

Blik in de verte

Hoe je met een zelfgebouwde antenne een WLAN-bereik van 1 km krijgt

Wie bedenkt nou dat je een wc-borstelhouder kunt gebruiken als een richtantenne voor WLAN? Het kost amper iets en je bent in een half uur klaar. De reikwijdte van je WLAN-netwerk verbetert daarbij enorm.



Met een fatsoenlijke antenne kun je een WLAN-router in één klap een stuk krachtiger maken. De goedkopere routers hebben meestal één zelig sprietje waarmee je binnen een gewoon huis al vrij gauw tegen de grenzen van het WLAN-bereik aanloopt. Als je een ADSL-verbinding wilt delen met je buurman of door je wijk wilt wardriven met het maximale bereik om andere draadloze netwerken te lokaliseren, dan heb je wat beters nodig. Het record staat trouwens op naam van onderzoeker Ermanno Pietrosomoli: hij bereikte in het Andesgebirge met speciale apparatuur een WLAN-verbinding over een afstand van 382 kilometer.

Een gemiddelde WLAN-antenne bestrijkt een gebied met een straal van zo'n dertig meter. Als je accesspoint zich dus aan de overkant van de straat bevindt of drie kamers verderop (maar met een paar muren ertussen die flink wat signaalverlies opleveren), dan kun je beter een richtantenne gebruiken. Daar ontcom je al he-

lemaal niet aan als je verbinding wilt maken met het andere einde van de straat of contact met een hotspot verderop. Meestal gebruik je dan zelfs een richtantenne aan zowel de zend- als ontvangskant.

Vanuit het oogpunt van een WLAN-router zijn andere WLAN-routers die binnen het directe dekingsgebied vallen en op een overlappende frequentie uitzenden de grootste stoorzenders. Daarnaast zijn er in een gemiddelde straat bovendien al snel nog tien tot twintig andere draadloze netwerken die een duit in het zakje doen. Met signaalstoringen over en weer als gevolg. Dit wordt ook wel interferentie genoemd. Hierdoor daalt de reikwijdte van een router en gaat de verbindingstabieleit drastisch omlaag.

Om je WLAN-dekingsgebied te verbeteren, is het overigens ook goed mogelijk om één van de twee antennes van je basisstation te vervangen. De tweede sprietantenne blijft dan gewoon gemonteerd voor de directe omgeving. Alle huidige WLAN-mo-

dules gebruiken namelijk voor elke client automatisch de meest geschikte antenne (*antenna diversity*). Daarom is het ook bij modellen met maar één externe antenne slim om eens in de behuizing zelf te kijken. Meestal zit er op je WLAN-module namelijk een minuscuul stekkergeatje waarop je een tweede antenne kunt monteren. Afhankelijk van de producent van je router heet dit stekkertype U.FL of Ipex. Met een korte adapterkabel (*pigtail*) kun je die aansluiting echter ook naar buiten leiden, bijvoorbeeld door een ventilatiespleet. Zelfs enkele WLAN-notebookkaarten en -usb-modules hebben zo'n antennestekker, meestal van het type SMA of RP-SMA (zie de meegeleverde documentatie).

Do's en don'ts bij richtantennes

Als je dan een antenneaansluiting hebt, mag je daar aanhangen wat je wilt. Dus bijvoorbeeld ook een WokFi-antenne, een combinatie van een rooster voor het wok-

ken en een usb-stick WiFi-dongle. Maar waarom dan niet meteen een zogenaamde *cantenna*? Daarbij gaat het om een grote richtantenne in de vorm van een blikken bus, in de volksmond ook wel bekend als een Pringles-antenne. Het concept is zeker niet nieuw, maar het wordt interessant nu praktisch iedereen toch een WLAN-router heeft. De blikafmetingen waar we dit artikel op baseren zijn geschikt voor basisstations en clients die werken volgens de bekende IEEE 802.11b- en 802.11g-standaarden. Eigenlijk zijn zulke routers gewoon radio-tjes die uitzenden op 14 gedeeltelijk overlappende frequenties rond de 2,4 GHz. Omdat 802.11a gebruik maakt van een andere frequentieband, namelijk rond de 5 GHz, heb je daar andere afmetingen voor nodig. We hebben op onze website hiervoor een handig omrekenoortje neergezet (zie softlink, de achterliggende theorie vind je in het volgende artikel). De nieuwste WLAN-accesspoints maken gebruik van de 802.11n-standaard, maar ook

daar is onze antenne helaas niet geschikt voor. Bij 802.11n worden wel dezelfde frequenties gebruikt als bij 802.11b en 802.11g, maar de n-standaard gebruikt meerdere technieken (waaronder terugkaatsing van signalen) om een grotere reikwijdte en snelheid te bereiken. Dat werkt alleen goed als je antenne voldoet aan de kenmerken die je WLAN-chipset verwacht.

Meestal gebruik je een richtantenne om de ontvangstkwaliteit in een klein gebied te verbeteren. Deze versterkt niet alleen het signaal dat uit de hoofdrichting komt, maar dempt ook andere draadloze netwerken als die zich niet in de hoofdrichting bevinden. Een groot deel van de stoorzenders wordt op die manier al simpelweg onderdrukt.

Het is overigens wel zo dat je een WLAN-richtantenne niet als zendversterker mag gebruiken. In Europa mag het uitgestraald vermogen op de frequenties van de WLAN-standaarden IEEE 802.11b/g (2,4 GHz) namelijk niet boven 100 mW uitkomen (Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP). Dat betekent dat een richtantenne in geen enkele richting sterker mag uitzenden dan een niet-gerichte antenne met een bolvormige karakteristiek waar 100 mW naar wordt gestuurd.

Normale WLAN-modules geven echter maar tussen de 30 en 50 mW af, waarvan je het verlies in de kabels naar de blikantenne nog moet aftrekken. Volgens onze metingen richt deze dan wel weer zó goed, dat van de absolute 50 mW die de WLAN-module in totaal afgeeft, méér dan de toegestane 100 mW het blik verlaten als je dat terugrekent naar EIRP-waarden bij een normale ongerichte antenne. Als je het zendvermogen aan het basisstation reduceert tot de helft, blijf je sowieso binnen de normen. Het is maar dat je het weet. Bij storingen kan het namelijk voorkomen dat je burens een klacht indienen, waarna je een meetteam op je dak krijgt dat komt kijken of je in overtreding bent. Je kunt je zendvermogen overigens ook reduceren door een langere antennekabel te gebruiken, maar dat belemmert ook de ontvangst.

Doorgaans zullen je burens echter blij zijn als je een richtantenne gebruikt, omdat deze storingen nou net reduceert.

Zelfbouw materiaal

Een richtantenne kun je in de winkel kopen, maar dat kan prijzig zijn. Zelf bouwen blijft daarentegen verbazingwekkend goedkoop: je kunt met allerlei simpele materialen uit de voeten. Recepten voor hoe je met piepschuim een Yagi-antenne maakt, een quad- of biquad-antenne van een cd-spindel of reflecterende aluminium deksel vind je legio op internet. Maar een van de simpelste en makkelijkst na te bouwen ontwerpen is de blikantenne. Die bestaat simpelweg uit een blikken buis, een daarin bevestigde koperen stift en een aansluiting voor de kabel naar de router. In het artikel op pagina 138 kun je nalezen welke fysica hier achter schuil gaat.

In principe kun je voor een dergelijke blikantenne elk elektrisch geleidend metaal gebruiken. Kijk eens op de afdeling huishoudelijke artikelen in de supermarkt of zelfs tussen je huisvuil. Conservenblikken, koffieblikken, soepblikken, een koker van een duurdere fles whisky en nog veel meer kan in aanmerking komen. Let wel: de optimale interne diameter ligt voor 2,4 GHz-WLAN tussen de 84 en 92 millimeter. Daardoor valt een Pringles-blik eigenlijk af. Je kunt zelfs tot 111 mm gaan als je een licht verlies voor lief neemt qua richtsterkte en antennewinst. Hoewel in veel zelfbouwhandleidingen wat anders verteld wordt, is volgens onze ervaringen ook de lengte van doorslaggevend belang. Omdat de ideale resonantie zich periodiek herhaalt, hebben we in de tabel op pagina 137 meerdere voorbeeldmaten opgegeven (details vind je in het volgende artikel). De lengte van het blik hoeft niet eens precies te kloppen, pas als die meer dan twee centimeter afwijkt, wordt het tijd om de zaag uit de kast te halen.

Als de antenne weerbestendig moet zijn, is het zinvol om een blik van roestvrij staal of aluminium te nemen. In het ideale geval zijn de zijkanten en de onderkant van het blik glad en plat, dus zonder ribbels zoals veel conservenblikken die hebben. Anders ontstaat er verstrooiing en interferentie binnen de geproduceerde golf, waardoor zowel de antenneversterking (antenna gain) als het daaraan verbonden richteffect verslechtert.

Het enige waarvoor je de soldeerbout nodig hebt, is voor het vast solderen van de koperdraad met de binnenste geleider van de connector. Deze hoeft je daarna alleen nog maar in te korten tot de juiste lengte.

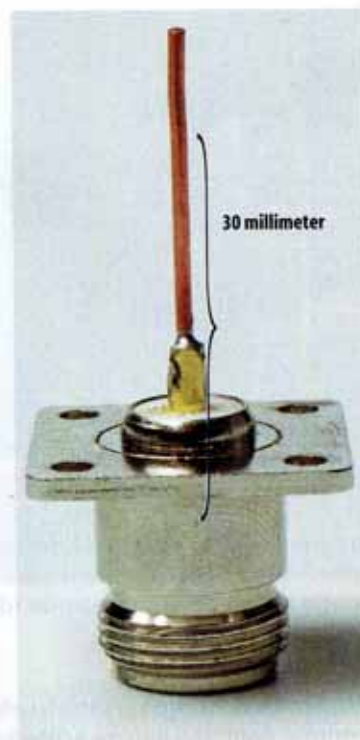
Gaten en spleten in de zijkant van het blik zijn daarentegen geen probleem, zolang ze niet groter zijn dan een tiende van de WLAN-golflengte. Bij 2,4 GHz is dat dus ongeveer zes centimeter. In geval van twijfel kun je jezelf behelpen met wat aluminiumfolie en plakband. Je moet in geen geval ringen of andere metalen delen aanbrengen die ter versteviging doorlopen naar binnen, die hebben wel een negatieve invloed.

Uiteindelijk kozen we voor een roestvrij stalen houder van een design-toiletborstel. Die blijkt uitermate geschikt als WLAN-antenna. We gingen voor onze zelfgebouwde antenne naar de eerste de beste bouwmarkt, zodat we de blikken ter plaatse konden opmeten. We hoefden niet eens te zagen, de grootte van onze borstelhouder bleek bijna ideaal: de interne diameter bedraagt 91,5 mm en de lengte 240 mm. De roestvrij stalen houder is uiteraard waterbestendig, dus kan die prima als buitenantenne dienen. Met een prijs van 20 euro valt die overigens wel al direct in de luxecategorie. Op internet vind je al vanaf acht euro modellen die er vergelijkbaar uitzien.

Aan de slag

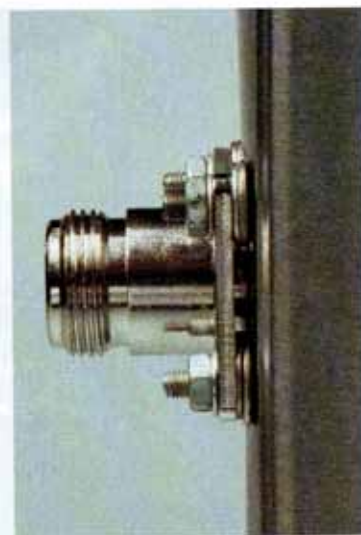
Even afgezien van de router en de antennekabel, die je bij elke zichzelf respecterende elektronicazaak kunt kopen, ben je voor de onderdelen voor deze blikken antenne maar een grijpstuiver kwijt: vier bevestigingsschroeven met een verzonken kop en bijpassende ringetjes en moeren, de 50-ohm N-connector (niet TNC) met flens (opstaande rand) en een stukje elektrotechnische installatiekabel en klaar! De kale draad

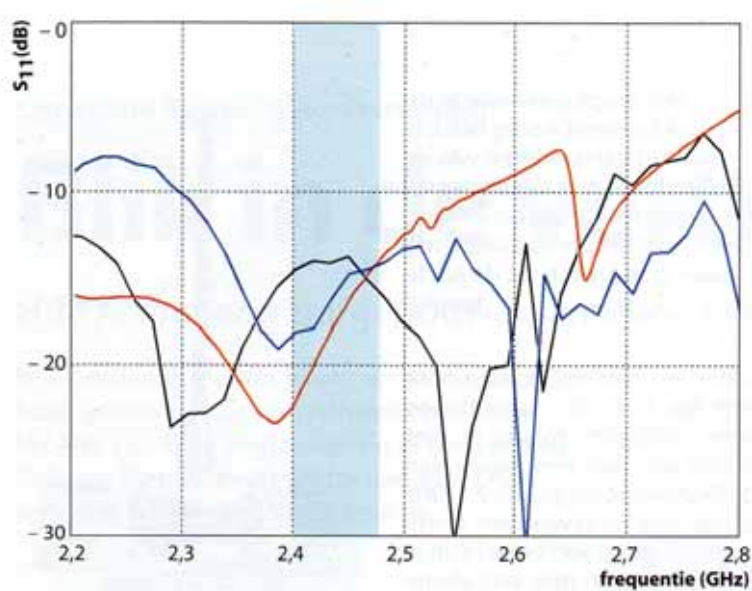
De metalen kraag en de zijkant van het blik moeten op dezelfde hoogte aansluiten. Twee ringetjes zorgen voor de juiste afstand.



mag niet dunner zijn dan een millimeter en moet in de N-connector passen. Let op: N-connectors met een bevestigingsmoer zijn maar tot op zekere hoogte geschikt voor de blikken antenne, omdat ze doorlopen tot binnen het blik en daarom fungeren als een stoorfactor voor de elektromagnetische golf en daarmee de antennewinst ('gain') verlagen.

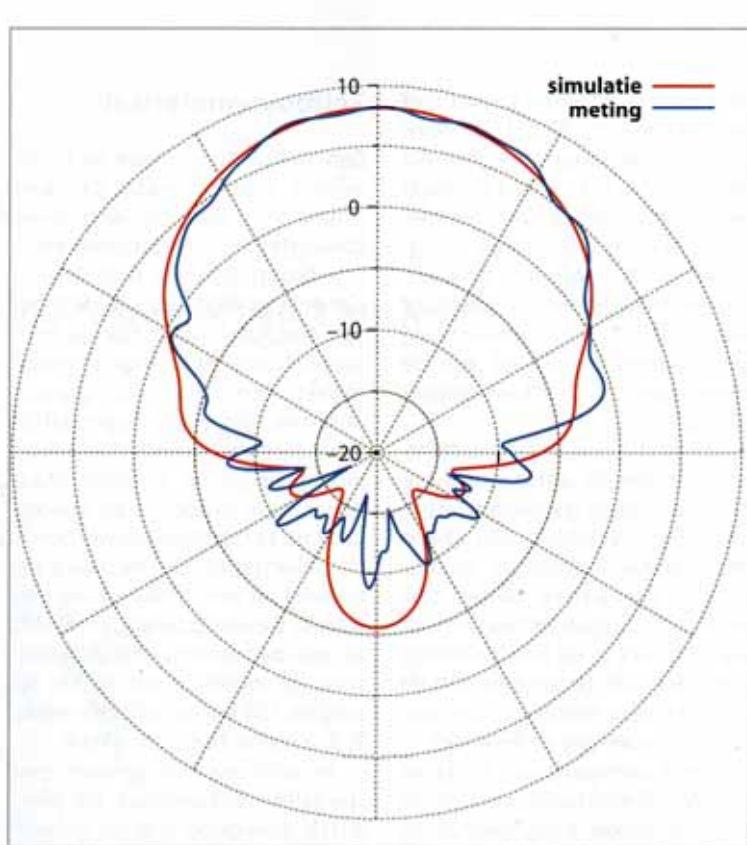
Voor de door ons gebruikte N-connector moet je vijf boorgaten maken: vier kleine voor de schroeven en een grote voor de N-connector zelf. Die moet precies zo breed zijn als de buitendiameter van de witte signaalgeleider van de N-connector, bij het door ons gebruikte blik tien millimeter. Dat moet je op zo'n manier doen dat de buitenste metalen geleider zo naadloos mogelijk op het me-





Antennes die met afwijkende parameters zijn gemaakt (blauw, zwart) wijken in het gemarkeerde WLAN-bereik maar een klein beetje af van de gesimuleerde ideale antenne (rood). Waarden onder -10 dB zijn goed.

Wat in de richtingskarakteristiek van de blikantenne opvalt, is de enorme demping aan de achterkant. Storende routers in de buurt zijn in dat gebied nauwelijks een probleem meer.



taal aansluit en zo min mogelijk binnenin het blik uitsteekt, zoals te zien in de afbeelding.

Om deze gaten te maken, kun je het dunne blik het beste uitboren. Omcirkel eerst zo nauwkeurig mogelijk de plek waar later de stift moet komen. De afstand tot de bodem binnenin het blik kun je uit de tabel op pagina 137 halen. Hou bij het meten rekening met de dikte van de bodem van het blik.

Maak het eerste boorgat met een zo klein mogelijke boor (2 mm). Met een hamer en spijker kun je makkelijk een centreerpunt maken. Als je met een hoog toerental werkt en niet hard drukt, is de kans klein dat je de boor vastdraait in het dunne blik. Op die manier kun je het gat in

stappen van ongeveer 2 mm telkens groter maken, tot de noodzakelijke diameter. Het laatste stukje kun je eventueel ook met een ronde vijl doen.

Als stift gebruiken we koperdraad van een reguliere installatiekabel. Die moet je vast solderen aan de binnenste geleider van de N-connector. Het is een stuk makkelijker om de draad eerst te solderen en dan in te korten in plaats van hem direct op lengte te snijden. De stift moet inclusief het uitstekende deel van de bevestiging 30 millimeter bedragen, een kwart van de golflengte van de werkfrequentie.

Aan de buitenkant tussen het blik en de N-connector zorgen een paar ringetjes voor de juiste afstand. Laat de metalen cilinder

om het witte diëlectricum van de connector precies op de hoogte van het blik aansluiten, zodat hij niet in het blik komt. De vier schroeven zorgen ook voor extra elektrisch contact naar het antenneblik. Als je blik gelakt is of op een andere manier gecoat, moet je daarom met schuurpapier zorgen dat er rondom de boorgaten elektrisch contact mogelijk is. Mocht het gat voor de connector te groot uitvallen en het elektrische contact naar de connector ontbreken, kun je jezelf behelpen door een prop van aluminiumfolie te maken en die tussen de connector en het blik te doen.

Zorg er bij al deze werkzaamheden wel voor dat het blik rond blijft, anders verzwakt het richteffect van de antenne.

Als je de antenne op een houder gaat monteren wanneer hij klaar is, boor dan geen extra schroeven door de zijkant, omdat anders de koppen binnenin stoorplekken creëren. Voor gebruik binnenshuis hoeft je het blik meestal toch niet steviger te bevestigen dan met duct tape of plakband, klittenband of grote tie-wraps aan een schap of plankhouder. Voor buitenmontage kun je beter kiezen voor een weersbestendige oplossing, zoals dakgootsteunen ringen of roestbestendig geplastificeerd gaatjesband.

Als je de antenne op je dak wilt zetten, moet je bovendien voor een bliksemafleiding zorgen. De verzekering betaalt in geval van schade namelijk alleen als de mast vakkundig is aangesloten.



Behalve de connectorpin mag er niets door de wand steken tot binnen het blik. Anders ontstaan er verliezen door verstrooiing en reflecties. Om die reden hebben we ook schroeven met een verzonken kop gebruikt.



De benodigde (kleine) onderdelen zijn voor een habbekrats te koop: N-connector, bevestigingsmateriaal en een stuk koperdraad.

Aan de buitenmuur monteren is simpeler: daarbij hoeft je de antenne slechts minimaal twee meter onder de dakgoot en hooguit één meter voor de muur te hangen. Met een muurhouder voor satellischotels is dat goed te doen. In veel gevallen kun je echter net zo goed de antenne binnen aan een raam vastmaken, al gaat er bij ramen met een moderne coating wel wat vermogen verloren.

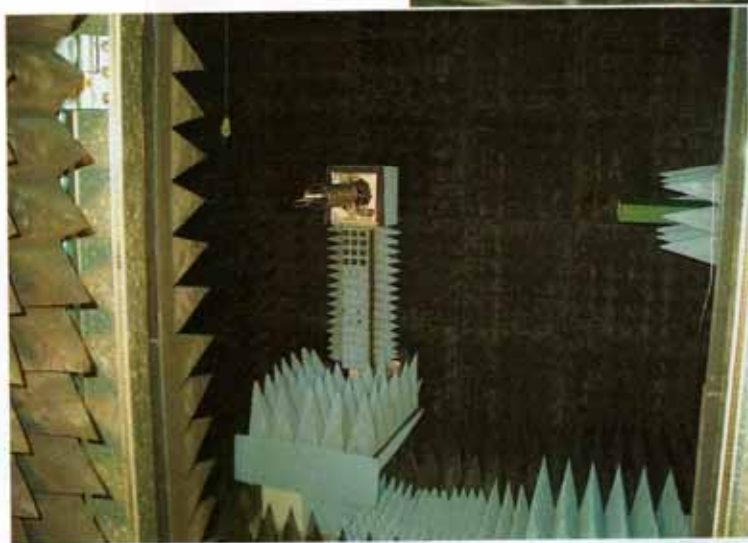
Montagefoutjes

Om uit te zoeken wat het antennevermogen is en in hoeverre het uitmaakt hoe je zo'n antenne maakt, bouwden we twee uitvoeringen van deze blikantenne. Die hebben we door onderzoekers van de Leibniz-universiteit in Hannover laten doormeten. Bij de eerste blikantenne waren de boorgaten tot op ongeveer een halve millimeter nauwkeurig, maar was de stift ongeveer 2 millimeter te lang. Bij de tweede blikantenne stond de stift niet helemaal recht en was het boorgat voor de connector een millimeter te ver van de achterwand verwijderd. Bovendien was de N-connector met slechts twee in plaats van vier schroeven bevestigd, wat een slechter elektrisch contact met het blik oplevert.

De conclusie van de wetenschappers: vergeleken met het ideale simulatieresultaat schommelen de performanceverschillen van beide antennes tussen een verwaarloosbare 0 en 1 procent. Kortom, als de diameter in het optimale bereik ligt, levert de antenne bij minder nauwkeurige montage nog altijd opmerkelijk goede resultaten.

Het strooidiagram op p.136 laat zien in hoeverre de twee

We hebben de wcborstelblikantenne ook aan een praktijktest onderworpen. De netto snelheid bedroeg onder optimale omstandigheden over een afstand van een kilometer ruim 8 Mbit/s.



antennes afwijken van het simulatieresultaat. Het is goed te zien dat de resonantiepiek van de antenne met de te lange stift (zwart) verschoven is naar iets meer dan 2,3 GHz. Deze frequentie komt overeen met een stiftlengte van ongeveer 32 millimeter. Bij de tweede antenne is de resonantiefrequentie goed (blauw), maar is de reflectie aan de ingang een stuk hoger. Deze afwijkingen zijn terug te voeren op een combinatie van onnauwkeurigheden bij het maken: een scheve stift, een verkeerde afstand tot de achterwand, een niet ideaal rond blik en een slecht contact tussen de N-connector en het blik.

Essentieel is echter dat de diameter klopt, omdat er anders meer vermogen naar de zender wordt teruggestraald in plaats van in de goede richting wordt uitgestraald. Dat gebeurt als je blik minder dan 84 of meer dan 111,5 millimeter groot is (zie de afbeelding op pagina 140).

Test, twee, drie, vier

Uiteraard hebben we onze zelfgemaakte antennes ook getest om te zien hoe ze presteerden. We hebben ze onder andere op een kilometer van elkaar opgesteld (met zichtcontact). Maar ook 30 meter van elkaar in een kantoorgebouw zonder zichtcontact. Als testopstelling kozen we twee



De blikantenne werd op de universiteit gemeten. Rechts zie je de ontvangstantenne. De antenne werd zowel om zijn verticale as als om zijn lengteas gedraaid.

WLAN-routers uit de WRT54G-serie van Linksys, en als routerbesturingssysteem installeerden we OpenWRT 7.07 'Kamikaze'. De doorvoer maten we met de netwerk-tool iperf. We berekenden de gemiddelde waarde van vijf halfduplex-testruns van elk 20 seconden bij een window size van 128 kB. De routers en de antennes waren met elkaar verbonden via kabels van drie meter.

Op de lange afstand konden de routers met een sprietantenne verbinding tot stand brengen. Maar met een blikantenne aan één van de twee routers kregen we een al verbinding. Iperf leverde een gemiddelde TCP-doorvoer op van 2,4 Mbit/s. Door bij beide routers een de blikantenne te gebruiken kon de doorvoer worden verhoogd naar 8,5 Mbit/s.

Hierbij moet in aanmerking worden genomen dat we de draadloze verbinding hebben getest onder ideale omstandigheden: zichtcontact en een bijna volledig vrije 'fresnel-zone', de ruimte tussen de twee antennes waarin de energie van de zender naar de ontvanger wordt overgedragen). Deze zone heeft ongeveer de vorm van een langgerekte rugbybal, die bij WLAN een diameter van ongeveer een derde van de wortel uit de afstand in meters heeft – bij een kilometer is dat zo'n tien meter. Als de fresnel-zone niet volkomen vrij

is, bijvoorbeeld omdat bomen of huizen te dicht bij de vrije zichtlijn staan, moet je met name als het regent flinke bandbreedteverliezen op de koop toe nemen.

In een kantooromgeving is er geen sprake van zo'n vrije fresnel-zone. Met sprietantennes kregen we zelfs op korte afstand door verschillende muren geen verbinding, maar met één blikantenne bereikten we al een doorvoer van 3,2 Mbit/s. Met aan beide kanten een blikantenne ging dat omhoog naar 7,1 Mbit per seconde. Onze constructie zou met name wat bedrading betreft nog verbeterd kunnen worden. Speciaal gemaakte, bij voorkeur korte kabels zouden het verlies nog kunnen verlagen.

Optimale blikafmetingen bij 2,4 GHz

Diameter	Bliklengtes	Afstand
84	149, 268, 386	59
86	140, 252, 364	56
88	134, 240, 347	53
90	128, 230, 332	51
92	124, 222, 320	49
94	120, 215, 310	48
96	116, 209, 302	46
98	113, 204, 294	45
100	111, 199, 287	44
102	109, 195, 282	43
104	106, 191, 277	43
106	105, 188, 272	42
108	103, 185, 268	41
110	102, 183, 264	41

Alle waarden in millimeters

Boodschappelijstje

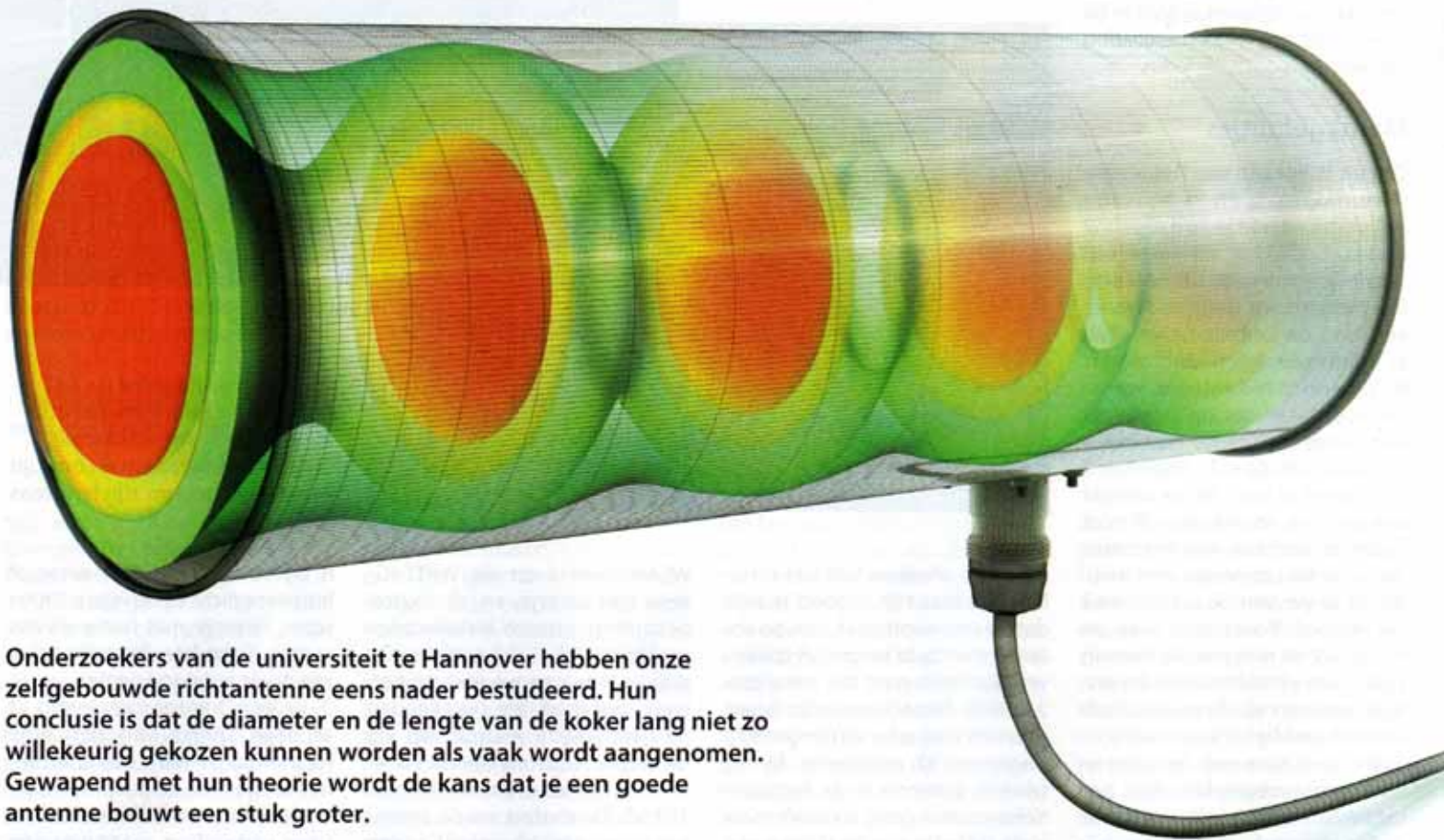
- N-connector, 50 ohm
- koperkabel 1,5 mm², bijvoorbeeld elektrotechnische installatiekabel
- bouten met verzonken kop, 10 mm lang, maximaal 3 mm schroefdraaddiameter
- vier bijpassende moeren
- sluitringetjes, ongeveer 20 stuks

Softlink 0803134

ct

Theorie achter de antenne

Op weg naar de optimale zelfbouwantenne



Onderzoekers van de universiteit te Hannover hebben onze zelfgebouwde richtantenne eens nader bestudeerd. Hun conclusie is dat de diameter en de lengte van de koker lang niet zo willekeurig gekozen kunnen worden als vaak wordt aangenomen. Gewapend met hun theorie wordt de kans dat je een goede antenne bouwt een stuk groter.

De blikken buisantenne, in het Engels ook wel Tin-Can-Antenna genoemd, is een van de eenvoudigste constructies om zelf een richtantenne te maken. Het bouwen van een krachtige antenne zoals in het vorige artikel kost inderdaad nauwelijks enige moeite. De hiervoor benodigde blikjes kun je simpel uit je eigen afvalstroom vissen en ook voor de andere onderdelen ben je maar een paar euro kwijt. Maar hoe werkt zo'n *antenna* nou precies en hoe ziet de optimale richtantenne eruit? Wie op zoek gaat op internet merkt dat daar tot nu toe nog maar weinig over is geschreven.

De blikken antenne heeft maar weinig gemeen met de traditionele richtantennes, zoals de harkantennes voor tv en radio die vroeger op veel daken stonden. Qua constructie werkt hij als een geleider voor elektromagnetische golven en lijkt dan ook meer op een grote coaxkabel. In

principe bestaat hij uit een metalen buis, die aan de ene kant open is en aan de andere dicht. Hierdoor vormt hij een zogenaamde ronde holle geleider die de elektromagnetische golf tot aan het open uiteinde geleidt. Pas aan het einde van de buis plant de golf zich door de lucht voort. Tot hij bij het open einde van de metalen buis aankomt, straalt de antenne geen elektromagnetische energie uit.

Een coaxkabel werkt op een vergelijkbare wijze. Ook deze geleidt de golf door het diëlectricum – de isolatie tussen de kern (de binnenste koperen kern) en de mantel (het koperen, daaromheen gevlochten omhulsel) – van het ene eind naar het andere. De energie loopt dus niet door de koperen geleider, zoals algemeen wordt aangenomen. Bij busantennes kun je de blikken wand vergelijken met de buitenste mantel van een coaxkabel, er is geen geleider aan de binnenkant.

Daarom kan een blikantenne niet alle frequenties van gelijkstroom tot ver in het gigahertzgebied overdragen, zoals een coaxkabel, maar werkt hij pas boven een zogenaamde cutoff-frequentie, die afhankelijk is van de interne diameter van de koker.

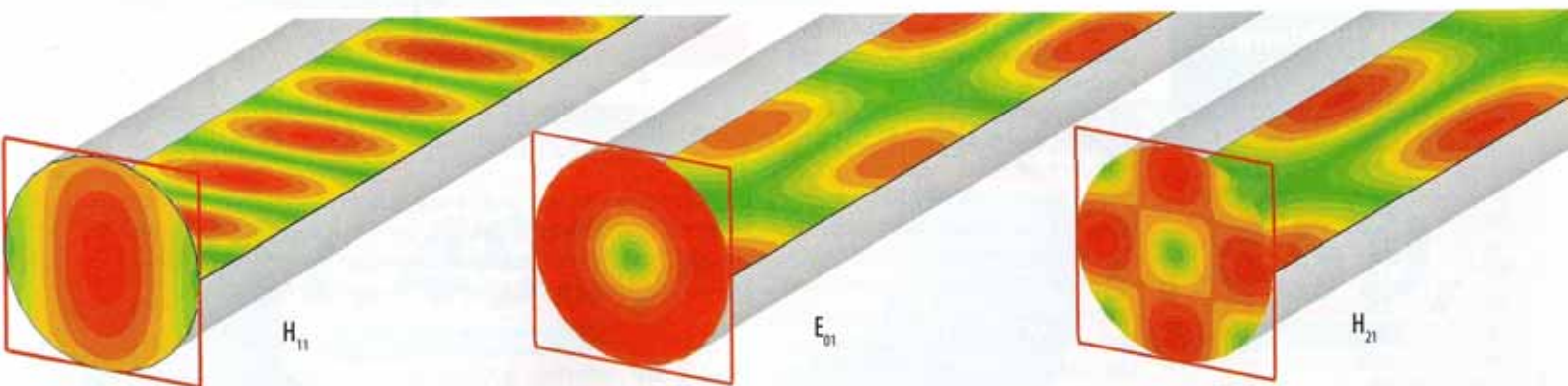
Ook de veldverdeling is bij holle geleiders anders dan bij coaxkabels. Een coaxkabel heeft alleen transversale – dus loodrecht op de voortplantingsrichting van de elektromagnetische golf staande – veldcomponenten. Bij holle geleiders komen daar nog eens longitudinale veldcomponenten in de voortplantingsrichting van de golf bij. Deze veldverdeling noemen elektrotechnici ook wel een hybride mode of H-mode.

Trillingstoestanden

Zo'n modus is precies te definiëren als een eenduidige oplossing van de Maxwellvergelijkingen

[1] binnenin de holle geleider. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de 'E-modes', die een longitudinale elektrische en een transversale magnetische veldcomponent hebben, en 'H-modes', waarbij de longitudinale component magnetisch en de transversale component elektrisch is. Voor ronde holle geleiders gebruikt men voor het oplossen van de Maxwellvergelijking de Besselfunctie van de eerste orde voor de E-modes en diens afgeleide voor de H-modes. De bijbehorende nuloplossingen van de functies worden gebruikt voor het indexeren van de modes in een ronde holle geleider. De interessante modes voor de blikantenne zijn H_{11} , E_{01} , en H_{21} . Elke mode heeft een eigen cutoff-frequentie, die afhankelijk is van de doorsnede van de ronde holle geleider.

Voor een theoretische benadering van de hybride mode die zich in de antenne voordoet, zul-



len we deze volgens het Lego-model samenstellen uit de afzonderlijke modes. Het voordeel daarvan is dat we het optreden van een mode kunnen berekenen afhankelijk van de doorsnede van het blik en de frequentie van de elektromagnetische golf. Als je weet welke modes zich voortplanten en met welke sterkte ze dat doen, dan weet je de hele veldverdeling binnen het blik en kun je daar conclusies uit trekken voor wat betreft de antenne-eigenschappen. Als we dus willen beoordelen hoe goed een metalen buis als WLAN-antenne kan fungeren, moeten we berekenen welke modes zich in de metalen buis in de gewenste frequentieband (2,4 tot 2,5 GHz bij 802.11b/g) kunnen voortplanten en wat de effecten daarvan zijn op de straling aan het einde van de buis.

De mode met de laagste cutoff-frequentie die zich nog kan voortplanten binnen een ronde holle geleider blijkt de basismode H_{11} te zijn. De elektrische veldlijnen lopen dan grotendeels verticaal in de dwarsdoorsnede van de metalen buis, met een concentratie in het midden en een lichte kromming aan de zijkanten. Het veldbeeld van de H_{11} lijkt al veel op die van een lineair gepolariseerde standaard WLAN-staafantenne, wat een efficiënte energieoverdracht mogelijk maakt. Bedraagt de werkfrequentie minder dan de cutoff-frequentie van de eerstvolgende hogere mode, dan kan alleen deze basismode zich binnen de buis voortplanten en is een single-mode opwekking mogelijk, aangezien de elektromagnetische veldenergie dan alleen via de H_{11} -mode door de metalen buis geleid kan worden. Dit is de gewenste, optimale manier waarop een blikantenne moet werken.

De mode met de eerstvolgende cutoff-frequentie is E_{01} .

Als de werkfrequentie hoger is dan die cutoff-frequentie, dan daalt het energieaandeel van de basismode H_{11} , omdat de veldenergie over beide modes wordt verdeeld. De magnetische veldvectoren van E_{01} draaien echter om de lengteas van de buis en zijn niet echt geschikt voor een draadloze verbinding naar een staafantenne. Omdat in het middelpunt van de dwarsdoorsnede van de buis bovendien geen elektrische veldvectoren voorkomen, transporteert de E_{01} -mode de veldenergie naar de rand van de buis. Het voorkomen van deze mode beperkt op die manier het bundelen van de antenne en verlaagt de sterkte in de belangrijkste zendrichting. Een blikantenne die boven deze tweede cutoff-frequentie werkt doet het dan beter, maar dan wordt de veldenergie wel over een breder ruimtelijk bereik verdeeld waardoor die antenne een wat slechtere richtkarakteristiek heeft.

Als de werkfrequentie nog hoger uitkomt dan de cutoff-frequentie van de derde mode H_{21} , ontstaat een effect dat bijzonder destructief is voor de richtkarakteristiek van de antenne. Aan de ene kant loopt het energieaandeel in de H_{11} -mode nog verder terug. En aan de andere kant is het elektrische veldbeeld van de H_{21} -mode relatief complex en heeft het een nulpunt in het middelpunt van de dwarsdoorsnede en vier nulpunten aan de buitenkant. Daardoor wordt de richtkarakteristiek in vieren gedeeld, wat een bundeling in de belangrijkste zendrichting teniet doet.

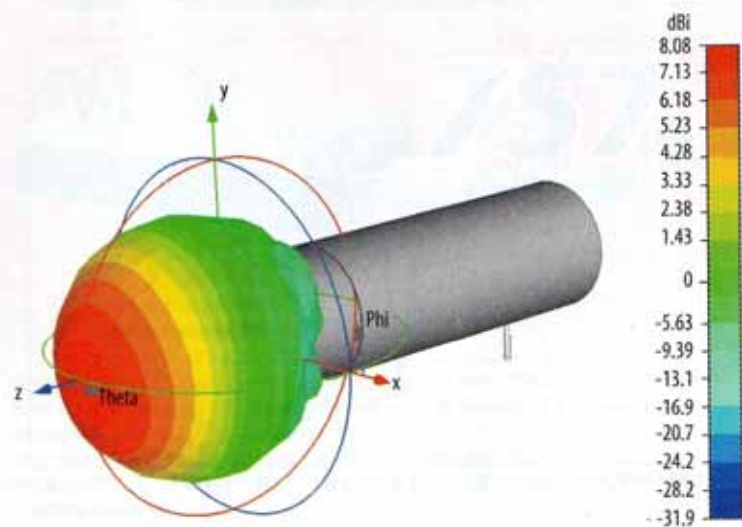
De cutoff-frequentie van de beschreven modes is afhankelijk van de buisdiameter D en de lichtsnelheid c en volgt uit de formules:

$$\begin{aligned} \text{voor } H_{11}: f_c &= c / (1,71 \cdot D) \\ \text{voor } E_{01}: f_c &= c / (1,31 \cdot D) \\ \text{voor } H_{21}: f_c &= c / (1,03 \cdot D) \end{aligned}$$

Eenvoudig omschrijven naar D levert op hoe groot de doorsnede moet zijn voor een ideale 2,4GHz-WLAN-blikantenne. De cutoff-frequentie van de H_{11} -mode bepaalt dat de kleinst mogelijke doorsnede bij deze frequentie 73 mm is. Dunnere buizen zijn totaal ongeschikt. Maar omdat de veld-eigenschappen binnen de metalen buis voor frequenties in de buurt van de cutoff-frequenties in één klap veranderen en dat voor reële antenneconstructies moeilijk te voorspellen is, moet je er voor alle zekerheid voor zorgen dat je voldoende afstand houdt tot de cutoff-frequentie. Uit onze simulatie met het programma CST Microwave Studio bleek dat voor een WLAN-blik diameters vanaf 84,0 mm beter geschikt zijn. CST benadert de oplossingen van de Maxwellvergelijkingen in een raster van kleine blokken, dat over het geometrische model van de antenne wordt gelegd.

Vanaf een doorsnede van 92,3 mm moet je er rekening mee houden dat de E_{01} -mode zich zal doen gelden. Daardoor ver-

mindert de sterkte in de belangrijkste zendrichting en wordt de richtkarakteristiek breder. De H_{21} -mode kan vanaf een diameter van 117,4 mm ontstaan. De antenne straalt dan nog slechts een klein deel van de zendenergie in de belangrijkste zendrichting uit. Ook hier doe je er verstandig aan om een veiligheidsmarge tot deze doorsnede in acht te nemen. 111,5 mm is een goede bovengrens voor de doorsnede, wat ook door de simulatie werd bevestigd. De optimale doorsnede voor een frequentie van 2,4 GHz ligt daarom tussen de 84,0 en 92,3 mm. Diameters tot 111,5 mm zijn echter aanvaardbaar.



De richtkarakteristiek van de blikantenne in 3D-weergave toont een rotatiesymmetrische kegel met een gain van 8 dBi in de belangrijkste zendrichting en een sterke demping naar achteren.

Optimale buislengte bij 2,4 GHz

Diameter	Optimale lengte	Periode
84	149,3	n-119,4
86	140,6	n-112,5
88	133,8	n-107,0
90	128,2	n-102,6
92	123,6	n-98,9
94	119,7	n-95,7
96	116,3	n-93,0
98	113,4	n-90,7
100	110,9	n-88,7
102	108,6	n-86,9
104	106,0	n-85,3
106	104,8	n-83,9
108	103,2	n-82,6
110	101,8	n-81,4

Alle waarden in mm

Afstand

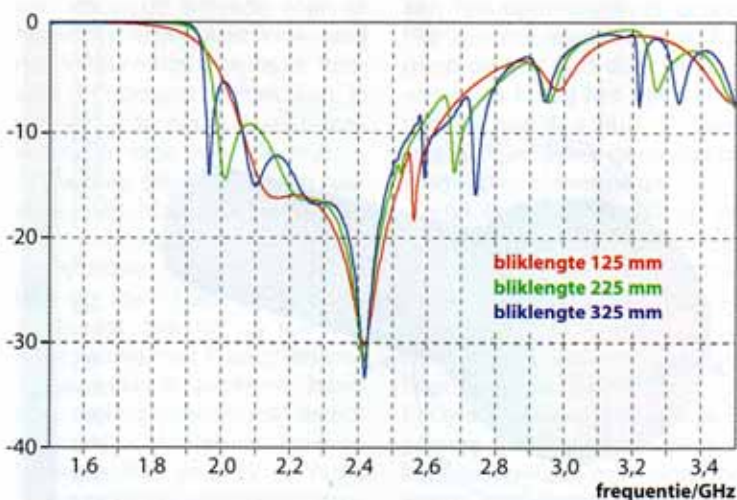
Als je een geschikte buis op de kop hebt getikt, is het natuurlijk nog maar de vraag hoe je de golf in de metalen buis hoe je de golf in de metalen buis krijgt. Bij de hier gebruikte antenneconstructie is een N-connector op een bepaalde afstand van de achterwand van de metalen buis aangebracht. Een stift van koperdraad aan de binnengeleider van de connector geeft de energie in de H_{11} -mode door aan de metalen buis. Deze connector is de eerste stoorzender in de antenne. Het vermogensdeel dat hier wordt gereflecteerd en via de coaxkabel weer richting zender wordt gestuurd, zal niet bijdragen aan het totale zendvermogen. Het is dus belangrijk dat je op deze plek voor een zo goed mogelijke energieoverdracht zorgt.

Als stift is een draad met een doorsnede van 1 mm goed ge-

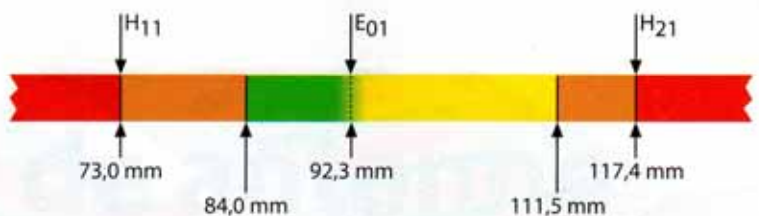
noeg. Dit zorgt in het WLAN-frequentiebereik voor voldoende resonantie, waarbij minder dan tien procent van de zendenergie gereflecteerd wordt ($S_{11} < -10$ dB). Het uiteinde van de draad moet 30 mm in het blik uitsteken, wat ongeveer overeenkomt met een kwart van de golflengte van de gemiddelde werkfrequentie (2,437 GHz op kanaal 6). Een conische stift, die naar boven toe dikker wordt, is net iets beter, maar een stuk moeilijker te vervaardigen.

Ook de afstand van de stift tot de achterwand hangt af van de golflengte. De golf gaat vanaf de stift zowel in de richting van de opening als in de richting van de achterwand. De achterkant reflecteert de elektromagnetische golf in de richting van de opening, wat leidt tot een interferentie van de heen- en teruggaande golf. Om ervoor te zorgen dat de directe en de gereflecteerde golf elkaar versterken en niet verzwakken, moet de afstand tot de achterwand overeenkomen met een kwart van de golflengte van de H_{11} -mode bij de werkfrequentie. De golflengte van de basismode in de buis is bij een bepaalde frequentie echter groter dan in de lucht en afhankelijk van de interne doorsnede. De interne golflengte is voor elke mode anders en kan berekend worden uit de cutoff-frequentie f_c van de op te wekken mode, de werkfrequentie f (ook kanaal 6) en de lichtsnelheid c :

$$\lambda_c = \frac{c}{\sqrt{f_c^2 - f^2}}$$



De strooiparameter S_{11} laat vooral zien welk energieaandeel (in dB) de antenne afhankelijk van de frequentie weer naar de zender terugstuurt en dus niet kan uitstralen. De lengte van het blik is hierbij een belangrijke factor.



De diameter van het blik is essentieel voor een goede antenne. Groen is het optimale gebied, geel het acceptabele deel waarbij nog lichte verliezen optreden. In het oranje deel is de karakteristiek van de antenne nauwelijks te voorspellen.

Omdat de interne golflengte verschilt per mode, is ook de optimale positie van de stift voor elke mode anders. Vandaar dat zich destructieve interferentie en problemen met de golfvoortplanting voordoen als niet alleen de basismode wordt opgewekt. Dat is naast de richtkarakteristiek een andere reden dat een 'single-mode' metalen buis een betere antenne is. Je kunt de juiste afstand tot de achterkant bij de verschillende diameters aflezen in de tabel 'Optimale buislengte'.

Lengte

Een andere bron voor storingen is de opening van het blik. Daar wordt de energie van de H_{11} -mode in een ongeleide mode de lucht in gestuurd. Door het blik een geschikte lengte te geven, kun je ervoor zorgen dat zich daar geen ongewenste reflecties voordoen die energie weer door de stift en de coaxkabel naar je WLAN-router teruggeleiden. Een veldsimulatie toonde aan dat een totale lengte van het blik van circa 5/8 van de golflengte van de basismode optimaal is. Voor andere lengtes in de simulatie verslechterde de resonantie, met name tegen de bovenste bandgrens bij 2,48 GHz, zoals ook blijkt uit de grafiek. Uit onze resultaten blijkt duidelijk dat de stelling dat de lengte van een blikantenne geen rol speelt zolang die maar niet te kort is, absoluut niet klopt.

Een precieze tolerantie is voor de lengte niet te geven omdat de resonantie zowel aan de bovenste als de onderste grens van de bruikbare doorsnede drastisch verslechtert. Bij de optimale (groene) doorsneden kun je echter met een gerust hart rekenen op een tolerantie van een achttste van de interne golflengte, dus ongeveer 20 mm. Het optimum herhaald zich periodiek met de halve interne golflengte. In de tabel kun je zien wat de optimale lengte voor een blikantenne is bij een bepaalde diameter.

De door ons gebruikte toiletborstelhouder is uitstekend geschikt als antenne voor de 2,4GHz-band. De diameter ligt met 91,6 mm in het optimale bereik. De interne golflengte van de H_{11} -mode voor kanaal 6 bedraagt circa 200 mm. De stift moet daarom op een afstand van 50 mm voor de achterkant staan. De optimale totale lengtes van de metalen buis liggen op 125 mm, 225 mm, 325 mm enzovoort. De lengte van 240 millimeter ligt dicht genoeg bij een maximum, zodat de buis niet ingekort hoeft te worden voor een goede overgang naar de lucht.

Een computersimulatie met deze waarden leverde een ingangsimpedantie van de antenne op van bijna 50 ohm. Hiermee is de blikantenne heel goed op de coaxkabel en de router afgestemd. In de belangrijkste zendrichting heeft de antenne een gain van 8 dBi bij een 3dB-openingshoek van 74 graden. Afgaande op deze waarden is onze blikantenne van een toiletborstelhouder een simpel alternatief voor de dure, commerciële richtantennes voor WLAN.

Met 8 dBi heb je overigens al bijna de maximaal haalbare versterking van dit antenneontwerp te pakken. Je zou nog wat kunnen verbeteren aan de stift-pin en de overgang tussen de opening van het blik en de lucht - bijvoorbeeld met een conische stift - maar dat zou voornamelijk de bandbreedte verder verhogen, en die is toch al meer dan groot genoeg. Ook voor wat betreft de efficiëntie en richtkarakteristiek zijn waarschijnlijk geen noemenswaardige verbeteringen meer te verwachten.

Literatuur

- [1] Maxwellvergelijkingen: http://nl.wikipedia.org/wiki/Wetten_van_Maxwell
- [2] Constantine Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition, ISBN: 978-0-471-66782-7
- [3] Golvenvangers, zo werken antennes, c't 7-8/2003 p.140 **ct**