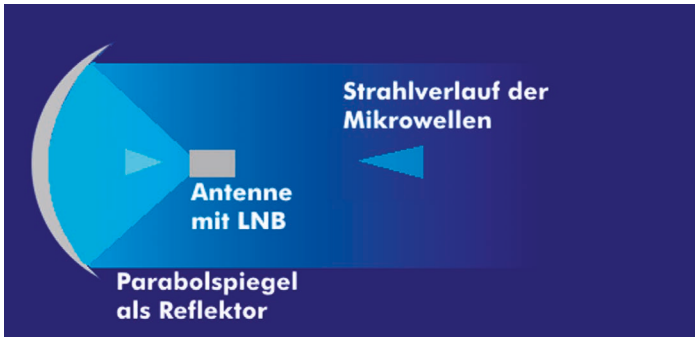
Mikrowellenantennen und ihre Besonderheiten

In ihren Anfängen nutzte die Mikrowellentechnik zur Energieübertragung Hohlleiter, da besonders dämpfungsarme HF-Leitungen noch nicht zur Verfügung standen. Auch heute arbeiten Mikrowellenantennen teilweise mit Hohlleiter-Speisung. Weitere Besonderheiten der Mikrowellenantennen erläutert dieser Beitrag.



© www.itwissen.de

Zunächst werden einige Grundlagen aufgefrischt, welche für Mikrowellenantennen besonders von Bedeutung sind. Dies erleichtert das Verständnis der verschiedenen Antennenformen.

Gewinn und Öffnungswinkel

Die geringe Länge der Mikrowellen von z.B. 3 cm (10 GHz) erlaubt den Aufbau von Antennen mit sehr hohem Gewinn. Denn je größer die Abmessungen einer Antenne im Vergleich zur Betriebswellenlänge sind, umso höher fällt allgemein der Gewinn aus. Der Gewinn ist der in Dezibel ausgedrückte Richtfaktor, vermindert um die Antennenverluste bzw. multipliziert mit dem Antennenwirkungsrad als Faktor. Der Richtfaktor beschreibt die Richtwirkung im Vergleich zu einer Bezugsantenne (Kugelstrahler oder Halbwellendipol). Doch wie erhält man den Richtfaktor? Eine vereinfachte, dafür aber kurze und bündige Herleitung des Richtfaktors erfolgt mithilfe der Öffnungswinkel. Als Öffnungswinkel bezeichnet man den Winkel zwischen den beiden Richtungen, bei denen die abgestrahlte Leistung um 3 dB gegenüber dem Maximum gesunken ist. Man hat die 3 dB genommen, weil sie einer Leistungshalbierung entsprechen und daher sehr markant sind. Statt Öffnungswinkel sagt man daher auch Halbwertsbreite.

Es sollte verständlich sein, dass Richtfaktor bzw. Gewinn und Öffnungswinkel eng zusammenhängen. Je besser die Bündelung, umso spitzer der Winkel. In der Regel kennt man den Gewinn, nicht aber den Richtfaktor. Bei gut konstruierten Parabolantennen kann man einen Wirkungsgrad um 65% ansetzen (Bild 1, Begriffserklärung Spillover- und Ausleucht-Effizienz folgt), sodass die Umrechnung näherungsweise gelingt.

Die Halbwertsbreite einer Parabolantenne erhält man näherungsweise, indem man 21° durch die Frequenz in GHz und den Durchmesser in m teilt:

Öffnungswinkel = 21°/(f in GHz x Durchmesser in m)

Für 12 GHz und 0,85 m ergeben sich rund 2°.

Warum ist nun der Öffnungswinkel von Bedeutung? Dazu genügt z.B. ein Blick in den bereits bemühten Sat-Empfangsbereich. Betrachten wir zwei Offset-Parabolantennen:

- 60 cm Durchmesser, Gewinn 36 dBi: Halbwertsbreite 3°
- 1,2 m Durchmesser, Gewinn 42 dB, Halbwertsbreite 1,5°

Die kleine Antenne kann durch Umwelteinflüsse (Wind, Erschütterung) in doppelt so hohem Maße von der Richtung abgebracht werden wie die große, ohne dass das Signal um mehr als die Hälfte in der Leistung abfällt. Je höher der Gewinn, umso höher sind die Anforderungen an die mechanische Stabilität der Antennenanlage, um diese auch optimal nutzen zu können.

Die Wirkfläche

Die absolute Leistung, welche eine Empfangsantenne einem elektromagnetischen Feld entnehmen kann, wird von der hypothetischen Wirkfläche und dem Wirkungsgrad der Antenne bestimmt. Man stellt sich unter der Wirkfläche eine senkrecht zur Einfallsrichtung der Funkwellen liegende Fläche vor, welche die gleiche Leistung umfasst, die dem Feld von der Antenne bei Leistungsanpassung und Verlustfreiheit entzogen werden

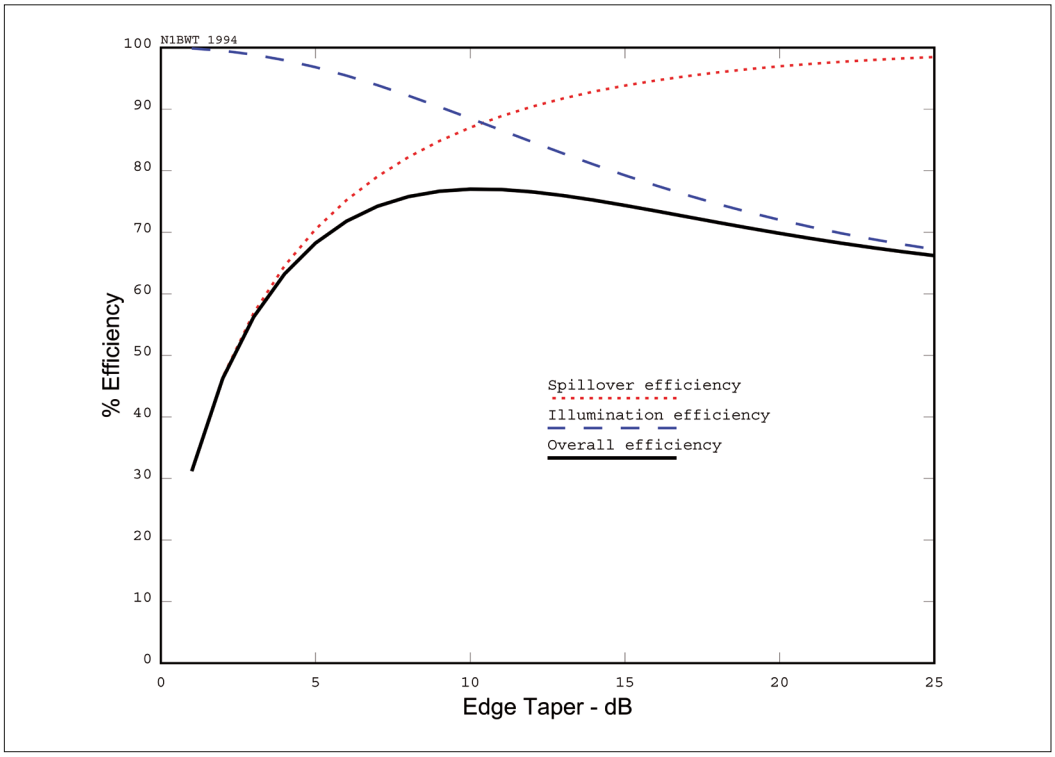


Bild 1: Spillover- und Ausleucht-Effizienz und Gesamteffizienz einer Parabolantenne nach [1]

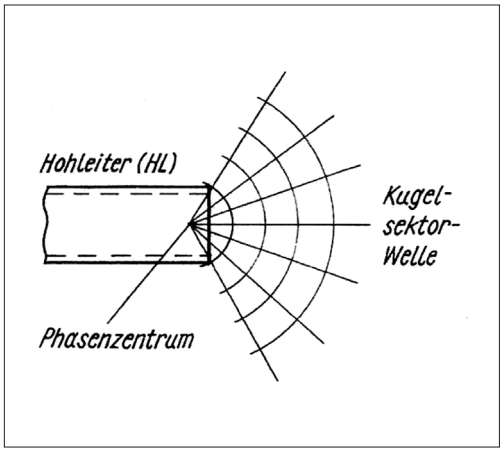


Bild 2: Ein offener Hohlleiter strahlt eingespeiste Leistung ab [2]

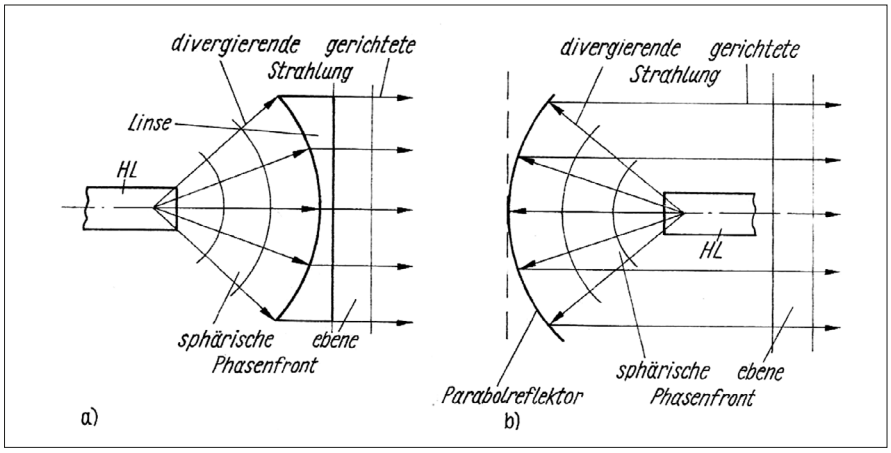


Bild 3: Umwandlung von sphärischer in ebene Phasenfront mit Linse (a) oder Spiegel (b), HL = Hohlleiter [2]

würde. Darum spricht man auch von Absorptionsfläche. Bei den Mikrowellenantennen benutzt man oft den Ausdruck Apertur („strahlende Fläche"). Diese Fläche ist das Produkt aus quadrierter Wellenlänge mal Richtfaktor, geteilt durch 12,6 (4 π):

Wirkfläche = λ^2 x Richtfaktor/12,6

Während man bei Kurzwellen- und UKW-Antennen Schwierigkeiten hat, sich diese Fläche vorzustellen, so entspricht die bei Parabolantennen in etwa der (ebenen) mechanischen Fläche. Auch bei anderen Mikrowellen-Antennenformen lässt sie sich leicht erkennen.

Die absolute Empfangsleistung ergibt sich neben der Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte - der Begriff wird in der Mikrowellentechnik bevorzugt - lediglich aus Wirkfläche und Wirkungsgrad. Daher kann der Praktiker eine „reale Wirkfläche" berechnen, indem er statt des Richtfaktors den Gewinn als Faktor einsetzt:

reale Wirkfläche = λ^2 x Gewinn als Faktor/12,6

Leistungsflussdichte und Empfänger-Eingangsleistung

Die flächenbezogene Leistung bezeichnet man als Leistungsflussdichte (bzw. Power Flux Density, PFD). Die Grundeinheit ist W/m². In der Mikrowellentechnik treten Empfangspegel in den Bereichen fW/m² oder pW/m² auf. Ein Femtowatt (fW) sind 10^{-15} Watt, ein Picowatt (pW) 10^{-12} Watt. Mit solch kleinen Werten können die Mikrowellen-Empfangsanlagen durchaus etwas anfangen. Multipliziert man die reale Wirkfläche mit der Leistungsflussdichte, ergibt sich die elektrische Eingangsleistung des Empfangssystems (LNB, Low Noise Block):

P_{in} = reale Wirkfläche x Leistungsflussdichte

Welche elektrische Empfangsleistung entsteht beispielsweise mit 5 pW/m² und einer 60-cm-Sat-Schüssel? Das lässt sich mithilfe von Wirkfläche und Antennenwirkungsgrad ausrechnen. Die Wirkfläche lässt sich leicht abschätzen, sie ist bekanntlich in etwa so groß wie die Spiegelfläche. Ein Kreis mit diesem Durchmesser besitzt eine Fläche von rund 0,28 m². Der Gewinn einer solchen Antenne liegt bei 36 dBi. Das bedeutet rund Faktor 4000 ($10^{36/10}$). Die Wellenlänge der Sat-Frequenz 12 GHz beträgt 25 mm (Lichtgeschwindigkeit/Frequenz). Die reale Wirkfläche ist also

0,025 m x 0,025 mm x 4000 /12,6 = rund 0,2 m²

groß. Der Unterschied zu 0,28 m² wird durch den Wirkungsgrad verursacht.

Multipliziert man die reale Wirkfläche mit der Leistungsflussdichte, so erhält man die LNB-Eingangsleistung:

P_{in} = 5 pW/m² x 0,2 m² = 1 pW

Hohlleiter in der Mikrowellen-Antennentechnik

Elektrisch (d.h. im Vergleich zur Betriebswellenlänge) große (kleine) Antennen haben also einen hohen (geringen) Gewinn. Das trifft auch auf den am Ende offenen Hohlleiter als Antenne zu. Wie in Bild 2 dargestellt, strahlt so einer Einfachst-Antenne von einem sogenannten Phasenzentrum aus eine sogenannte Kugelselektorwelle (kurz: Kugelwelle) ab. Deren Feldstärke nimmt mit der Entfernung linear und deren Leistungsflussdichte nimmt mit der Entfernung folglich quadratisch ab. Eine Erhöhung der Richtwirkung erreicht man gewissermaßen durch das Zusammenführen der entsprechenden auseinanderlaufenden Strahlen mit sphärischer Phasenfront in parallele Strahlenbündel mit ebener Phasenfront. Man kann sich dabei durchaus auf die Optik mit ihren Linsen und Reflektoren (Spiegel) besinnen, denn diese Elemente sind analog auch in der Mikrowellentechnik anwendbar. Dies will Bild 3 illustrieren.

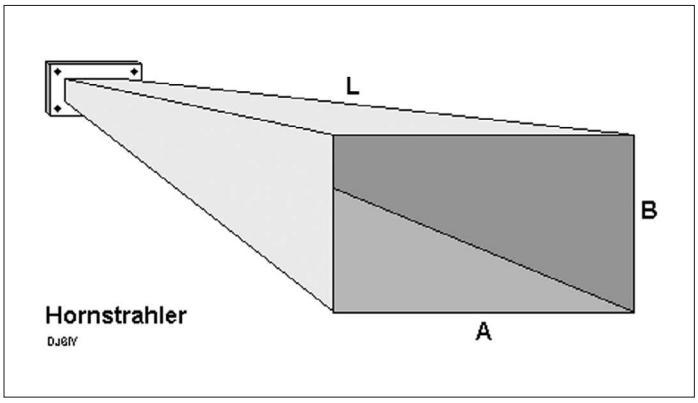


Bild 4: Abmessungen und Gewinn einer Hornantenne für 10 GHz (3 cm): A 136 mm, B 101 mm, L 155 mm = 20 dBi, A 192 mm, B 142 mm, L 320 mm = 23 dBi [1]

Mikrowellen

ist ein Trivialname für den Frequenzbereich elektromagnetischer Wellen von 1 bis 300 GHz (Wellenlänge von 300 mm bis 1 mm). Manche Quellen geben auch den Bereich von 300 MHz bis 300 GHz an. Etwa Bluetooth-Geräte kommunizieren im Frequenzband von 2402 bis 2480 MHz. Dies ist auch ein ISM-Band (Industrial, Scientific, Medical).

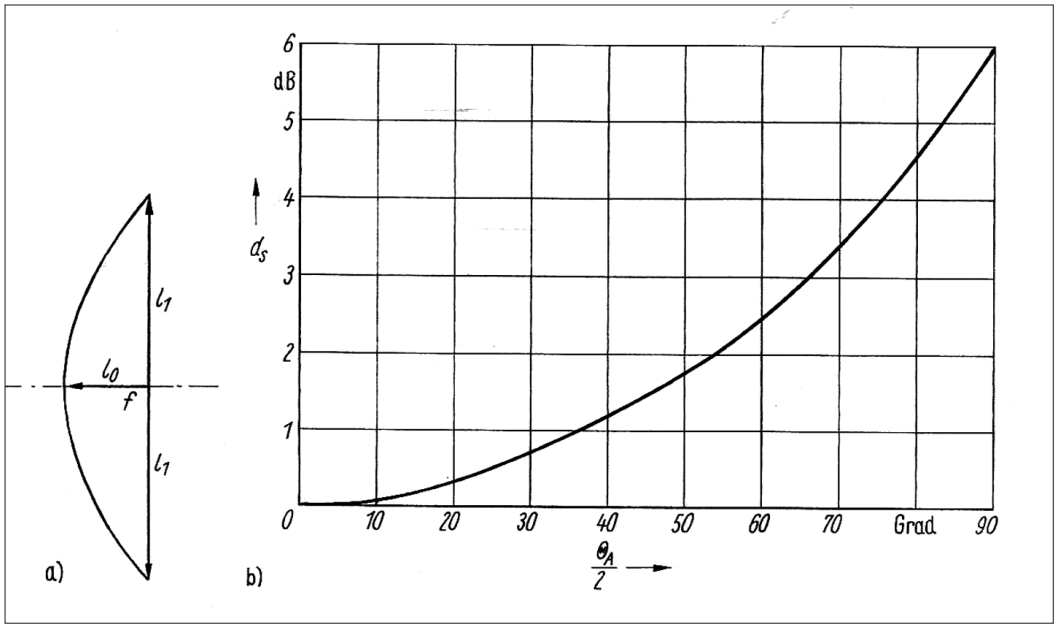


Bild 5: Zur Nahfelddämpfung bei Parabolantennen, a) Geometrie (Weglängenunterschiede), b) Dämpfung gegenüber Strahlung auf Zentrum [2]

Die Patch- oder Mikrostrip-Antenne

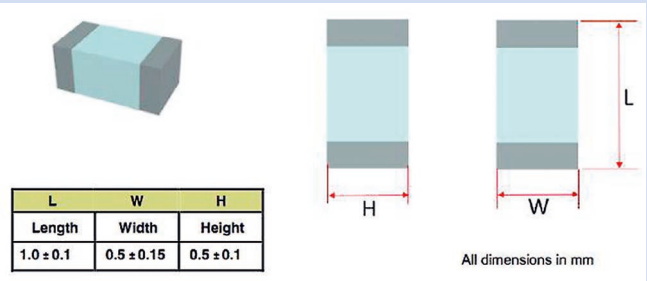
hat eine flächenförmige Geometrie. Im einfachsten Fall wirkt die Metallfläche als Resonator, ähnlich wie bei einer Dipolantenne. Eine Patch-Antenne entsteht durch das Anbringen eines Metallblechs auf einem isolierenden dielektrischen Substrat, wie einer Leiterplatte, mit einer durchgehenden Metallschicht auf der entgegengesetzten Seite des Substrats, die mit Masse verbunden ist. Daher sind Patch-Antennen einfach zu entwerfen und kostengünstig herzustellen. Häufig findet man quadratische oder rechteckige Formen.

Bekannt sind etwa Linsenantennen in Form von recht aufwendigen Metallstrukturen; daher werden sie selten verwendet. Die einfachste Reflektorantenne ist immer noch die Parabolantenne. Wenn es um das Senden geht, ist dabei der am Ende offene Hohlleiter der einfachste sogenannte Erreger (Primärstrahler). Er wird so im Zentrum des Parabolspiegels angeordnet, dass sich sein Phasenzentrum mit dessen elektrischem Zentrum deckt.

Im Prinzip kann man den Querschnitt eines Hohlleiters auch stetig aufweiten, um am Ende eine größere strahlende Fläche zu erhalten. Das führt zum sogenannten Hornstrahler. Genauer gesagt, zu einem Sektor- oder Pyramidenhorn bei rechteckförmigem (Bild 3) oder quadratischem Hohlleiter oder zu einem Kegelhorn bei einem runden Hohlleiter. Auch diese Antennenformen haben nur geringe Bedeutung.

Die kleinste 2,4-GHz-Keramikantenne

stammt von dem englischen Hersteller Antenova, heißt Weii, wurde für portable Consumer-, IoT- und M2M-Applikationen entwickelte und misst 1 x 0,5 x 0,5 mm. Damit ist es gelungen, hohe Entkopplung und Frequenzselektivität sowie relativ hohe mögliche Leistung zu vereinen. Keramikantennen haben geringe dielektrische Verluste und eine hohe Entkopplung aus. Der Wirkungsgrad liegt bei 70%. Die Keramikantenne ist resistent gegenüber umgebungsbedingten Verstimmungen.



L	W	H
Length	Width	Height
1.0 ± 0.1	0.5 ± 0.15	0.5 ± 0.1

Für Linsen- und pyramidenförmige Hornantennen sind die Öffnungswinkel für E- und H-Feld verschieden. Es gelten folgende Näherungen:

Öffnungswinkel E-Feld = 56°/ elektrische Apertur

Öffnungswinkel H-Feld = 67°/ elektrische Apertur

Die elektrische Apertur ist das Verhältnis von Apertur zu quadrierter Wellenlänge bzw. die in Wellenlängen ausgedrückte Apertur. Bild 4 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen Hornabmessungen und Gewinn.

Je höher die Frequenz, umso mehr wird man auf den Hohlleiter setzen. Mit der Anwendung ist zwar der Frequenzbereich vorgegeben (beispielsweise stehen für ISM zwölf Bereiche zwischen 6,765 MHz und 246 GHz zur Verfügung), aber oft bestimmen noch andere Faktoren, wie Sendeleitung oder Entfernung, die Möglichkeiten der Antennenausführung. Ein markantes Beispiel für den Trend zu höheren Frequenzen innerhalb einer bestimmten Anwendung ist WiFi (klassisch 2,4 GHz, zukünftig mehr und mehr 5,6 GHz). Grundsätzlich gilt: Je höher die Frequenz, umso kleiner lässt sich die Antenne ausführen.

Ausleuchtung und Nahfelddämpfung

Der Gewinn einer Parabolantenne wird auch von der Flächenbelegung des Spiegels bestimmt. Damit meint man die Stromverteilung auf dem Reflektor. Die Flächenbelegung bzw. Stromverteilung wird wiederum von der sogenannten Ausleuchtung (Illumination, vgl. Bild 1) bestimmt. Für diese ist das Erreger-Strahlungsdiagramm verantwortlich. Dabei seht fest, dass bei gegebener Fläche ein maximaler Gewinn bei konstanter Strombelegung über die Apertur entsteht. Dem entspricht eine 100%-tige Flächenausnutzung, die man praktisch nicht erreicht, schon durch elektrische Verluste. Dieser optimale Zustand ist durch die gleich verteilte Abstrahlung der Energie des Erregers im Ausleuchtwinkelbereich des Parabolspiegels gekennzeichnet. Das hierfür erforderliche Erregerdiagramm ist nur rein theoretisch darstellbar, praktisch jedoch nicht erreichbar. Daher strebt man nach einem Optimum. Es führt zu einem Flächenwirkungsgrad von etwa 65% als Maximum. Der Erreger sollte so dimensioniert werden, dass der 10-dB-Öffnungsinkel mit dem Spiegelrand zusammenfällt.

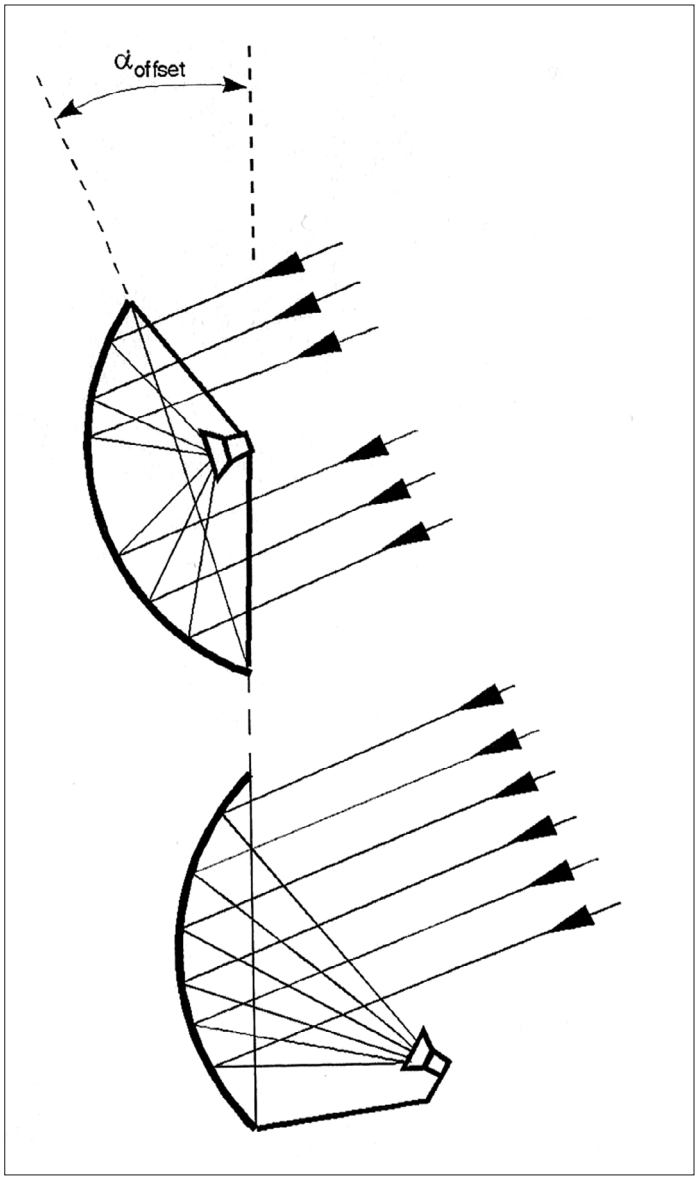


Bild 6: Einfache Parabolantenne und Offset-Parabolantenne [3]

Strahlung in einem gewissen Winkel gegenüber der Verbindung Erreger - Zentrum des Parabolspiegels wird stärker gedämpft als Strahlung, die auf kürzestem Wege vom Erreger zum Spiegel gelangt (also zu dessen Zentrum, Winkel null). Man spricht von Nahfelddämpfung (zwischen Erreger und Reflektoroberfläche). Diese ist insbesondere Bei Parabolantennen mit geringem Frequenz/Durchmesser-Verhältnis (= „Brennweite") und großem Ausleuchtwinkel zu beachten. Der Flächenwirkungsgrad liegt hier unter 65%. Bild 5 zeigt sehr schön, wie die Nahfelddämpfung mit größer werdendem (halben) Ausleuchtwinkel zunimmt.

Parabolantennen-Varianten

Die klassische, pure Parabolantenne ist eine Zentralantenne (Prime Focus Antenne, PFA). Sie hat die Form eines Paraboloids, ist kreisrund, vollkommen symmetrisch aufgebaut, und der Brennpunkt der Reflektor-Schüssel ist zentral.

Aus technischen Gründen wird z.B. in der Sat-Empfangstechnik die Offset-Parabolantenne benutzt (Bild 6). Man sieht: Eine Offsetantenne unterscheidet sich von einer einfachen Parabolantenne durch die aus dem Bereich der einfallenden Strahlung ausgelagerte Empfangseinheit. Bei gleicher Montage empfängt daher die Offsetantenne um den sogenannten Offsetwinkel abweichend gegenüber der Parabolantenne. Da natürlich der Winkel des einfallenden Signals feststeht, muss die Offsetantenne mit einer gegenüber der Parabolantenne korrigierten Elevation aufgebaut werden. Sie steht in der Praxis wesentlich senkrechter. Der Offsetwinkel wird in den Datenunterlagen angegeben.

Eine weitere Variante der Offsetantenne ist die Cassegrain-Antenne. Hier lassen sich Sende- oder Empfangseinheit direkt am Scheitel hinter dem Parabolreflektor anordnen. Man unterscheidet zwischen der klassischen und der sogenannten Nahfeld-Cassegrain-Antenne (Bild 7). Beide Varianten erfordern einen relativ hohen Herstellungsaufwand. Hinzu kommt, dass aufgrund der Erregerüberstrahlung (Spillover, vgl. Bild 1) des Hilfsreflektors im Richtdiagramm - durch die Erreger/Hilfsreflektor-Geometrie bedingt - deutlich größere Nebenzipfel als bei der klassischen Parabolantenne entstehen.

Die Nachteile der Erregerabschattung kann man auch hier durch eine Offset-Strategie umgehen. Dadurch werden Antennenaufbau und Richtdiagramm allerdings etwas unsymmetrisch. Die Herstellung wird weiter verkompliziert.

Zwei andere Vertreter der Offset-Speisung zeigt Bild 8. Es handelt sich erstens um eine Hornparabolantenne, auch Muschel-

Die Schlitzantenne

beruht auf einem ungewöhnlichen Prinzip: In der Regel werden Antennen so konstruiert, dass eine durchgehende metallische Struktur die Wellen abstrahlt. Beim Schlitzstrahler sorgt hingegen eine Unterbrechung einer metallischen Struktur für die Abstrahlung. Oft entspricht diese Unterbrechung dem Prinzip des Dipols, kann aber theoretisch jede andere Geometrie besitzen.

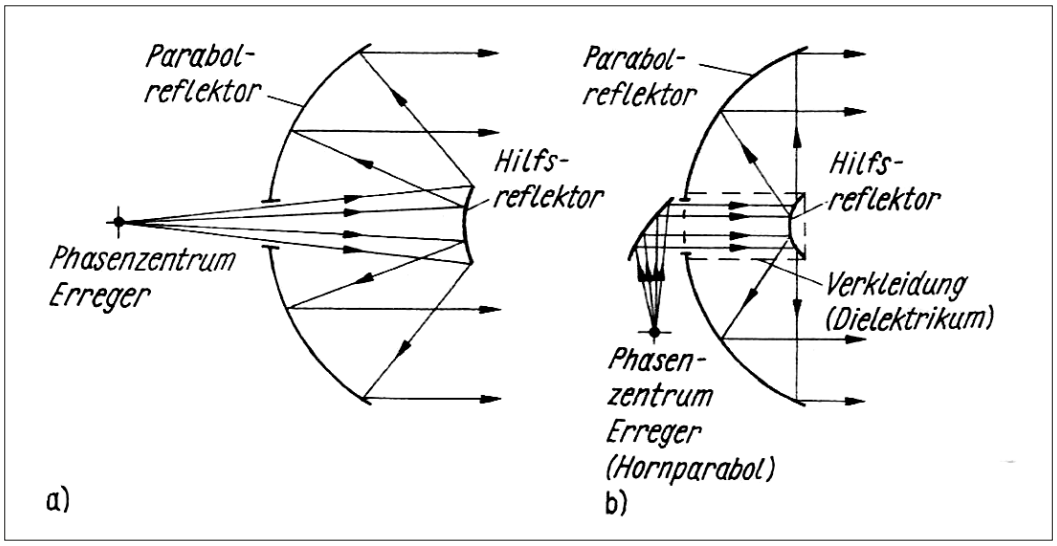


Bild 7: Prinzipaufbau von Cassegrain-Antennen, a) klassischer Typ, b) Nahfeldtyp [2]

antenne genannt. Diese ist ein Spezialfall der Offset-Prinzips. Zweitens wird das Prinzip einer Offset-Cassegrain-Antenne gezeigt. Diese Abwandlungen rechnen sich eigentlich nur als Sendeantenne.

Weitere Grundtypen

Anwendung und Einsatzort bestimmen wesentlich die Basistechnologie der verwendeten Antenne. Möglich und anzutreffen sind z.B. die Formen Dipol, Yagi, Wheel oder Turnstyle (Wendel). Heute trifft man bei den Mikrowellenantennen beispielsweise noch auf die folgenden Grundtypen:

- Leiterplattenantennen

lassen sich einfach und kostengünstig herstellen und eignen sich am besten für Frequenzen über einigen 100 MHz. Die Richtwirkung ist normalerweise gering. Beispiele sind die einfache Schleife und der Dipol.

- Schlitzantennen (Slot-Antennen)

erkennt man an ihren Schlitzen im Metallkörper. Bei Anregung entwickelt sich ein Feld, das vergleichbar ist mit dem einer Dipolantenne, allerdings sind E- und H-Anteile vertauscht. Es ist eine ausgeprägte Vorzugsrichtung möglich.

- Patch- oder Mikrostrip-Antennen

Antennen haben eine bessere Abstrahlcharakteristik als Leiterplattenantennen, sind diesbezüglich jedoch Schlitzantennen unterlegen. Eine solche Antenne ist schmalbandig und besitzt ein breites Abstrahlungsdiagramm.

Es gibt darüber hinaus weitere Arten von Antennen für Mikrowellen. Um die richtige Antenne für eine bestimmte Anwendung zu finden, benötigt man folgende Informationen:

- für Senden und/oder Empfang?
- Frequenz(bereich)
- verfügbarer Bauraum
- Objekte im Nahfeld der Antenne (Entfernung bis 2 x λ)
- Nennimpedanz
- gewünschte Abstrahlcharakteristik (möglichst in 3D)
- Polarisierung (horizontal, vertikal, zirkular)
- mechanische Einflüsse (Schock, Vibration)

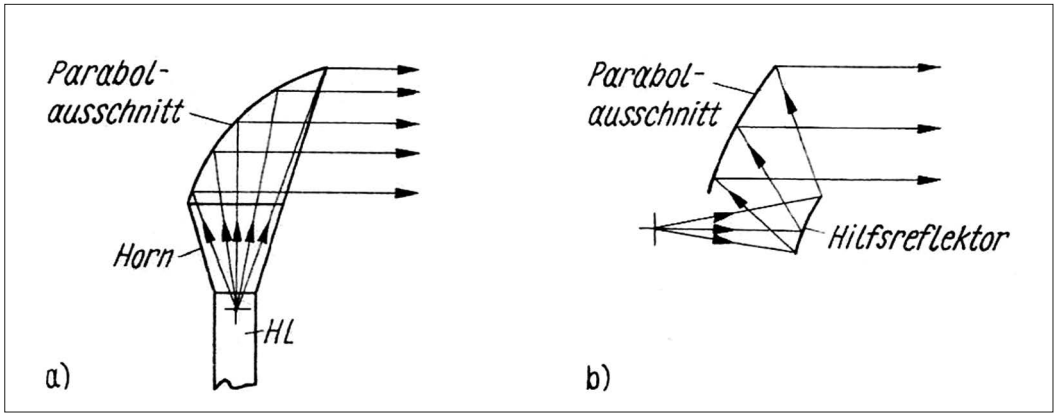


Bild 8: a) Hornparabolantenne und b) Offset-Cassegrain-Antenne [2]

Auf den Punkt gebracht

Die kleine Länge der Mikrowellen erlaubt den Aufbau von Antennen mit sehr hohem Gewinn. Jedoch nur bei der Parabolantenne ist dieser theoretisch beliebig steigerbar.

Die Halbwertsbreite einer Parabolantenne erhält man näherungsweise, indem man 21° durch die Frequenz in GHz und den Durchmesser in m teilt. Hohe Gewinne bzw. kleine Winkel fordern entsprechende mechanische Stabilität.

Sinnvoll ist die Definition einer realen Apertur als Produkt aus quadrierter Wellenlänge mal Gewinn, geteilt durch 12,6.

Sinnvoll ist die Verwendung der Leistungsflussdichte statt der Feldstärke(n). Diese ergibt sich, indem man immer rechtwinklig zueinander auftretende elektrische und magnetische Feldstärke vektoriell addiert.

Multipliziert man die reale Apertur mit der Leistungsflussdichte, ergibt sich die elektrische Eingangsleistung des Empfangssystems.

Ausleuchtung und Nahfelddämpfung begrenzen den Wirkungsgrad einer Parabolantenne.

Neben der Parabolantenne und ihrer Spielarten sind weitere heute wichtige Grundtypen die Leiterplattenantenne, die Schlitzantenne und die Patch-Antenne.

FS

Quellen

[1] Paul Wade: Parabolic Dish Antennas, Chapter 4 (Internet)

[2] Eberhard Spindler: Das große Antennen-Buch, Verlag Technik Berlin/Franzis-Verlag, 2. Auflage 1989

[3] Ulrich Freyer: Radio- und Fernsehempfang über Satellit und Kabel, Franzis-Verlag

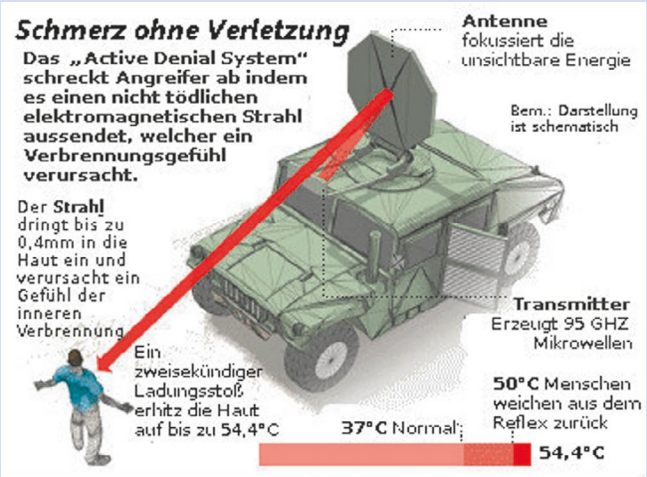
[4] Seppt Reithofer: Praxis der Mikrowellen-Antennen, UKW-Berichte

[5] Rudolf Kühn: Mikrowellen-Antennen, Verlag Technik

[6] Frank Sichla: Antennen für Mikrowellen-Anwendungen, hf-praxis 9/2016

Das Active Denial System (ADS)

beschießt potenzielle Gegner mit elektromagnetischer Strahlung und erhitzt das Gewebe um bis zu 55° C, ist jedoch nicht tödlich. Der Rüstungskonzern Raytheon hat die Herstellung übernommen. Das ADS arbeitet mit einer Frequenz von 95 GHz. Die elektromagnetischen Strahlen werden über eine Antenne auf Personen, die über 500 m entfernt sein können, oder andere Ziele gerichtet. Bei Personen dringt der Strahl in die oberste Hautschicht ein (ca. 0,4 mm) und heizt die Wassermoleküle binnen Sekunden auf knapp 55° C. Dies wird als Schmerzreiz wahrgenommen.



Grafik: Global Security