,22 dB/m sind ein ordentlicher Wert, der sich wohlthuend von Billigkabeln ab-



Profilösung zum Profipreis: Mit dem Link 45 Set von SSB kann man lange Antennenkabel einsetzen, im Sendebetrieb im erlaubten Leistungsbereich bleiben und trotzdem viele Kilometer überbrücken.

Im unteren Teil des WLAN-Bandes hat die Pringles-Dose (links) als Hohlleiter sogar einen Verlust 0 dB), wogegen die Kaffeedose mit fast 10 dBi so gut wie kommerzielle Antennen funkt.



hebt, die mehr als 1 dB/m verlieren. Allerdings ist das Kabel mit einem Zentimeter Durchmesser recht dick und steif, also nicht leicht zu verlegen. Scharfe Knicke muss man dabei unbedingt vermeiden.

Der Vorverstärker wurde separat vermessen und zeigte in Empfangsrichtung eine Rauschzahl von 2,3 dB, was nach der Erfahrung des Autors einen ausgezeichneten Wert darstellt. Infolge der Verstärkung in Empfangsrichtung von 10 dB bleibt trotz des langen Kabels eine Restverstärkung von 6 dB. Da die Rauschzahl des Vorverstärkers deutlich besser sein dürfte als die der meisten WLAN-Karten, dürfte unterm Strich eine Reichweitenerhöhung resultieren; der Vorverstärker funktioniert als ausgelagertes besseres Frontend der WLAN-Baugruppe.

Die Umschaltung in den Sendebetrieb erfolgt durch die anliegende Leistung am WLAN-seitigen

Port, was ab etwa 0 dBm messtechnisch erkennbar war. Das Modul hat dabei allerdings einen Einfügeverlust von rund 5 dB, in Senderichtung wird nicht aktiv verstärkt. Zusammen mit der Kabeldämpfung von ebenfalls 4,5 dB reduziert sich damit im Sendebetrieb der Gesamtgewinn der Anlage auf etwa 6 dB. Mit den typischen +13 dB Ausgangsleistung marktüblicher WLAN-Baugruppen liegt man damit noch im erlaubten Bereich. Die messtechnischen Daten des Kits deuten an, dass sich damit bei hindernisfreier Strecke Reichweiten von einigen Kilometer erreichen lassen, der Hersteller spricht bei diesem Produkt von sechs Kilometer. Der gesamte Aufbau macht zudem einen mechanisch soliden Eindruck.

Fazit

Der Test zeigt ein insgesamt recht erfreuliches Ergebnis, die kom-

merziellen Antennen halten mit einer Ausnahme weitgehend ihre Versprechen ein. Die Flachantennen haben einen qualitativ guten Eindruck hinterlassen. Seinen hohen Preis kann das SSB-Kit rechtfertigen, es dürfte eine gute Grundlage für stabile WLAN-Richtfunkstrecken über mehrere Kilometer bilden. Auch ein Selbstbau einfacher Antennen ist machbar, doch kommt es auf passendes Ausgangsmaterial und Genauigkeit beim Aufbau an. Bei einer Dose mit zu geringem Durchmesser reißen auch aufwendige Tricks nichts mehr raus, denn die Physik lässt sich nicht überlisten. (ea)

Oliver Bartels (oliver@bartels.de) ist Geschäftsführer der Bartels System GmbH und entwickelt aktiv Hochfrequenz- und DSP-Baugruppen. Außerdem betreut er den Internet Service der GmbH, woraus sich zwangsläufig die Beschäftigung mit dem Thema WLAN für Service Provider ergibt.

WLAN-Richtantennen für 2,4 GHz

Produkt	5-dBi-R-SMA-Antenne	12-dBi-Outdoor-Antenne	SPA 2400/75/8/0/V ¹	PA-13R	Pringles-Dose	Kaffeedose	Link 45 Set
Hersteller/Anbieter	Allnet	Allnet	Huber+Suhner	WiMo	Selbstbau	Selbstbau	SSB-Electronic
Web	www.allnet.de	www.allnet.de	www.hubersuhner.de	www.wimo.de	z. B. www.netscum.com/~clapp/wireless.html	www.saunalahti.fi/elpal/antenna2calc.php	www.ssb.de
Typ	Stabantenne	Stacked Array	Patch-Antenne	Biquad vor Reflektor	Hohlleiter	Hohlleiter	Patch mit Reflektor
Charakteristik	vertikal richtend, horizontal rundstrahlend	vertikal richtend, horizontal rundstrahlend	vertikal und horizontal richtend	vertikal und horizontal richtend	vertikal und horizontal richtend	vertikal und horizontal richtend	vertikal und horizontal richtend
Anschluss	R-SMA	N-Buchse	SMA-Buchse	N-Buchse	N-Buchse	N-Buchse	N-Buchse
Außenmaße	D: 13 mm, H: 195 mm	D: 22 mm, H: 1220 mm	B: 80 mm, H: 100 mm, T: 21 mm	B: 128 mm, H: 128 mm, T: 65 mm	D: 75 mm, T: 230 mm	D: 98 mm, T: 180 mm	D: 445 mm, T: 210 mm
Lieferumfang	Antenne, R-SMA-zu-N-Adapterkabel (RG400, 1,5 m)	Antenne, Alu-Fußrohr, Montagematerial (Halter, U-Bügel)	Antenne, Montagematerial (Halter, Schelle)	Antenne, Montagematerial (Halter, U-Bügel), Datenblatt inkl. Richtdiagramm	-	-	Antenne, 2 Kabel (Ecoflex 10, 1 m, 20 m), Vorverstärker, Netzteil, Einspeiseadapter
Messwerte							
Anpassung (s11)	-13,2 dB bis -31 dB	-8,9 dB bis -17 dB	-11,7 dB bis -15 dB	-8,3 dB bis -17,5 dB	-0,5 dB bis -1,5 dB	-3,1 dB bis -9 dB	-7,7 dB bis -25 dB (passiv)
Gewinn Bandmitte	4,5 dBi	3,3 dBi	8,1 dBi	9,1 dBi	-1 dBi	9,7 dBi	15,6 dBi (passiv)
Gewinn maximal	6,5 dBi bei 2,45 GHz	6,0 dBi bei 2,40 GHz	8,5 dBi bei 2,45 GHz	9,5 dBi bei 2,45 GHz	3,0 dBi bei 2,48 GHz	10 dBi bei 2,45 GHz	16 dBi bei 2,45 GHz (passiv)
Bewertung							
Anpassung	⊕⊕	⊕	⊕⊕	⊕	⊖⊖	⊖	○
Gewinn (bezogen auf Typ)	⊕	⊖	⊕	⊕⊕	⊖⊖	⊕⊕	⊕⊕
Aufbau	⊕	⊕	⊕⊕	⊕⊕	○	○	⊕
Preis	ca. 12 € ²	ca. 110 € ²	75 €	71 €	5 bis 10 € ³	5 bis 10 € ³	960 €
¹ Typennummer: 1324.19.0032 ² je nach Händler, Allnet ist Distributor ³ je nach Quelle der Dose und der N-Buchse							
⊕⊕ sehr gut ⊕ gut ○ zufrieden stellend ⊖ schlecht ⊖⊖ sehr schlecht ✓ vorhanden - nicht vorhanden							