



HOCHSCHULE BREMEN
FAKULTÄT 4: ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIK

Bachelor Thesis

Systems zum Empfang von Geostationären Satelliten
durch die IAT Bodenstation

Daniel Albinger (5183249)

Prüfer

1. Prüfer: Prof. Dr. Peik
 2. Prüfer: Prof. Dr. García
- Gastbegleitung: M. Rauwolf

Abgabe: Datum

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theorie und Grundlagen	1
2.1 Was ist ein Satellit	1
2.2 Umlaufbahnen für Satelliten	4
2.3 Postion eines Satelliten	4
2.4 Es Hail-2	4
2.4.1 Schmallband Transponder	5
2.5 Mischer	7
2.5.1 Anwendung von Mischern	7
2.5.2 Rauschen und Verluste	7
2.6 Antenne	7
2.7 Rauschen	15
2.8 Arten und Quellen von Rauschen	17
3 Theoretische Betrachtung der Empfangskette	20
3.1 Darstellung des Downlinks	20
4 Praktischer Aufbau der Empfangskette	21
4.1 Ausrichten der Antenne	21
5 Anhang	22
5.1 Literaturverzeichnis	22
5.2 Abbildungsverzeichnis	24
5.3 Tabellenverzeichnis	24

1 Einleitung

2 Theorie und Grundlagen

2.1 Was ist ein Satellit

Bei einem Satelliten handelt es sich im allgemeinen Verständnis um ein Objekt, welches sich in einer Umlaufbahn um einen Himmelskörper, wie z.B ein Planet, Mond, Stern oder ähnliches befindet. Dabei kann der Satellit natürlichem oder künstlichen Ursprung sein.[1] Im weiteren Verlauf handelt es sich bei einem Satelliten um ein künstliches Objekt, welches sich in einer Umlaufbahn um die Erde befindet.

Die erste Idee für einen Satelliten in einer geostationären Umlaufbahn stammt aus dem Jahren 1945. In diesem Jahr veröffentlichte der Autor Arthur C. Clarke im Magazin "Wireless World" einen Artikel, in welchem er die Bedeutung des geostationären Orbits beschreibt. Die Zeit, die ein Satellit in einer geostationären Umlaufbahn benötigt, um einmal um die Umlaufbahn zu durchlaufen, entspricht der Zeit, die die Erde für eine Rotation um sich selbst benötigt. Für einen Beobachter auf der Erdoberfläche steht der Satellit immer über dem gleichen Punkt auf der Erde. Weiterhin beschreibt Clarke die Idee eines Kommunikationssatelliten im geostationären Orbit. Mit dem richtigen Equipment könnte ein solche Satellit eine Möglichkeit für interkontinentalen Datenaustausch bieten.[1]

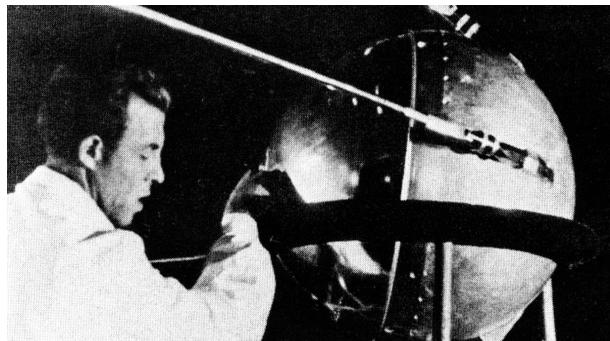


Abbildung 1: Das Bild zeigt den ersten Satelliten Sputnik 1 vor dem Start. Sputnik 1 ist eine Aluminiumkugel mit einem Durchmesser von 0.58 m und einem Gewicht von 58 kg.[2][3]

Der erste Satellit startete am 04. Oktober 1957 von der damaligen UdSSR. Der Satellit mit Namen Sputnik 1, was so viel wie Begleiter oder Trabant bedeutet, umkreiste die Erde alle 98 min. Ausgerüstet war Sputnik 1 mit zwei Antennenpaaren und Telekommunikationsequipment, mit welchem er über 20.005 MHz und 40.002 MHz kurze Signale aussendete. Diese konnten auf der ganzen Welt empfangen werden. Nach etwa 92 Tage verglühte Sputnik 1 beim Wiedereintritt in die Atmosphäre. [2]

Der erste amerikanische Satellit startete am 31. Januar 1958 mit dem Namen Explorer 1. Explorer 1 ist der erste Satellit gewesen, welcher wissenschaftliches Equipment ab Bord hatte.[4]



Abbildung 2: Vorführung des ersten amerikanischen Satelliten Explorer 1[4]

An Bord von Explorer 1 befanden sich wissenschaftliches Equipment, unter anderem auch ein Messgerät für kosmische Strahlung. Mit diesem Messgerät sollte die Strahlung in der Atmosphäre der Erde gemessen werden. Explorer 1 erbrachte den Nachweis für den Van Allen Strahlungsgürtels. Der Satellit umrundete die Erde alle 114 min in einer kreisförmigen Umlaufbahn, wobei diese den Satelliten bis auf 354 km an die Erde ran und 2515 km entfernt brachte. Explorer 1 war 203 cm lang, hatte einen Durchmesser von 15.9 cm und wog 14 kg. Am 23. Mai 1958 machte die Explorer 1 ihre letzte Übertragung und verglühte am 31. März 1970 beim Wiedereintritt in der Atmosphäre.[4]

In der heutigen Zeit gibt es viele verschiedene Arten an Satelliten, welche sich in ihrem Verwendungszweck und ihrem damit verbundenen Equipment und Umlaufbahn unterscheiden.

Ein paar Beispiele wären dabei:

- Erdbeobachtungssatelliten: Erdbeobachtungssatelliten werden, wie der Name bereits aussagt, zur Beobachtung und Analyse der Erdoberfläche und Atmosphäre eingesetzt. Ein Beispiel für solche Satelliten wären Wettersatelliten, welche in den verschiedensten Umlaufbahnen zu finden sind. Diese werden meistens mit verschiedenen Kameras, welche Bilder von der Oberfläche der Erde und Wolkenformation aufnehmen. Die Bilder bieten eine mögliche Grundlage für die Wettervorhersage. Beispiele für Wettersatelliten sind unter anderem die NOAA und GOES Reihe der Amerikaner, die METOP und METOSAT Reihe der Europäer und die METEOR und Electro-L Reihe der Russen.[5]
- Kommunikations- und Rundfunksatelliten: Dieser Art der Satelliten stellen verschiedenste Service im Bereich der Telekommunikation und Rundfunk bereit. Sie werden unter anderem zur Übertragung von Fernsehsignalen, Telefonie und Internet verwendet. Auch diese Satelliten sind in den verschiedensten Umlaufbahnen zu finden.

Ein paar Beispiele wären die Starlink Reihe von SpaceX, Iridium von gleichnamigen Unternehmen Iridum, Inmarsat vom gleichnamigen Unternehmen Inmarsat und Astra von SES S.A. ASTRA.[1][6][7]

- Navigationssatelliten: Navigationssatelliten werden zur genauen Positionsbestimmung verwendet. Die Positionsbestimmung basiert dabei auf der Triangulierung und Einwegentfernungsmessung. Zur Bestimmung werden Signale von drei oder mehreren Satelliten empfangen. Die Signale enthalten neben den genauen Koordinaten des Satelliten auch den genauen Zeitpunkt, an welchem die Signale versendet werden. Grundlage für den genauen Zeitbestimmung bilden Atomuhren.[6]

Zusammen mit der Empfangszeit wird dann die Laufzeit der einzelnen Signale ermittelt, woraus die zurückgelegte Entfernung ermittelt werden kann. Der Standpunkt ist dann der Schnittpunkt der Kugeln, deren Mittelpunkte die Satelliten und deren Radius der zurückgelegte Weg ist.[6]

Die Genauigkeit ist dabei proportional zur Anzahl zur Triangulation verwendeten Satelliten. Beispiele für solche Sternenkonstellationen sind das GPS der Amerikaner, das GLONASS der Russen und das europäische Galileo.[6]

- Amateurfunksatelliten: Amateurfunksatelliten bilden eine besondere Untergruppe der Kommunikationssatelliten. Sie werden meistens von Universitäten, Vereinigungen von Amateurfunkern oder ähnlichen Vereinen geplant, entwickelt, gebaut und betrieben, wobei die enge Budgets und technologischen Innovationen bewundernswert sind.[6] Eine solche Vereinigung ist AMSAT, welche mehrere Ableger weltweit hat. In Deutschland gibt es die AMSAT-DL, welche sich aus Funkamateuren, Ingenieuren, Wissenschaftlern, Studenten und Raumfahrtenthusiasten zusammensetzt. Seit über 50 Jahren plant, entwickelt, baut und betreibt AMSAT-DL verschiedenste Satelliten, welche von Funkamateuren frei verwendet werden dürfen.[8]

Der erste Amateurfunksatellit "OSCAR-I" (Orbital Satellite Carrying Amateur Radio) startete am 12. Dezember 1961, vier Jahre vor dem ersten kommerziellen Kommunikationssatelliten "Early Bird". Die ersten OSCAR-I, -II und -III Satelliten funktionierten nur wenige Tage. Erst OSCAR-VI von der deutschen AMSAT (AMSAT-DL) schaffte es 4,5 Jahren lang zu arbeiten. Es folgten weitere deutsche OSCARS, weltweit insgesamt mehr als 50 Stück.[6]

Weitere Meilensteine von AMSAT-DL sind die sogenannten Phase 3 Satelliten. Die Entwicklung dieser Satelliten begann in den 70er Jahren. Das Ziel der Phase 3 Satelliten ist eine Generation von Erdsatelliten in einer hochelliptischen Umlaufbahn zu erschaffen. Gegenüber der bisherigen Satelliten würden diese eine weltweiten Benutzerkreis erschließen. Von den bisher vier gestarteten Phase 3 Satelliten, mit der Bezeichnung P3-A bis P3-D, sind nur noch P3-B und P3-D im Orbit. [8][6]

Ein weiterer Meilenstein ist der erste Phase 4 Satellit. Bei dem Satelliten handelt es sich um die katarischen Rundfunk- und Kommunikationssatelliten Es'Hail-2, welcher neben dem Equipment zur kommerziellen Nutzung auch zwei Amateurfunktransponder an Bord hat, welche die ersten im geostationären Orbit sind.[8]

Aktuell beschäftigt sich AMSAT-DL mit der Entwicklung eines weiter Phase 3 Satelliten (P3-E), welcher als Testsatellit für die Technologien von P5A dienen soll. Bei P5-A handelt es sich um den ersten Phase 5 Satelliten welcher zukünftig zum Mars fliegen soll.[8]

Ein Satellit wird meistens für einen Verwendungszweck geplant, entwickelt und gebaut. Je nach Verwendungszweck und geplanter Lebensdauer wird ein geeigneter Orbit ausgewählt.

2.2 Umlaufbahnen für Satelliten

Satelliten werden entsprechend ihrer Mission in eine geeignete Umlaufbahn platziert. Verschiedene Missionen können verschiedene Umlaufbahnen erfordern. Die Umlaufbahnen unterscheiden sich dabei in Form (Kreis oder Ellipse), Höhe und Inklination zum Äquator. [6]

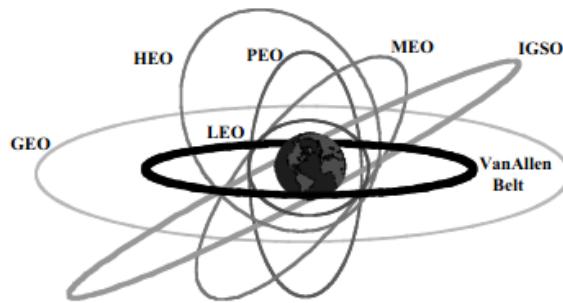


Abbildung 3: Die verschiedenen Umlaufbahnen im Überblick [6]

In der Abbildung 3 zeigt verschiedene Umlaufbahnen, welche für unterschiedliche Satelliten verwendet werden. Satelliten für Erdbeobachtung oder Wetteranalyse werden meistens in Umlaufbahnen möglichst nah an der Erdoberfläche platziert. So kann die Auflösung der aufgenommen Bilder erhöht werden.[6]

Auf der anderen Seite werden Kommunikations- und Rundfunksatelliten in höhere Umlaufbahnen gebracht. Mit einer höheren Umlaufbahn kann die Sichtdauer auf den jeweiligen Satelliten und auch der Abdeckungsbereich des jeweiligen Satelliten kann erhöht werden. In Folge dessen kann auch die Anzahl an notwendigen Satelliten, um zum Beispiel eine weltweite Abdeckung zu erreichen, auf ein Minimum reduziert werden.[6]

Die allgemeine Kreisbahn

Damit ein Satellit in seiner jeweiligen vorgesehenen Umlaufbahn bleibt, müssen die auf den Satelliten wirkenden Kräfte im Gleichgewicht bleiben.

2.3 Postion eines Satelliten

2.4 Es Hail-2

Bei Es'Hail-2 handelt es sich um einen Kommunikationssatelliten, welcher von dem katarischen Unternehmen Es'hailSat betrieben wird.

Gebaut wurde der Satellit von der Mitsubishi Electric Company (Melco). Es'Hail-2 basiert dabei auf der Melco DS-2000 Plattform. Der Satellit starte am 15.11.2018 an Bord einer Falcon 9 Rakete vom Cape Canaveral Space Center in einen geostationären Testorbit um 24°East. Nach der Testphase wurde Es'Hail-2 in seinen endgültigen Geostationären Orbit um 25.9°East verschoben. Die geplanten Lebenszeit von Es'Hail-2 beträgt 15 Jahre.[9]

An Bord von Es'Hail-2 befinden sich insgesamt 72 verschiedene Transponder für die L-, S-, X- Ku- und Ka-Bänder. Die Hauptaufgabe des Satelliten ist es, die Regionen Nord Afrika und den mittleren Osten mit TV- und Telekommunikationsdiensten zu versorgen.

Die Nutzer sind dabei private Haushalte, Unternehmen oder Regierungsorganisationen. Neben den Transponder für die kommerzielle Nutzung des Satelliten befinden sich auch zwei Amateurfunk Transponder an Bord von Es'Hail-2. Bei diesen Transponder handelt es sich um die ersten P4-A Transponder im Geostationären Orbit. Sie sind einer Zusammenarbeit zwischen Es'hailSat, dem Qatar Amateur Radio Club (QARS) und AMSAT Deutschland (AMSAT-DL) als technische Leitung entstanden. Vorhanden sind ein Schmallband- (Narrowband) und ein Breitband- (Wideband) Transponder. Die Transponder tragen den Rufnamen QO-100 (Qatar Oscar 100).[9]

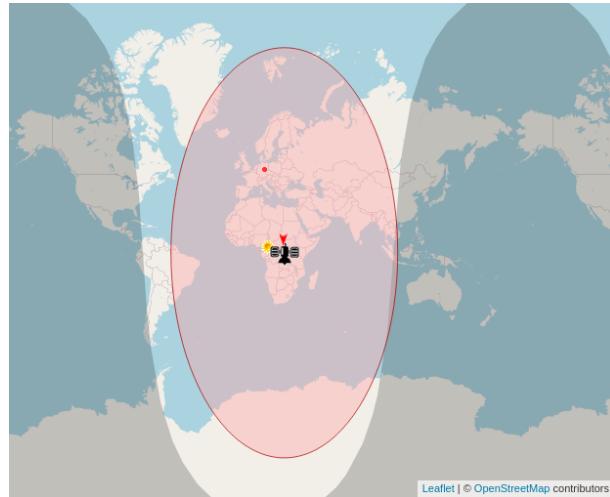


Abbildung 4: Abdeckungsbereich der Amateurfunktranponder von Es'Hail-2[10]

Die Karte in Abbildung 4 zeigt den Abdeckungsbereich der Amateurfunktransponder von Es'Hail-2. Abgedeckt wird runter bis 5° Elevation, in einigen Bereichen auch bis 0°. Die Abdeckung reicht damit von Brasilien, Teile Grönlands und der Antarktis über Afrika und Europa bis nach Thailand. Je nach Region wird für den Optimalen Empfang eine Schüssel von 60cm bis 90 cm empfohlen. Die Regionen mittig in der Abdeckung benötigen nur eine Schüssel mit geringen Durchmesser. In den Regionen am Rand oder in regenreichen Gegenden sind größere Schüsseln vom Vorteil.[9].

2.4.1 Schmallband Transponder

Für den Schmallband Transponder wird ein linearer Transponder verwendet. Ein normaler Repeater empfängt ein Signal auf einer festen Frequenz und sendet dieses auch wieder auf einer Frequenz. Ein linearer Transponder hingegen empfängt und sendet Signale über ein breites Spektrum und hält dabei ein festes Offset zwischen den empfangenen und gesendeten Signalen.[9][11]

Lineare Transponder werden häufig für Amateur- und Satellitenfunk verwendet. Ein linearer Transponder empfängt ein breites Spektrum an Frequenzen. Im Falle von Es'Hail-2 liegt der Uplink im S-Band zwischen 2400.005 MHz und 2400.490 MHz. Der lineare Transponder hat somit eine Bandbreite von 500 kHz.[9][11]

- Mittenfrequenz: $f_{center} = 2400.175 \text{ MHz}$
- Bandbreite: $BW_{Narrow} = 0.5 \text{ MHz}$

- Polarisation: RHCP

Die empfangen Signale sendet der lineare Transponder dann wieder mit einem festen Offset auf einem anderen Frequenzband. Der Downlink von Es'Hail-2 liegt im X-Band zwischen 10489.500 MHz und 10490 MHz.[9][11]

- Mittenfrequenz: $f_{center} = 2400.175$ MHz
- Bandbreite: $BW_{Narrow} = 0.5$ MHz
- Polarisation: RHCP

Wird ein Signal auf 2400.100 MHz vom Transponder empfangen, wird es vom Transponder auf 10489.650 MHz wieder versendet. Das Offset wird vom Transponder beibehalten.[11] Der Schmallband Transponder ist eine Reihe an verschiedenen Kommunikationsarten geeignet. Allgemein wird dieser Transponder für Sprachübertragungen, Morse Code oder digitale Übertragungen mit geringer Leistung und Bandbreite verwendet. Wichtig ist, dass die dafür vorgesehenen Frequenzen verwendet werden.[9]

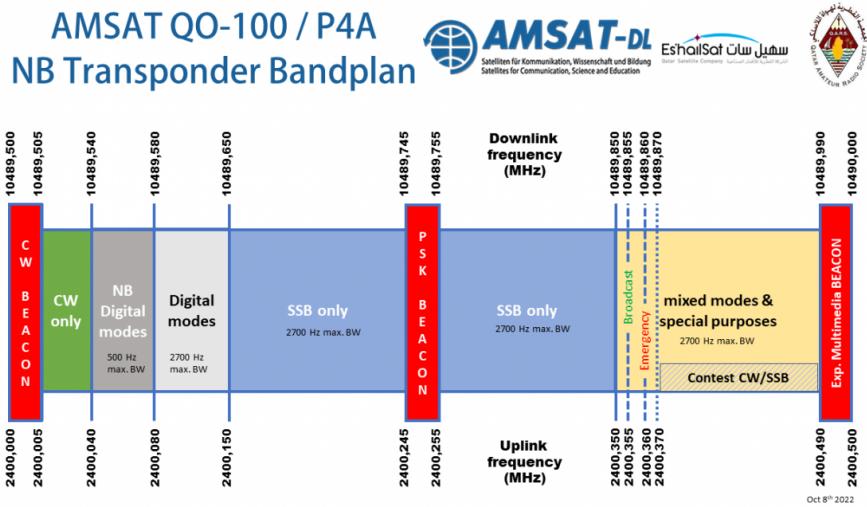


Abbildung 5: Von AMSAT freigegebener Bandplan für den Schmallbandtransponder von QO-100[12]

Die Abbildung 5 zeigt den Bandplan des Up- und Downlinks des Schmallband Transponder. Die drei rot gekennzeichnete Bereiche sind drei Beacons, welche den Frequenzbereich des Transponder eingrenzen. In diesem Bereich darf nicht gesendet werden. Die Beacons senden Daten mit 400 Bit/s mit verschiedensten Modulationen.[9]

Der Bereich von 2400.005 MHz bis 2400.040 MHz im Uplink oder 10489.505 bis 10489.540 MHz im Downlink ist ausschließlich für Übertragungen mit einer CW-Modulation vorgesehen. Der nächste Bereich von 2400.40 MHz bis 2400.080 MHz (Up) und 10489.540 MHz bis 10489.580 MHz (Down) ist für schmallbandige digitale Kommunikation reserviert. Die maximale Bandbreite beträgt hier 500 Hz. Auch der nächste Bereich von 2400.080 MHz bis 2400.150 MHz (Up) und 10489.580 MHz bis 10489.650 MHz (Down) ist für digitale Kommunikation vorgesehen. Allerdings beträgt die maximale Bandbreite in diesem Bereich 2700 Hz. Die Bereiche von 2400.150 MHz bis 2400.245 MHz (Up), 10489.650 MHz bis 10489.745 MHz (Down) und 2400.255 bis 2400.350 MHz (Up), 10489.755 MHz bis 10489.990 MHz (Down) sind für Broadcast und Emergency reserviert.

bis 10489.850 MHz (Down) ist für Signale mit einer Einseitenband-AM reserviert. Auch hier beträgt die maximale Bandbreite 2700 Hz. Der letzte Bereich von 2400.350 MHz bis 2400.490 MHz (Up) und 10489.850 MHz bis 10489.990 MHz ist für die Kommunikation mit verschiedensten Modulationen und für spezielle Anlässe vorgesehen. In diesem Bereich findet sich auch ein Kanal für Broadcast und ein Kanal für Notfälle. Auch finden in diesem Bereich verschiedenste Wettbewerbe statt. [12]

Für den Schmalltransponder gibt es noch weitere Regelungen. Zu einem sollte auf eine Frequenz Modulation, in egal welchem Bereich, verzichtet werden. Frequenz modulierte Signale nehmen in Vergleich zu anderen Modulationsarten eine größere Bandbreite ein und benötigen auch eine größere Sendeleistung. Da sowohl die Bandbreite als auch die Leistung stark limitiert ist, sollte auf die Frequenz Modulation verzichtet werden. Erwünscht sind schmalbandige Modulationsverfahren wie CW, Einseitenband-AM oder PSK[13][9]

Unterhalb von 2400 MHz, gekennzeichnet im Downlink durch den unteren CW-Beacon, darf keine Übertragung stattfinden. Für Amateur Satellitenfunk ist rechtlich nur der Bereich von 2400 MHz bis 2450 MHz vorgesehen und zulässig. So wird eine Störung anderer Dienste verhindert[9][14] Von AMSAT wird zum senden eine Full-Duplex Operation vorgeschrieben. Das bedeutet, dass der jeweilige Funker gleichzeitig senden und empfangen muss.[9] Diese Vorschrift wird für den nächsten Punkt wichtig.

Weiterhin sollte die Sendeleistung so klein wie nötig gehalten werden. AMSAT empfiehlt die Sendeleistung in der gleichen größeren Ordnung wie die der Beacon zu halten, da es sonst zu ungewünschte Verzerrungen und Übersteuerungen kommen kann. Signale mit zu großer Leistung werden von der LEILA-Sirene im Downlink gekennzeichnet. LEILA ist ein Akronym und steht für Leistungs Limit Anzeige. Wird ein Signal mit der LEILA-Sirene gekennzeichnet, muss der jeweilige Funker seine Leistung umgehend reduzieren.[9] Das System für LEILA befindet sich in der Bodenstation bei Doha und in Bochum. Aufgrund der Verzögerung kann keine Bandsperrre eingesetzt werden. Da aber zum senden eine Full-Duplex Verbindung vorgeschrieben ist, ist eine akustische Warneinrichtung ausreichend.[9]

2.5 Mischer

Ein Mischer ist ein elektrisches Bauteil, welches unter anderem zur Frequenzumsetzung verwendet wird. Bei der Frequenzumsetzung werden elektrische Signale in höhere oder niedrigere Frequenzbänder umgesetzt. Das ist einer der Gründe, warum Mischer ein breite Anwendung in der Kommunikationstechnik findet.

2.5.1 Anwendung von Mischern

2.5.2 Rauschen und Verluste

2.6 Antenne

Die Antenne ist mit der wichtigste Bestandteil der Empfangskette an der Satellitenbodenstation. Erst mit einer geeigneten Antenne ist es möglich die Signale vom Satelliten, welcher ebenfalls eine Antenne braucht um die Signale zu senden, zu empfangen. Die Antenne wandelt die leitungsgebundene Welle um und strahlt diese in den freien Raum ab oder empfängt die Wellen im freien Raum und gibt diese an die Leitung ab. Sie ist

also das Verbindungsglied zwischen der leitungsgebundenen Welle und der Welle im freien Raum.

Die IEEE definiert eine Antenne als ein passives, lineares und reziprokes Bauelement, welches Radiowellen abstrahlen, als auch empfangen kann[15][16].

Eine Antenne kann über viele verschiedene Parameter beschrieben werden. Diese Parameter helfen dabei eine geeignete Antenne für die jeweilige Anwendung zu finden.

Nah- und Fernfeld

Der Bereich um die Antenne kann in mehrere Bereiche aufgeteilt werden. Im mittelbaren Umfeld liegt das Nahfeld, auch Fresnel-Brech genannt[17], der Antenne. Neben den abgestrahlten elektromagnetischen Wellen wirken hier auch starke stationäre Felder, welche ebenfalls von der Antenne ausgehen. Beschreiben lassen sich die Felder durch die maxwellschen Gleichungen. Im Nahfeld wird die Berechnung der Felder aufgrund der hohen Ordnungen der Polynome erschwert[17]. Aus diesem Grund werden die Strahlungscharakteristiken einer Antenne im Fernfeld bestimmt. [16].

Das Fernfeld, auch Fraunhofer-Bereich genannt, ist geometrisch deutlich größer als das Nahfeld. Es beginnt da, wo sich die elektromagnetischen Wellen frei im Raum ausbreiten können. Der Übergang zum Fernfeld kann Näherungsweise bestimmt werden. Für Antennen, welche in ihren geometrischen Abmessung kleiner als ihre Wellenlänge λ sind, gilt[17]:

$$r_{fern} = 2 \cdot \lambda \quad (1)$$

Bei größeren Antennen, zum Beispiel Parabolantennen, gilt[17]:

$$r_{fern} = \frac{2 \cdot L^2}{\lambda} \quad (2)$$

Dabei gibt die Variable L die geometrische Abmessung der Antenne an. Als sichere Faustformel kann ab einem Abstand $r > 5 \cdot \lambda$ vom Fernfeld ausgegangen werden.

Im Fernfeld existieren nur die Felder der elektromagnetische Welle, was die Berechnung der Felder deutlich vereinfacht. Die elektrische und magnetische Komponente der EM-Welle befinden sich Phase zu einander und stehen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung. Über das Verhältnis vom elektrischen und magnetischen Feld kann der Freiraumwiderstand η_0 bestimmt werden.

$$\eta_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \mu_0 \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 377\Omega \quad (3)$$

Bis zur Entfernung $r = \frac{L^2}{2 \cdot \lambda}$ um die Antenne liegt die sogenannte Rayleigh-Zone. In diesem Bereich strahlt Antenne nicht nur Energie ab, sondern nimmt auch einen Teil der abgestrahlten Energie als Blindleistung wieder auf.[17]

Antennen-/Richtdiagramm

Ein Antennen- oder Richtdiagramm stellt die Strahlungscharakteristik einer Antenne grafisch dar. Die Strahlungscharakteristik einer Antenne umfasst dabei die Strahlungsleistungsdichte, die Feldstärke, Intensität, Richtfaktor, Phasenlage und Polarisation.[16] In den meisten Fällen wird im Antennendiagramm allerdings die Intensität der abgestrahlten Energie oder ihre Feldstärke in Abhängigkeit der Richtung dargestellt[18]. Da Antennen reziproke Elemente sind gilt ein Antennendiagramm gleichermaßen für das Senden und

auch für das Empfangen mit der jeweiligen Antenne. Im Sendefall gibt das Antennendiagramm die richtungsabhängige Ausstrahlung der Antenne an und im Empfangsfall die richtungsabhängige Empfangsempfindlichkeit.[18]

Auch besteht die Möglichkeit die Strahlungscharakteristik der Antenne mithilfe einer mathematischen Funktion zu definieren.[16]

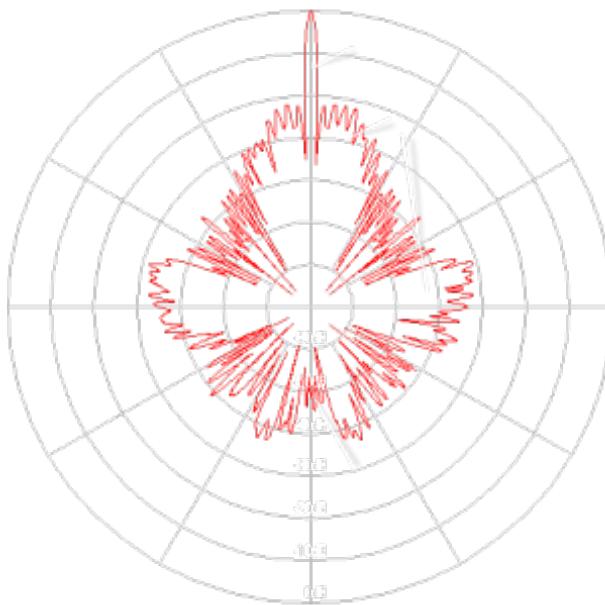


Abbildung 6: Ein Beispiel für ein horizontales Antennendiagramm im Polarkoordinaten-
system[18]

Für das Antennendiagramm kann in unterschiedlichen Formen und in verschiedenen Ebenen dargestellt werden. Ein Antennendiagramm kann im 2D-Raum entlang der horizontalen (Azimuth), als auch entlang der vertikalen Ebene (Elevation) der Antenne erstellt werden. Auch kann ein Antennendiagramm im 3D-Raum erstellt werden. Die Abbildung 6 zeigt ein horizontales Antennendiagramm im polaren Koordinatensystem.

Neben dem polaren Koordinatensystem kann auch das kartesische Koordinatensystem verwendet werden, jedoch kann im polaren Koordinatensystem die Richtwirkung der Antenne besser dargestellt werden. [18].

Haupt- und Nebenkeulen

Im Antennendiagramm in Abbildung 6 lassen sich verschiedene Muster in der Strahlungscharakteristik der Antenne erkennen, welche auch Keulen genannt werden. Dabei werden die Keulen weiter in Haupt- und Nebenkeulen unterteilt.

Bei der Hauptkeule handelt es sich um den Bereich einer Antenne, in dessen Richtung am meisten Energie abgestrahlt oder, im Empfangsfall, empfangen wird.[16] Bei einigen Antennen können auch mehrere Hauptkeulen vorhanden sein. Ein Beispiel dafür sind Loop- oder Dipolantennen, welche zwei Hauptkeule im Antennendiagramm aufweisen. Diese Hauptkeulen sind im 180° versetzt zu einander. Die Hauptkeulen stellen die bevorzugte Anwendungsrichtung einer Antenne dar, egal ob die Antenne im Sende- oder Empfangsbetrieb verwendet wird.

Die Nebenkeulen handelt es sich um alle Keulen, welche nicht die Hauptkeule darstellen.

Diese sind jedoch deutlich kleiner und sollte auch so klein wie möglich sein. Nebenkeule sind meistens unerwünscht, da sie Energie in ungewollte Richtungen abstrahlen und so weniger Energie durch die Hauptkeule abgestrahlt wird oder da sie im Empfangsfall dafür sorgen, dass die Antenne aus eventuell unerwünschten Richtungen Signale aufnimmt und so den Empfang stören.[16]. Die größten beiden größten Nebenkeulen werden auch Seitenkeulen genannt.[16].

Der Abstand von der Hauptkeule zur größten Nebenkeule ist die Nebenkeulendämpfung. Je größer der Wert ist, desto kleiner sind die Nebenkeulen. Die Nebenkeulendämpfung ist ein wichtiger Parameter für Richtantennen, da damit die Richtschärfe ausgedrückt werden kann.

Die Haupt- und Nebenkeulen bilden sich bei jeder Antenne, welche kein isotropischer Kugelstrahler ist.

Strahlbreite

Im Zusammenhang mit dem Strahlungsmuster einer Antenne kann ein weiterer Parameter hergeleitet werden. Die Strahlbreite beschreibt den Öffnungswinkel der Hauptkeule. Gemessen wird die Strahlbreite an zwei identischen Punkten auf beiden Seiten des Maximums der Hauptkeule[16].

Oft verwendet wird die 3dB-Strahlbreite, auch Half-Power Beamwidth genannt. Diese wird von der IEEE definiert als der Winkel zwischen den zwei Punkten an der Hauptkeule, wo die abgestrahlte Leistung nur noch die Hälfte des Maximums der Hauptkeule beträgt[16].

Es gibt auch noch andere Strahlbreite wie die First Null Beamwidth (FNBW), diese findet aber in der Praxis keine große Anwendung[16].

Die Strahlbreite ist gerade für Richtantennen ein wichtiger Parameter, da die Strahlbreite ihr Auflösungsvermögen beschreibt. Mit einer kleineren Strahlbreite kann im Empfangsfall eine größere Winkelauflösung erreicht werden. Eine größere Winkelauflösung hilft einer Antenne dabei zwischen mehreren benachbarten Strahlungsquellen zu unterscheiden. Mit einem größeren Öffnungswinkel neigt die Antenne dazu benachbarte Quellen als eine wahrzunehmen. Das kann für zum Beispiel Radaranlagen wichtig sein[16]. Allerdings wachsen mit geringerer Strahlbreite auch die Nebenkeulen, was unerwünschte Effekte, wie in 2.6 beschrieben, führt [16].

Antennengewinn

Ein weiterer nützlicher Parameter, welcher für die Beschreibung von Antennen verwendet werden kann, ist der Antennengewinn G . Der Antennengewinn ist eng mit dem Richtfaktor und dem Wirkungsrad der Antenne verbunden[16].

Eine reale Antenne strahlt die eingespeiste Leistung P_S nicht gleichmäßig in alle Richtungen ab. Eine reale Antenne weist bevorzugte Richtungen (ϕ, θ) auf, gekennzeichnet durch die Haupt- und Nebenkeulen im Antennendiagramm, in welche sie die Leistung abstrahlt oder aus welcher sie Leistung aufnimmt.

Im Sendefall entspricht der Antennengewinn $G(\varphi, \theta)$ dem Verhältnis der abgestrahlten Strahlungsleistungsdichte $S(\phi, \theta)$ der Antenne zu der abgestrahlten Strahlungsleistungsdichte $S_{ref}(\phi, \theta)$ einer Referenzantenne bei gleicher eingespeisten Leistung P_S , Richtung (ϕ, θ) und Entfernung r [16].

$$G(\phi, \theta) = \frac{S(r, \phi, \theta)}{S_{ref}(r, \phi, \theta)} \quad (4)$$

Die Entfernung r kürzt sich aus der Gleichung raus. Sie ist für den Antennengewinn nicht entscheidend.

Da Antennen reziproke Elemente sind gilt die Gleichung 4 gleichermaSSen für den Empfangsbetrieb. Im Empfangsbetrieb entspricht der Antennengewinn G dem Verhältnis der empfangenen Leistung $P_E(\phi, \theta)$ der jeweiligen Antenne zu der empfangenen Leistung $P_{Eref}(\phi, \theta)$ einer Referenzantenne bei gleicher Sendequelle mit fester Sendeleistung P_S und Entfernung r und gleichen Empfangswinkel (ϕ, θ) .

$$G(\phi, \theta) = \frac{P_E(\phi, \theta)}{P_{Eref}(\phi, \theta)} \quad (5)$$

Als Referenzantenne in beiden Fällen eine beliebige Antenne gewählt werden. In den meisten Fällen wird als Referenzantenne der isotrope Kugelstrahler verwendet. Allerdings kann auch der einfache hertzsche Dipol verwendet werden[16].

Der isotrope Kugelstrahler ist eine rein theoretische Antenne. Der isotrope Kugelstrahler strahlt die eingespeiste Leitung P_S in alle Richtungen gleichmäSSig aus und empfängt auch aus allen Richtungen die gleiche Leistung P_E . Aus diesem Grund eignet sich der isotrope Kugelstrahler besonders gut als Referenzantenne. Für die Strahlungsleistungsdichte eines isotrope Kugelstrahler gilt:

$$S_0 = \frac{P_S}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (6)$$

Der Gewinn wird meistens logarithmisch in dBi angegeben. Das i in dBi bedeutet, dass der Gewinn auf einen isotropen Kugelstrahler bezogen angeben wird. Aus der Gleichung 4 und 6 folgt dann für die logarithmische Darstellung:

$$G = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S(\phi, \theta) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2}{P_S} \right) \quad (7)$$

Wird nichts weiter angegeben, kann im Datenblatt einer Antenne beim Gewinn $G(\varphi, \theta)$ vom Gewinn in Richtung der Hauptkeule ausgegangen werden, da diese auch die bevorzugte Anwendungsrichtung der Antenne darstellt.[16]

Richtfaktor und Wirkungsgrad

Beim Richtfaktor D einer Antenne handelt es sich um das Verhältnis der Strahlungsintensität bei einem bestimmten Abstrahlwinkel (φ, θ) zu der durchschnittliche Strahlungsintensität der Antenne in alle Richtungen. Dabei wird meistens als Abstrahlwinkel (φ, θ) der Winkel von der maximalen Strahlungsintensität, also der Hauptkeule der Antenne, verwendet.[16]

$$D = \frac{\text{Maximale Strahlungsintensität}}{\text{Durchschnittliche Strahlungsintensität}} = \frac{\phi_{\max}}{\phi_{\emptyset}} \quad (8)$$

Die durchschnittliche Strahlungsintensität kann über die von der Antenne abgestrahlten Leistung P_{rad} bestimmt werden.[16]

$$\phi_{\emptyset} = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi} \quad (9)$$

Mit dem Richtfaktor D und mithilfe des Antennenwirkungsgrad η kann der Gewinn G einer Antenne ermittelt werden.

$$G = \eta \cdot D = \eta \cdot \frac{\phi_{\max}}{\phi_{\emptyset}} \quad (10)$$

Der Antennenwirkungsgrad η berücksichtigt Verluste, welche innerhalb der Antenne auftreten. Zusammensetzen tut sich der Antennenwirkungsgrad η aus den ohmschen Verlusten ϵ_R , den Verlusten durch Reflexion ϵ_Γ und den dielektrischen Verlusten ϵ_d .[16]

$$\eta = \epsilon_R \cdot \epsilon_\Gamma \cdot \epsilon_d \quad (11)$$

Bei verlustlosen Antennen gilt $G = D$, da $\eta = 1$. -> Mehr zu den Verlusten raus suchen.

Äquivalente Strahlungsleistung

Die äquivalente Strahlungsleistung oder auch effektive Strahlungsleistung (ERP) ist eine nützliche Größe um die die Auswirkung des Gewinns $G(\varphi, \theta)$ einer Antenne zu verdeutlichen.

Die äquivalente Strahlungsleistung gibt die Leistung an welche eine Referenzantenne abstrahlen müsste, um die gleiche Strahlungsleistungsdichte $S(\varphi, \theta)$ der Bezugsantenne in einem bestimmten Abstrahlwinkel (φ, θ) zu erreichen. Beim Abstrahlwinkel (φ, θ) der Bezugsantenne wird in der Regel von Hauptkeule der Antenne ausgegangen.[19]

Als Referenzantenne kann eine beliebige Antenne verwendet werden. In der Praxis werden für gewöhnlich eine Dipolantenne oder ein isotroper Kugelstrahler als Referenz gewählt. Wird ein Dipol als Referenz gewählt, wird die äquivalente Strahlungsleistung als ERP angegeben. Wird jedoch ein isotroper Kugelstrahler als Referenzantenne verwendet, wird die äquivalente Strahlungsleistung als EIRP angeben. EIRP steht für equivalent isotropic radiated power oder äquivalente isotropische Strahlungsleistung.[19]

Das EIRP setzt sich aus der Sendeleistung P_T und dem Gewinn G in Richtung der Hauptkeule und den Verlusten der Antenne L_{ANT} zusammen.[19]

$$EIRP = P_T \cdot \frac{G}{L_{ANT}} \quad (12)$$

Das EIRP kann auch logarithmisch, z.B. in dBm, angeben werden.

$$EIRP_{\text{dBm}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_T \cdot \frac{G}{L_{ANT}}}{1 \cdot 10^{-3}} \right) = P_{T,\text{dBm}} + G_{\text{dBi}} - L_{\text{ANT,dB}} \quad (13)$$

Das EIRP und ERP hängen über den Gewinn $G = 1.64$ der Dipolantenne gegenüber dem isotropen Kugelstrahler miteinander zusammen.[19]

$$EIRP = 1.64 \cdot ERP$$

Mithilfe des ERP und EIRP kann die scheinbare Leistung eines Senders quantifiziert werden. Anwendung findet das im Bereich der Telekommunikationstechnik. Die Bundesnetzagentur gibt mit dem EIRP die maximale zulässige Sendeleistung im sogenannten Frequenznutzungsplan [14] an. So soll eine gemeinschaftliche Nutzung der einzelnen Frequenzbänder garantiert und gegenseitige Störungen minimiert werden.[19]

Effektive Antennenfläche

Die effektive Antennenfläche A_E ist ein wichtiger Parameter für Antennen, welche als Empfangsantennen betrieben werden.

Die effektive Antennenfläche, auch Absorptionsfläche oder Wirkfläche genannt, ist rein

theoretische Fläche. Diese kann gleich oder kleiner als die reale Fläche der jeweiligen Antenne sein.

Bestimmt wird die effektive Antennenfläche A_E , bei verlustlosen Antennen, über das Verhältnis von der am FuSSe der Antenne verfügbaren Leistung P_E zu der Strahlungsleistungsdichte S_E von der auf die Antenne eintreffende Welle.[16]

$$A_E = \frac{P_E}{S_E} \quad (14)$$

Dank der Reziprozität von Antennen kann aus der effektiven Antennenfläche A_E auch der Gewinn G der Antenne ermittelt werden und umgekehrt.

-> weiter ausführen

Polarisation

Eine Antenne fungiert als eine Schnittstelle zwischen elektrischen Signalen und elektromagnetischen Wellen im freien Raum. Sie wandelt leitungsgebundene Energie in elektromagnetischen Wellen um oder umgekehrt.

Im freien Raum existieren zwei verschiedene Arten von Wellen, die Transversal- und Longitudinalwellen. Bei einer transversalen Welle erfolgen die Schwingungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Schwingungen einer Longitudinalwelle erfolgen in Richtung der Ausbreitung.[20]

-> Bild der Wellentypen

Bei elektromagnetischen Wellen handelt es sich um Transversalwellen. Im Gegensatz zu Longitudinalwellen können Transversalwellen polarisiert werden.[20] Die Polarisierung E einer elektromagnetischen Welle kann als eine Funktion der Zeit t angesehen werden. Sie beschreibt die Veränderung der Richtung und relative Amplitude des E-Feld Vektors, indem sie in gleichmäßigen zeitlichen Intervallen n die Extremstellen der Schwingungen entlang der Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle im Raum darstellt.[16]

-> Bild der Polarisierung einfügen

Die Polarisierung einer Antenne kann mit der Polarisierung der von ihr abgestrahlten EM-Welle beschrieben werden. Jedoch kann die Bauform und Ausrichtung einer Antenne zu unterschiedlichen Polarisierung innerhalb ihrer Strahlungscharakteristik führen. Demnach ist die Polarisierung einer Antenne abhängig vom Abstrahlwinkel (φ, θ) , kann aber mit der Polarisierung der aus diesem Winkel abgestrahlten EM-Welle beschrieben werden.[16]

Im Fernfeld einer Antenne kann die von ihr abgestrahlte elektromagnetische Welle an jedem Punkt auf dem Ausbreitungspfad durch eine ebene Welle mit derselben Ausbreitungsrichtung und elektrischen Feldstärke \vec{E} angenähert werden. Dies gilt jedoch nur für Punkte, die sich tatsächlich im Fernfeldbereich und entlang des Ausbreitungspfads der Welle befinden. Im Nahfeld wirken zusätzlich statische und induktive Feldkomponenten, weshalb die Wellenfront hier noch gekrümmt ist. Mit wachsender Entfernung zur Antenne vergrößert sich der Krümmungsradius der Wellenfront. Der Einfluss der Nahfeldanteile nimmt also mit wachsender Entfernung zur Quelle ab. Für sehr große Entferungen wird die Wellenfront lokal praktisch eben, und die elektromagnetische Welle kann hinsichtlich Ausbreitung und Polarisationsverhalten wie eine ebene Welle betrachtet werden. Diese Eigenschaft erlaubt es, die Polarisierung der abgestrahlten Welle im Fernfeld durch die Polarisationsrichtung einer ebenen elektromagnetischen Welle eindeutig zu charakterisieren.[16]

Für eine auf eine Antenne einfallende elektromagnetische Welle wird die Polarisierung als die Polarisierung einer ebenen Welle definiert, die aus einer gegebenen Richtung mit

fester Leistungsflussdichte einfällt und die maximale verfügbare Leistung an den Antennenklemmen liefert.[16]

Die Polarisierung von Antennen und EM-Wellen können in drei Arten klassifiziert. Eine Antenne oder EM-Wellen kann entweder linear, zirkular/kreisförmig oder elliptisch polarisiert sein.[16]

Bei einer linearen Polarisierung bleibt die Richtung der Schwingung unverändert. Nur die relative Amplitude des E-Feld Vektors ändert periodisch ihren Betrag und Vorzeichen. Damit der E-Feld Vektor nur in einer Ebene entlang der Ausbreitungsrichtung der EM-Welle schwingt darf dieser nur aus einer Komponente oder aus zwei Komponenten bestehen, welche entweder in Phase oder ein Vielfaches von 180° oder π außer Phase zu einander sind.[16]

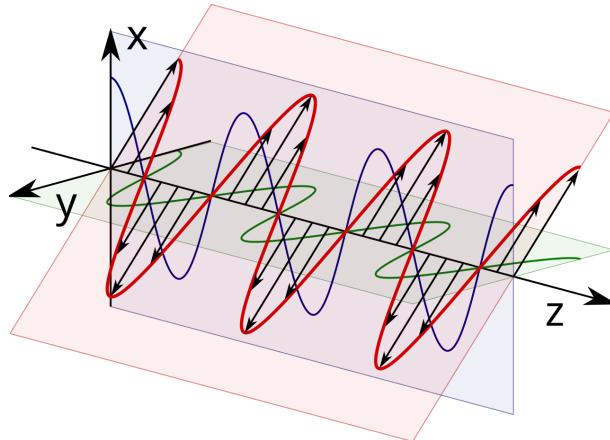


Abbildung 7: Arten an linearen Polarisationen[21]

Die Abbildung 7 zeigt die unterschiedlichen Arten der linearen Polarisation. Im Bezug zu der Erdoberfläche kann eine EM-Welle vertikal linear polarisiert (blau), horizontal linear polarisiert (grün) oder schräg linear polarisiert (rot) sein.

Im Falle einer zirkularen oder kreisförmigen Polarisierung bleibt die reale Amplitude des E-Feld Vektors konstant. Jedoch rotiert der E-Feld Vektor mit konstanter Winkelgeschwindigkeit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Am Ort des Beobachters zeigt E-Feld Vektor damit einen Kreis auf.[16]

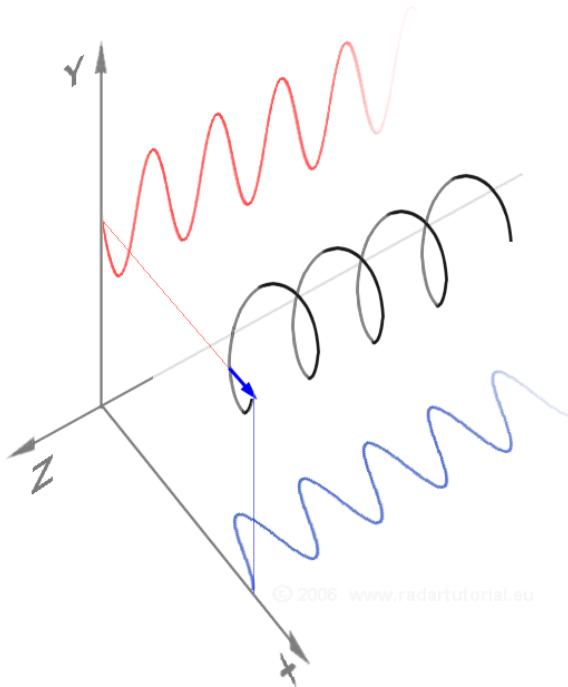


Abbildung 8: Zusammensetzung einer zirkularen Polarisation[22]

In Abbildung 8 sind die Komponenten des E-Feld Vektors (blauer Pfeil) dargestellt. Der E-Feld Vektor setzt sich aus zwei einzelnen E-Feld Vektoren (Rot und Blau) zusammen, welche orthogonal zu einander stehen. Die Phasendifferenz zwischen den roten und blauen E-Feld Vektoren beträgt dabei 90° oder $\frac{\pi}{2}$ oder ein ungerade Vielfaches davon.[16] Der Vektor des E-Feldes kann dabei gegen den Uhrzeigersinn oder im Uhrzeigersinn rotieren. Ist eine Welle im Uhrzeigersinn polarisiert, nennt man diese auch rechtshändig polarisiert (engl. right hand circularly polarized) oder auch RHCP. Ist die Welle gegen den Uhrzeigersinn polarisiert, ist von einer linkshändig polarisierten Welle (engl. left hand circularly polarized) oder LHCP die Rede.[16]

2.7 Rauschen

In jedem System tritt neben dem gewünschten Nutzsignal $s(t)$ zusätzlich noch Rauschen auf. Einfach gesagt ist Rauschen eine unerwünschte Form an Energie, welches das Nutzsignal $s(t)$ überlagert und das Übertragen, Empfangen stört und die Weiterverarbeitung des Signals $s(t)$ erschwert.

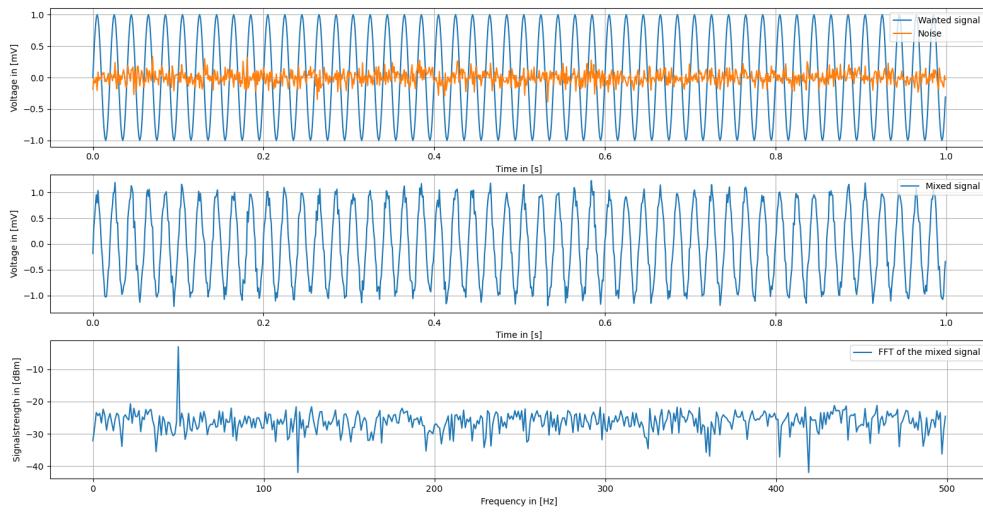


Abbildung 9: Ein von Rauschen überlagertes Signal $s(t)$ mit einer Frequenz von 50 Hz im Zeit- und Frequenzbereich

Genauer betrachtet handelt es sich beim Rauschen um einen stochastischen Prozess. Das bedeutet, dass der Verlauf des Rauschens nicht periodisch und zufällig ist und keine brauchbaren Informationen enthält.[23]

Bei der Planung und Entwicklung von Kommunikationssystemen spielt das Rauschen eine wichtige Rolle. Damit das Nutzsignal $s(t)$ problemlos gesendet, übertragen, empfangen oder verarbeitet werden kann muss zwischen der Leistung P_{Signal} des Nutzsignals $s(t)$ und der Leistung P_{Rausch} einer gewisser Abstand eingehalten werden. Diesen Abstand zwischen der Rauschleistung P_{Rausch} und der Leistung P_{Signal} des Nutzsignals $s(t)$ oder das Verhältnis der beiden Leistungen zueinander nennt man Signal-zu-Rausch-Abstand (engl. Signal-to-Noise-Ratio) oder kurz SNR.

$$SNR = \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rausch}}} = \frac{S}{N} \quad (15)$$

Das SNR kann auch logarithmisch in dB angeben werden.

$$SNR_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rausch}}} \right) = S_{\text{dB}} - N_{\text{dB}} \quad (16)$$

Das SNR ist ein MaSS für die Qualität des Nutzsignals $s(t)$. Auch wenn die Rauschleistung N im Vergleich zur Leistung S des Nutzsignals $s(t)$ in den meisten Fällen sehr gering ist, ist diese letztendlich der limitierende Faktor in einem Kommunikationssystems. Um zum Beispiel ein problemloses Empfangen und die anschließende Weiterverarbeitung des Nutzsignals $s(t)$ zu gewährleisten muss dafür das Nutzsignal $s(t)$ gut vom Rauschen unterscheidbar sein. Mit steigendem SNR steigt auch der Abstand zwischen dem Signal $s(t)$ und dem Rauschen. Je größer das SNR ist, desto besser kann das Nutzsignal $s(t)$ vom Rauschen unterschieden werden. Im unteren Plot der Abbildung 9 ist das Frequenzspektrum zu sehen. Das Nutzsignal $s(t)$ hat einen Abstand von ca. 20 dB zum Rauschen und kann daher gut vom Rauschen unterschieden werden.

Sinkt das SNR, so sinkt auch der Abstand zwischen dem Nutzsignal $s(t)$ und dem Rauschen. Wird das SNR zu gering kann das Signal $s(t)$ nicht mehr zuverlässig vom Rauschen

unterschieden werden.

In Abbildung 10 ist ein Beispiel für ein sehr niedriges SNR dargestellt. Das Rauschen überlagert das Signal $s(t)$ fast vollständig und es kann nicht mehr einwandfrei vom Rauschen unterschieden werden.

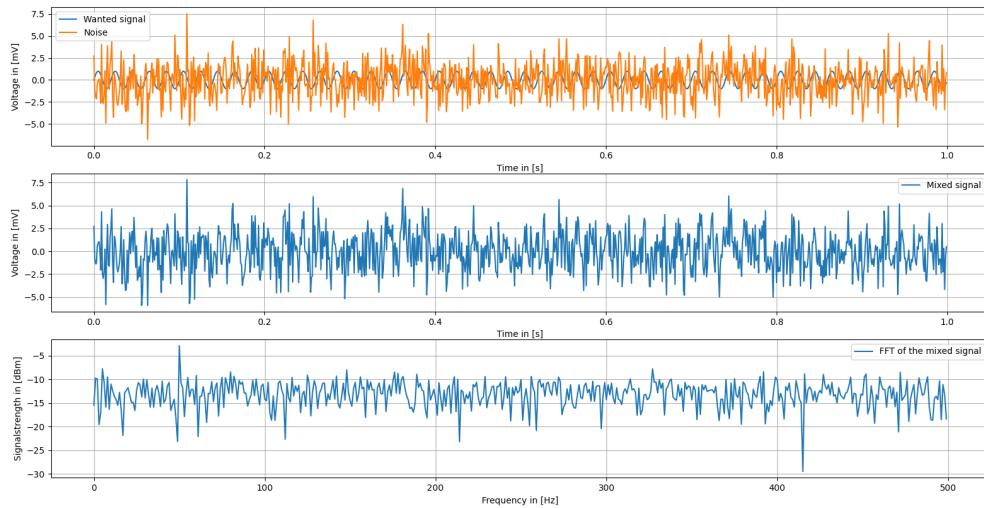


Abbildung 10: Das Signal $s(t)$ verschwindet im Rauschen

In Fällen von Signalen mit digitalen Modulationen steigt mit sinkendem SNR die Bitfehlerrate (engl. Bit-Error-Rate), auch BER genannt. Je kleiner also das SNR wird, desto mehr Bitfehler treten auf und erschweren die Kommunikation.

-> Quelle für BER finden und passende Grafik.

Die Verteilung der Rauschleistung N über das Frequenzspektrum wird mit dem Leistungsdichtespektrum $S_N(f)$ angegeben.

$$S_N(f) = \frac{N}{2 \cdot B} = \frac{k \cdot T}{2} = \frac{n_0}{2} \quad (17)$$

Die Einheit des Leistungsdichtespektrum ist W/Hz. Herleiten lässt sich das Leistungsdichtespektrum mithilfe der Fouriertransformation aus der Autokorrelationsfunktion (AKF) und einer Normallast von 1Ω .[24]

2.8 Arten und Quellen von Rauschen

Rauschen kann sehr vielfältig sein. Es gibt verschiedene Arten von Rauschen, welche in unterschiedlichen Bereich auftreten und auch unterschiedliche Rauschquellen aufweisen. Hauptsächlich kann zwischen internen und externen Rauschquellen unterschieden werden, wobei diese sich wieder auf künstliche oder natürliche Rauschquellen aufteilen lassen. Zu den internen Rauschquellen gehören unter anderem thermisches Rauschen, Schrottrauschen und $1/f$ -Rauschen. Zu externen Rauschquellen gehören Atmosphärisches- und Industrielles Rauschen und Hintergrundrauschen, welche in Form der Antennentemperatur ausgedrückt werden können.

Thermisches Rauschen (Thermal Noise)

Alle Metalle und elektrische Bauteile, wie Widerstände und Halbleiter, erzeugen ab einer Temperatur $T > 0\text{K}$ eigenständig eine Rauschenergie. Dieses Rauschen wird auch als thermisches oder GauSSsches Rauschen bezeichnet.

Zurückführen lässt sich das thermische Rauschen auf die zufällige Bewegung von Elektronen und Löchern innerhalb der Metalle und elektrischen Bauteile. Bei einer Temperatur $T = 0\text{K}$ stehen alle Ladungsträger und es wird damit auch kein Rauschen generiert. Ab einer Temperatur $T > 0\text{K}$ fangen sich die Ladungsträger an in zufällige Richtungen zu Bewegen, was zum Rauschen führt.[23]

-> Grafik einbinden

An den Anschlüssen eines Widerstandes oder einer anderen beliebigen Impedanz liegt aufgrund der Bewegung der Ladungsträger eine gewisse Spannung U_{Rausch} an.[23] Das Rauschen kann als ein Signal $n(t)$ angesehen werden dessen Spannung U_{Rausch} im Mittelwert.

$$\bar{U}_{\text{Rausch}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(t) dt = 0 \quad (18)$$

entspricht. Über den quadratischen Mittelwert oder Niquist-Gleichung allerdings lässt sich der Effektivwert der Spannung ermitteln.[24]

$$U_{\text{Rausch,eff}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R} \quad (19)$$

Über den Effektivwert $U_{\text{Rausch,eff}}$ der Spannung , welche auch Niquistgleichung genannt wird, lässt sich die Leistung des Rauschens ermitteln

$$N_T = P_{\text{Rausch}} = \frac{U_{\text{Rausch,eff}}^2}{4R} = \frac{4R \cdot T \cdot B}{4R} = k \cdot T \cdot B \quad (20)$$

Die Leistung des thermischen Rauschen N_T ist letztendlich unabhängig von dem Widerstand R und nur noch abhängig von der Boltzmannkonstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$, der Temperatur T und der gewählten Bandbreite B .[23][24]

Die Gleichung 20 kann auf verschiedene Zweitore angewendet werden, um zum Beispiel das Rauschen am Ausgang eines LNA zu bestimmen. Die Temperatur T wird dabei durch die äquivalente Rauschtemperatur T_e ersetzt.[23]

Die Leistung des thermischen Rauschen ist unabhängig von der Frequenz f und ist gleichmäßig über das gesamte Frequenzspektrum verteilt. Somit ist das Leistungsdichtespektrum $S_N(f)$ des thermischen Rauschens konstant. Damit handelt es sich beim thermischen Rauschen um sogenanntes weiSSes Rauschen[24] Die thermische Rauschleistung N_T in einem System steigt mit der gewählten Bandbreite B .

Schrotrauschen (Shot Noise)

Erwähnt wird das Schrotrauschen erstmals von Schottky im Jahre 1918, weshalb es auch Schottky-Rauschen genannt wird. Auftreten tut das Schrotrauschen in Halbleiterbauelementen, wie z.B. Dioden, zusätzlich zum thermischen Rauschen.[23]

Seinen Ursprung hat das Schrotrauschen in der zufälligen Bewegung von Ladungsträgern zwischen dem Leitungs- und Valenzband. Die damit verbundene Fluktuation von Energie erzeugt das Rauschen. Der energetische Abstand zwischen den beiden Bändern wird Potentialschwelle genannt.[23]

-> Bild einfügen von den Bändern und der Potentialschwelle

In einem Halbleiter erfolgt der Transport von Energie durch gequantele Ladungsträger statt. Bei gequantelten Ladungsträgern handelt es sich um Teilchen, wie Elektronen oder Löcher, deren Ladung der elementar Ladung $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ As oder ein vielfaches davon entspricht.[23][25]

Das Schrotrauschen ist proportional zum mittleren flieSSenden Strom in dem jeweiligen Halbleiter. Da sich der mittlere flieSSende Strom je nach Halbleiter und Anwendung unterscheidet, muss das Schrotrauschen immer individuell betrachtet werden.[23][24]

->Vielleicht Beispiel anhand einer Schottkydiode

1/f-Rauschen (Flicker Noise)

Eine weitere Rauschquelle in einem Halbleiter geht vom 1/f-Rauschen (engl. Flicker Noise) aus. Beim 1/f-Rauschen handelt es sich um sogenanntes pinkes Rauschen.[26] Anders als beim weiSSen Rauschen, wie z.B. thermisches Rauschen, was eine gleichbleibende Leistungsdichte über das gesamte Frequenzspektrum aufweist, nimmt beim pinken Rauschen mit steigender Frequenz f die Leistungsdichte ab.[26]

->Graphen von 1/f-Rauschen einfügen

Daher stammt auch der Name 1/f-Rauschen. Die Leistungsdichte des 1/f-Rauschen dominiert im niedrigen Frequenzbereich bis zu einer Grenzfrequenz f_c gegenüber der Leistungsdichte des thermischen Rauschen. Ab der Grenzfrequenz f_c geht das 1/f-Rauschen im thermischen Rauschen unter.[24] [23]

Die Leistungsdichte und die Grenzfrequenz f_c des 1/f-Rauschen unterscheiden sich je nach Halbleitermaterial, z.B. Germanium und Silizium, und Bauelement, wie z.B. Diode oder MOSFET. Im Falle von Bipolartransistoren dominiert das 1/f-Rauschen bis zu einer Grenzfrequenz $0.1 \text{ Hz} \leq f_c \leq 1 \text{ kHz}$. Bei MOSFETs kann das 1/f-Rauschen in einigen Fällen bis zu einer Grenzfrequenz $f_c = 10 \text{ MHz}$ das thermischen Rauschen dominieren.[23] Eine genaue Erklärung für das 1/f-Rauschen gibt es nicht.[23] Es gibt aber verschiedene Theorien zur Entstehung des 1/f-Rauschen. Eine einfache Theorie besagt, dass ein Transistor in tiefen Frequenzen mit dem Rauschen mit einer Verstärkung $G = \frac{1}{f}$ verstärkt und so das Grundrauschen anhebt.[23] Eine weitere Theorie ist, dass das 1/f-Rauschen aus der zufälligen Bewegung der Ladungsträger und damit verbundenen Fluktuation von Energie und Änderung der Ladungsträgerkonzentration hervorgeht. Diese Fluktuationen entstehen durch Defekte in der Gitterstruktur des Halbleiters. Diese Defekte treten überwiegend an der Oberfläche des Halbleiters, auch Interface genannt, auf. Die Ladungsträger werden von diesen Defekten "gefangen" oder "freigelassen" (engl. trapping and detrapping). Dieser Vorgang soll zum Rauschen führen.[26][24]

Auch wenn das 1/f-Rauschen nur niedrigen Frequenzbereich auftrifft, muss es auch für Anwendungen in höheren Frequenzbereichen berücksichtigt werden. Durch die nichtlineare Eigenschaften von nichtlinearen Bauteilen, wie z.B. Dioden, welche auch in einem Mischer eingesetzt werden um Signale in verschiedene Frequenzbereiche umzusetzen, kann auch das Rauschen durch den Prozess der Frequenzumsetzung in höheren Frequenzbereiche umgesetzt werden und den Rauschpegel anheben.[23]

Antennentemperatur

Äquivalente Rauschtemperatur

Bei der äquivalenten Rauschtemperatur T_e handelt es sich nicht um eine physikalische Temperatur sonder um eine rein fiktive Temperatur, welche als RechengröSSe verwendet wird.

Mit den bisherigen Erkenntnissen lässt sich schlussfolgern, das jedes Bauteil, egal ob Widerstand oder Halbleiter, rauscht. Auf Bauteilebene kann das Rauschen in seinen einzelnen Formen mit thermischen Rauschen, 1/f-Rauschen, Schrotrauschen, etc. beschrieben werden. In komplexeren Schaltungen kann die Beschreibung des Rausches in all seinen verschiedenen Formen sehr aufwendig werden. Mithilfe einer äquivalente Rauschtemperatur T_e lässt sich das Rauschen eines einzelnen Bauteils, Zweitores oder ganzen Systemen in einer Erhöhung der Temperatur ausdrücken.

-> Grafik einfügen

Die Gleichung ?? zeigt ein Beispiel für die äquivalente Rauschtemperatur T_e . Am Eingang des Zweitors liegt die Rauschleistung N_i an. Diese geht von einer angepassten Rauschquelle, wie ein Widerstand, aus und entspricht dem thermischen Rauschen. Das zusätzlichen Rauschen des Zweitors wird in der Rauschleistung N_0 an dessen Ausgang durch die Addition einer fiktiven Erhöhung der Temperatur T_e berücksichtigt.[24]

$$N = k \cdot T_f \cdot B = k \cdot (T_e + T_0) \cdot B \cdot G \quad (21)$$

Bei dieser virtuellen Erhöhung der Temperatur handelt es um die äquivalente Rauschtemperatur T_e . Diese entspricht genau der Erhöhung der Temperatur, damit das Zweitort rechnerisch genau die Rauschleistung N_0 am Ausgang erzeugt, wie sie auch am Ausgang bei der tatsächlich Temperatur T_0 anliegt. Es wird die gleiche Gleichung wie für das thermische Rauschen verwendet. Ebenfalls wird auch die Verstärkung des Zweitores in der Gleichung berücksichtigt.[24] Die äquivalente Rauschtemperatur T_e kann umgekehrt auch aus der Rauschleistung N_0 am Ausgang des Zweitores gewonnen werden.

$$T_e = \frac{N_0}{k \cdot B \cdot G} - T_0 \quad (22)$$

Die äquivalente Rauschtemperatur T_e ist immer gröSSer als die eigentliche Temperatur T_0 , da es neben dem thermischen Rauschen auch alle weiteren Rauschquellen, wie 1/f-Rauschen und Schrotrauschen, berücksichtigt.[24]

3 Theoretische Betrachtung der Empfangskette

3.1 Darstellung des Downlinks

Beim Downlink handelt es sich um eine Datenverbindung zwischen einem Satelliten und einer Bodenstation, wobei der Datenaustausch von Satellit in Richtung der Bodenstation stattfindet.

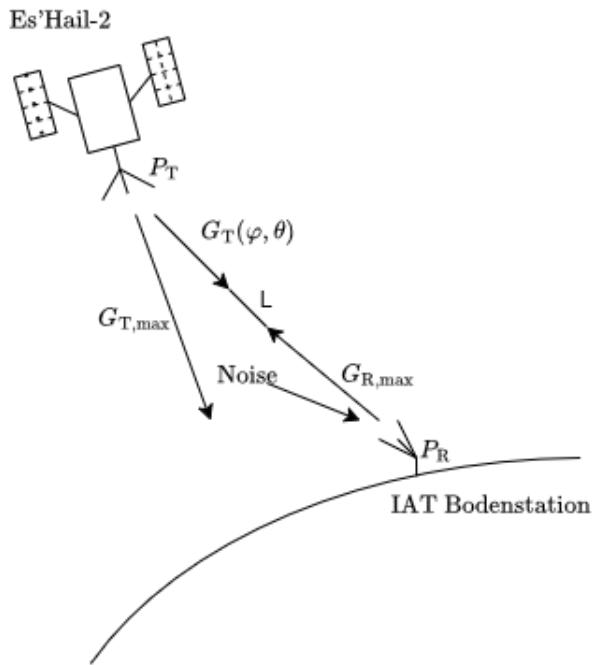


Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung des Downlinks

Die Abbildung 11 zeigt die vereinfachte Darstellung des Downlinks zwischen dem Schmallbandtransponder auf dem geostationären Satelliten Es'Hail-2 und der Bodenstation am IAT. Einteilen lässt sich der Downlink in drei kleinere Bereiche.

Den ersten Bereich des Downlinks bildet der Sender, welche in diesem Fall der Schmallbandtransponder auf Es'Hail-2. Der Satellit sendet die Informationstragenden Signale $s(t)$ mit der Sendeleistung P_T über eine Antenne mit dem Gewinn $G_T(\varphi, \theta)$ in Richtung Erde. Zusammen mit der Gleichung ??

Das EIRP unterscheidet sich je nach Region auf der Erde, da sich der Gewinn $G_T(\varphi, \theta)$ der Sendeantenne abhängig vom Abstrahlwinkel ist.

4 Praktischer Aufbau der Empfangskette

4.1 Ausrichten der Antenne

Um die Antenne auf den Satelliten ausrichten zu können, muss dessen Position bekannt und durch geeignetes Koordinatensystem beschrieben sein. Dafür werden sogenannte astronomische Koordinatensystem verwendet, wovon es mehrere verschiedene gibt. Diese unterscheiden sich dabei in ihrem Ursprung und in der Ermittlung der Koordinaten.

Gängige Systeme sind dabei:

- Horizontales Koordinatensystem: Beim horizontalen Koordinatensystem wird die Position eines Himmelskörpers, einen Satelliten in diesem Fall, im Bezug auf einen Beobachter auf der Erde beschrieben. Es werden dabei zwei Hauptkoordinate, den Höhenwinkel ε (Elevation) und der Kurs φ (Azimut), verwendet.[27][6]
- Äquatoriales Koordinatensystem: Anders als bei horizontalen Koordinatensystem wird die Position des Satelliten beim äquatorialen Koordinatensystem im Bezug auf

den Himmelsäquator beschrieben. Die beiden verwendeten Hauptkoordinaten sind die Deklination Dec und Rektaszension RAC.[27]

- Eqliptisches Koordinatensystem: Im ekliptikalen Koordinatensystem wird die Position eines Satelliten im Bezug auf die Ekliptik angegeben. Bei der Ekliptik handelt es sich um die scheinbare Bahn oder Bewegung der Sonne, welche sich laufe eines Jahres am Himmel der Erde abzeichnet. Das Koordinatensystem verwendet dafür die beiden Hauptkoordinaten ekliptikale Länge und ekliptikale Breite.[27]-> Quelle für Ekliptik finden

Zum Ausrichten von Antennen auf Satelliten kann am besten das horizontale Koordinatensystem verwendet werden, da es die Postion des Satelliten aus dem Punkt des Beobachters beschreibt.

5 Anhang

5.1 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] A. K. Maini und V. Agrawal, *Satellite Technology: Principles and applications*. Wiley, 2014, ISBN: 9781118636473.
- [2] F. Schimkowski, *Eine Zeitenwende der Spionagegeschichte: Vor 60 Jahren Startete sputnik 1 als Erster Satellit ins all*, März 2021. Adresse: <https://www.deutsches-spionagemuseum.de/2017/10/04/eine-zeitenwende-der-spionagegeschichte-vor-60-jahren-startete-sputnik-1>.
- [3] A. A. Siddiqi, *Sputnik 1 Vor Dem start*. Adresse: <https://www.dlr.de/de/next/multimedia/eine-kurze-geschichte-der-raumfahrt/sputnik-1-vor-dem-start>.
- [4] S. A. Loff, *Explorer 1 overview*, Aug. 2023. Adresse: <https://www.nasa.gov/history/explorer-1-overview/>.
- [5] Adresse: https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/wettersatelliten/wettersatelliten_node.html.
- [6] H. Dodel und S. Eberle, *Satellitenkommunikation*. Springer-Verlag, 2007, ISBN: 9783540295761.
- [7] Kategorien mehrere Satellitenkonstellationen. Adresse: <https://www.n2yo.com/satellites/>.
- [8] AMSAT-DL. Adresse: <https://amsat-dl.org/wer-sind-wir/>.
- [9] P. GÜLZOW, *Eshail-2 / AMSAT Phase 4-A / Qatar-OSCAR 100*. Adresse: <https://amsat-dl.org/en/eshail-2-amsat-phase-4-a/>.
- [10] Abdeckungsbereich von Es'Hail-2/QO-100. Adresse: <https://www.n2yo.com/?s=43700>.

- [11] admin, *Creating a linear transponder with an RTL-SDR, hackrf and Raspberry Pi*, Mai 2018. Adresse: <https://www.rtl-sdr.com/creating-a-linear-transponder-with-an-rtl-sdr-hackrf-and-raspberry-pi/>.
- [12] Bandplan des Schmallbandtransponder. Adresse: <https://amsat-dl.org/wp-content/uploads/2020/02/AMSAT-QO-100-NB-Transponder-Bandplan-Graph-1140x641.png>.
- [13] K. Barker, *Getting started 5.PDF*. Adresse: <https://www.amsat.org/wordpress/xtra/Getting%20Started%205.pdf>.
- [14] Allgemeiner Frequenzplan der Bundesnetzagentur. Adresse: https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/20210114_frequenzplan.pdf.
- [15] „IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas,“ Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), New York, NY, USA, Standard Std 145-1993, 1993, Zugriff am 13.10.2025. Adresse: https://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/IEEEStandard_AntennaTerms.pdf (besucht am 13. 10. 2025).
- [16] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*. Wiley, 2005, ISBN: 0-471-66782-X.
- [17] C. Wolf. „Nahfeld/Fernfeld.“ Zugriff am 15.10.2025. (2025), Adresse: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an60.de.html> (besucht am 15. 10. 2025).
- [18] C. Wolf. „Antennendiagramm.“ Zugriff am 15.10.2025. (2025), Adresse: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antennendiagramm.de.html> (besucht am 15. 10. 2025).
- [19] Christian Wolf. „Äquivalente Strahlungsleistung (EIRP).“ Zugriff am 21.10.2025. (2025), Adresse: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx57.de.html> (besucht am 21. 10. 2025).
- [20] Studyflix. „Wellentypen.“ (2025), Adresse: <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/transversalwelle-6799> (besucht am 30. 11. 2025).
- [21] D. derivative work by RJB1. „Circularly Polarized Light and Linearly Polarized Light Comparison.“ (2010), Adresse: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12101095> (besucht am 01. 12. 2025).
- [22] Averse. „Zirkulare Polarisierung: Auslenkung (z. B. einer Seilwelle) in x- und y-Richtung (in Ausbreitungsrichtung beträgt sie Null) in Abhängigkeit von der Zeit und von der z-Komponente des Ortes. Rot und blau die Komponenten der Auslenkung, schwarz die 3D-Ansicht. Der Pfeil illustriert den umlaufenden Auslenkungsvektor für einen Raumpunkt.“ (2007), Adresse: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4849061> (besucht am 01. 12. 2025).
- [23] H. HEUERMANN, *Hochfrequenztechnik: Komponenten Fr High-Speed und Hochfrequenzschaltungen*. Springer Fachmedien Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg, 2018, ISBN: alt: 978-3-658-23197-2 neu:978-3-658-37825-7.
- [24] A. Thiede, *Integrierte Hochfrequenzschaltkreise: Grundlagen des Computergestützten Entwurfs*. Springer Fachmedien Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg, 2013, ISBN: 978-3-8348-1246-9.

- [25] LEIFIphysik. „Elementarladung.“ Zugriff am 10.11.2025. (2025), Adresse: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ladungen-elektrisches-feld/grundwissen/elementarladung> (besucht am 10.11.2025).
- [26] L. Instruments. „Understanding 1/f noise (flicker noise).“ Zugriff am 11.11.2025. (2025), Adresse: <https://liquidinstruments.com/blog/understanding-1-f-noise-flicker-noise/>.
- [27] I. Vito Technology, *Himmlische Koordinaten: Ultimativer Leitfaden*, Juli 2023. Adresse: <https://starwalk.space/de/news/celestial-coordinates>.

5.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1	Das Bild zeigt den ersten Satelliten Sputnik 1 vor dem Start. Sputnik 1 ist eine Aluminiumkugel mit einem Durchmesser 0.58 m und einem Gewicht von 58 kg.[2][3]	1
2	Vorführung des ersten amerikanischen Satelliten Explorer 1[4]	2
3	Die verschiedenen Umlaufbahnen im Überblick [6]	4
4	Abdeckungsbereich der Amateurfunktranponder von Es'Hail-2[10]	5
5	Von AMSAT freigegebener Bandplan für den Schmallbandtransponder von QO-100[12]	6
6	Ein Beispiel für ein horizontales Antennendiagramm im Polarkoordinatensystem[18]	9
7	Arten an linearen Polarisationen[21]	14
8	Zusammensetzung einer zirkularen Polarisation[22]	15
9	Ein von Rauschen überlagertes Signal s(t) mit einer Frequenz von 50 Hz im Zeit- und Frequenzbereich	16
10	Das Signal s(t) verschwindet im Rauschen	17
11	Vereinfachte Darstellung des Downlinks	21

5.3 Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis