

Vom Hertz zum Chirp

Zen and the black art of antenna and how to impress chicks at the bar

Ein Crash – Kurs über Hochfrequenztechnik

©Robert Schmidt 2026 (Text)

Einführung

Die Ausführungen sind für Personen gedacht, die mit der Funktechnik wenig vertraut sind. Die Informationen können einen guten Überblick geben und sollen einen Einstieg in die HF-Übertragungstechnik, insbesondere für Meshtastic, ermöglichen.

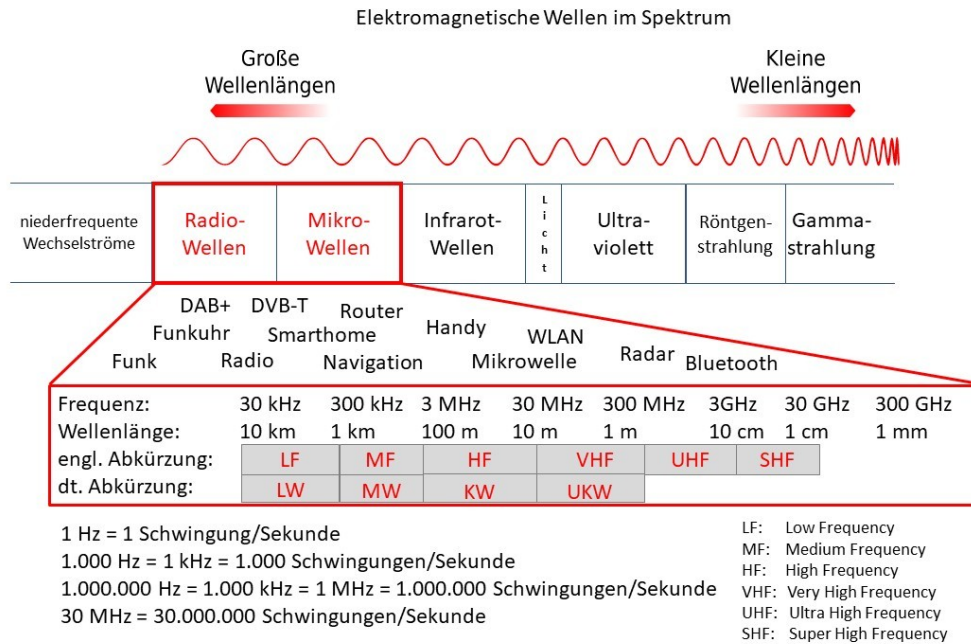
Die Bilder stammen aus verschiedenen Quellen im Internet und unterliegen u.U. Lizenzbedingungen, daher ist die Schrift nur für den internen Gebrauch und nicht zur Veröffentlichung bestimmt!

Funkfrequenzen

Frequenz

Frequenz ist die Anzahl der Schwingungen, z.B. einer elektrischen Spannung, pro Sekunde. Die Einheit ist das Hertz [1/s].

Beispiele: Netzfrequenz 50Hz, Eisenbahnnetz $16 \frac{2}{3}$ Hz, UKW Radio 100MHz.



Das Radiospektrum unterliegt gesetzlichen Bestimmungen.

Rundfunk

In diesen Frequenzbändern werden öffentliche Rundfunksendungen übertragen.

UKW-Rundfunk 88MHz-104MHz

Fernsehsatellit ca. 11GHz

Nur Empfang (für Bevölkerung).

Kommerziell

LTE Mobilfunk: 800/900/1500/1800/2100/2600MHz

BSO Nutzung

380-400MHz TETRA

Flugfunk, Seefunk etc.

Militärische Frequenzbänder

80MHz Bereich, Flugfunk, etc.

Lizenzfreie Frequenzen, ISM

Einige, wenige Frequenzbereiche sind für allgemeine Verwendung (ISM, Industrie/Science/Medicine) freigegeben. Diese werden z.B. für Garagentore etc. verwendet.

WIFI 2,4GHz und 5 (5,8)GHz

Bluetooth 2,4GHz

PMR 446 Funkgeräte (aus dem Bauhaus) 446MHz

LoRa Meshtastic verwendet 440MHz, 868MHz, 915MHz (USA)

CB-Funk

Für die öffentliche Verwendung unter gewissen Bedingungen freigegeben

27 MHz Bereich

Amateurfunk

Erfordert Amateurfunklizenz (Prüfung)

3-30MHz, 145MHz, 440MHz, 1200MHz Bereiche

Funkamateure dürfen Sender selbst bauen.

Wie funktionieren Antennen

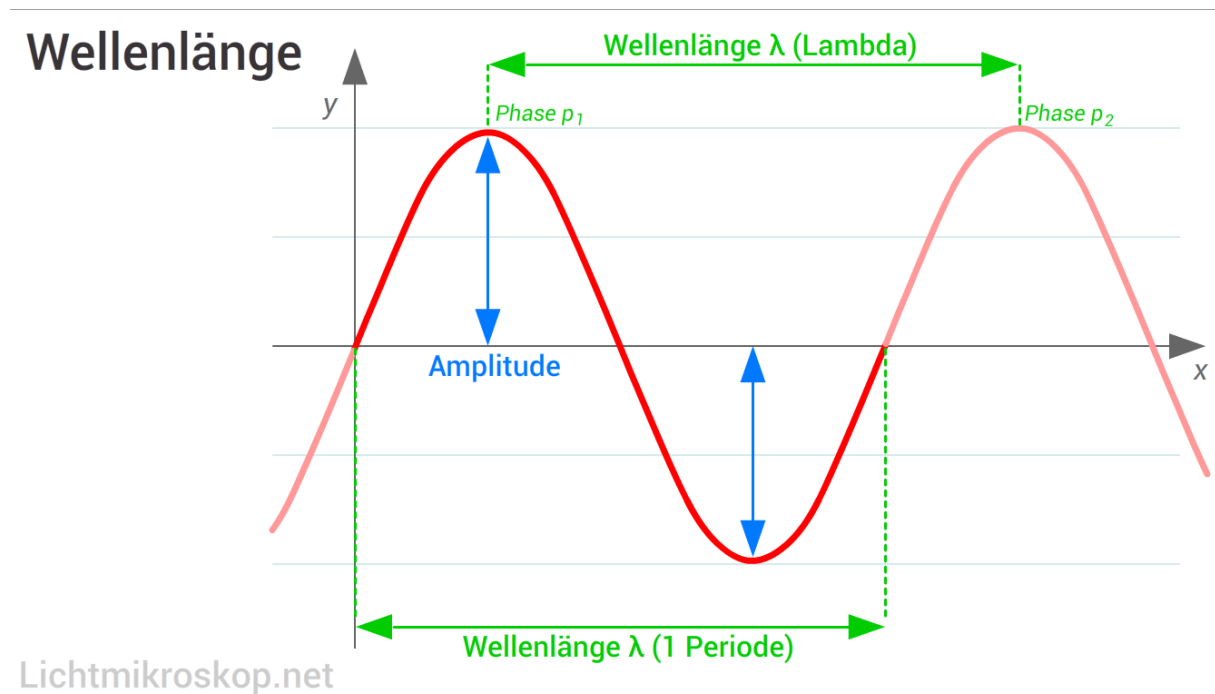
Leitungstheorie, Wellenlänge

Im Gleichstromkreis bewegen sich die ladungstragenden Elektronen immer in dieselbe Richtung (von - nach + ☺). Im Wechselstromkreis mit niedriger Frequenz und vergleichsweise kurzen Leitern kann man diese Vorstellung einfach anpassen, indem man sich vorstellt, dass die Polung ständig umgedreht wird.

Wird jedoch dieses Umdrehen schneller und kommt in gewisse Größenordnungen, so schickt die Wechselspannungsquelle Energie auf die Leitung, noch bevor sie am Ende angekommen ist. Dadurch ergeben sich völlig andere, örtlich abhängige Verhältnisse entlang der Leitung. Die Bewegung der Elektronen (= der Strom) findet nicht mit unendlicher Geschwindigkeit statt, sondern die Energie fließt gewissermaßen die Leitung entlang.

Wenn beispielsweise am Eingang die positive Spitzenspannung anliegt und die Spitzenspannung der vorherigen Periode am Ende der Leitung angekommen ist, dann bezeichnet man den Abstand zwischen Eingang und Ausgang der Leitung als Wellenlänge. Sie ist abhängig von der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium und von der Geschwindigkeit der Änderungen (der Frequenz). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit entspricht in Luft und im Vakuum der Lichtgeschwindigkeit, in anderen Materialien ist sie entsprechend niedriger. (Faktor bei Leitern z.B. 0,9).

Wellenlänge (λ , [m]) = Ausbreitungsgeschwindigkeit / Frequenz [Hz, 1/s]



Ablösung

Bei entsprechenden mechanischen Abmessungen der Leiter und geeigneter Frequenz tritt die Leistung aus dem Leiter in Form einer elektromagnetischen Schwingung in den Raum aus. Diese Bauformen nennt man Antennen. Die Ablösung geschieht, ähnlich wie

in einem Leiter, mit einer gewissen räumlichen Wiederkehr. Somit ergibt sich auch hier eine Wellenlänge, die von der Ausbreitungsgeschwindigkeit (in Luft = in Vakuum = 300.000.000m/s) und der Frequenz abhängt.

Der Effekt funktioniert beim Empfang umgekehrt, d.h. solche Gebilde können aus dem elektromagnetischen Feld im Raum eine Spannung erzeugen, die dann entsprechend weiterverarbeitet und ausgewertet werden kann. Sie sind also Wandler von leitungsgebundener Hochfrequenz zu Funkstrahlung.

Die Funkwelle ist genauer genommen eine elektromagnetische Welle mit elektrischem und magnetischem Feldanteil, aber das ist für unsere Betrachtungen derzeit nicht wichtig.

Das Dezibel, dB

Dezibel (dB) ist ein logarithmisches Maß für ein Verhältnis, z.B. zwischen dem Eingang einer Schaltung und dem Ausgang oder für eine Leistung im Vergleich zu einer definierten Vergleichs-Leistung. Die Einheit dB wird häufig für Leistung verwendet, ist aber auch für Spannung und Strom entsprechend definiert.

Vergleichsmaß dB

$$v_p = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_e}$$

-3dB entspricht der halben Leistung

-10dB entspricht 1/10 der Leistung

0dB Ausgangsleistung = Eingangsleistung

+3dB entspricht Verdoppelung der Leistung

+10dB entspricht 10-fache Leistung

Leistungsmaß dBm

Als Vergleichsgröße P_0 wird 1mW verwendet

$$p_p = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_0}$$

dBm	Leistung
0 dBm	1 mW
3 dBm	2 mW
6 dBm	4 mW
10 dBm	10 mW
13 dBm	20 mW
20 dBm	100 mW
23 dBm	200 mW
30 dBm	1 W
40 dBm	10 W

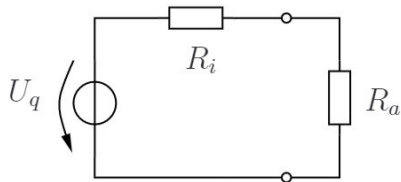
50 dBm	100 W
--------	-------

In der EU sind im 868MHz Band eine Sendeleistung von 14 dBm (ca. 25mW) bei einem Duty Cycle von 1 % erlaubt (Ausnahme 869,4–869,65 MHz-Band, hier sind 27dBm = ca. 500mW bei einem Duty Cycle von 10 % erlaubt).

Kennzahlen von Antennen

Leistungsanpassung

Jeder Oszillator (Erzeuger von HF-Schwingungen) hat einen „Innenwiderstand“ R_i . Man kann sich das so vorstellen, dass im Extremfall die Spannung bei Leerlauf (ohne Lastwiderstand) am höchsten ist, bei Kurzschluss (theoretisch) der Strom am höchsten. Dazwischen und damit in praktischen Fällen ergibt sich ein Verhältnis von Spannung zu Strom, das auch als Widerstand dargestellt werden kann.



Anpassungsbedingung: Das Maximum der Energie am Lastwiderstand R_a ergibt sich, wenn dieser gleich groß wie der Innenwiderstand R_i ist.

Wellenwiderstand

Er beschreibt den elektrischen Widerstand, den eine Leitung für eine, sich ausbreitende elektromagnetische Welle hat und wird u.a. durch Induktivitäten und Kapazitäten (und damit den Abmessungen der Leiter, Isolationsmaterial etc.) entlang der Leitung bestimmt.

In der Praxis findet man beim Funk sehr oft 50 Ohm Systeme, bei Fernsehsignalen meist 75 Ohm.

Strahlungswiderstand

Wird für den Fußpunkt (Speisepunkt) der Antenne angegeben, also dort wo sie zu strahlen beginnt. Dort gibt es ein Verhältnis von auftretender Spannung zu Strom, das auch als Widerstand ausgedrückt werden kann.

SWR

Vereinfachte Darstellung: Die Energie ist auf dem Kabel unterwegs und muss am Ende bestmöglich (z.B. von der Antenne) abgenommen werden. Im Extremfall (Leerlauf oder Kurzschluss) wird keine Energie abgenommen und die gesamte Energie wird zum Sender zurückgeführt. Dort wird sie in den Endstufentransistoren in Verlustwärme umgewandelt, was zur Zerstörung führen kann.

Daher: Kein Senden ohne angeschlossener Antenne!

Haben also nicht alle Komponenten den gleichen Wellenwiderstand, dann wird ein Teil der Leistung an diesen Stoß-Stellen reflektiert. Die meisten Komponenten (Senderausgang, Stecker, Kabel) sind heute auf einen Widerstand von 50Ω ausgelegt.

Kritisch ist diesbezüglich oft die Antenne. Auch hier muss diese Bedingung gelten. Ein Maß für diese Anpassung ist das SWR (Standing Wave Ratio). Dieses kann mit geeigneten Antennen-Analysern oder Vector-Network-Analysern gemessen werden. Der Idealwert ist 1:1, ein Wert bis zu 1:3 ist in der Praxis akzeptabel.

Impedanzanpassung

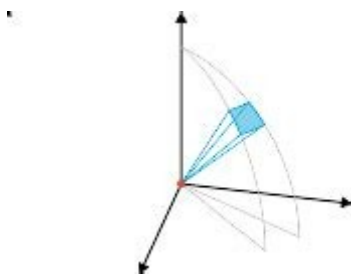
Hat die Antenne am Speisepunkt einen anderen Widerstand als das Gesamtsystem ist eine Impedanz Anpassung nötig. Das kann entweder durch einen Transformator oder durch entsprechende Antennenengeometrie erfolgen.

Zusätzlich ist dieser Widerstand ein komplexer Widerstand mit kapazitivem oder induktivem Anteil Das würde aber diese Ausführungen sprengen.

Antennengewinn

Isotroper Strahler[dBi]

In der Praxis strahlen Antennen nicht in alle Richtungen gleich gut. Um einen Vergleich unterschiedlicher Antennen zu ermöglichen, nimmt man einen idealen Strahler an, der unendlich klein ist und in alle Richtungen gleich gut abstrahlt (isotroper Strahler) und verwendet diesen als Vergleichswert.

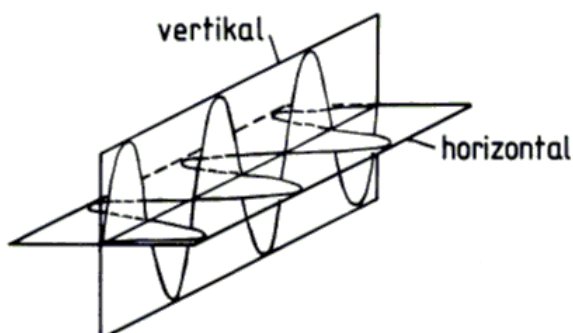


Das Maß dBi wird sehr häufig für Antennen verwendet. Ein Dipol hat z.B. 2,15dBi.

Dipol [dBd]

Das Vergleichsmaß ist der Dipol.

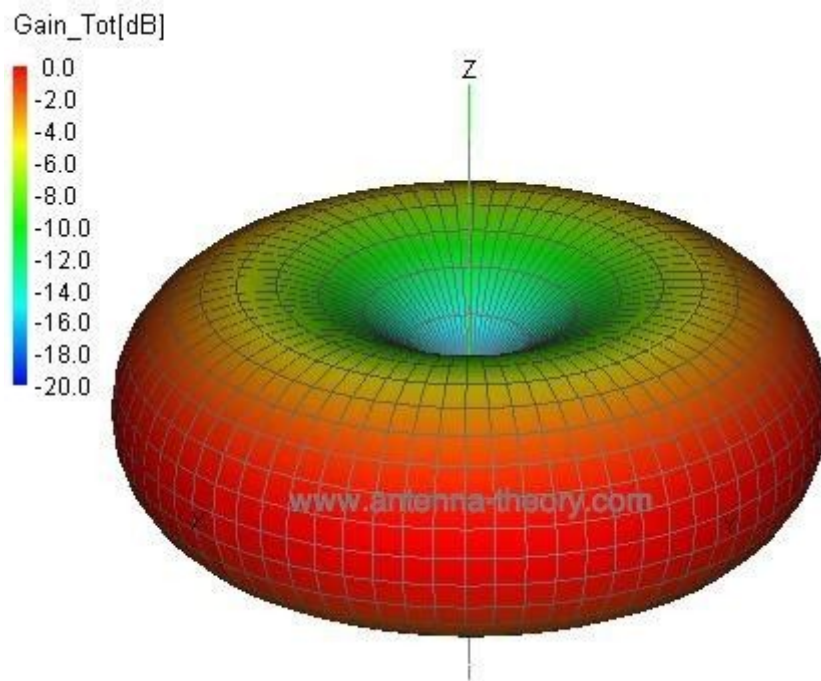
Polarisation



Wie Licht schwingen Funkwellen in verschiedenen Polarisationssebenen. (Es gibt übrigens auch zirkuläre Polarisation) Idealerweise ist diese beim Sender und Empfänger ident. Ist der Sender horizontal polarisiert und der Empfänger um 45 Grad versetzt, so ergibt sich ein zusätzlicher Verlust von 3dB. Bei rechtwinkliger Anordnung gibt es theoretisch keinen Empfang. In der Praxis ist der Effekt durch Reflexionen, Beugung, Streuung und Mehrwegausbreitung nicht so groß. Je höher die Frequenz, desto kritischer die Polarisationssebene. Beim Satellitenfernsehen werden z.B. horizontal und vertikal unterschiedliche Sender übertragen.

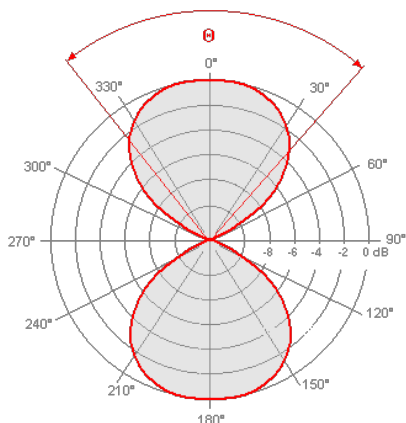
Räumliche Ausbreitung

Die räumliche Ausbreitung von Funkwellen ist sehr komplex und hängt von vielen Faktoren ab.



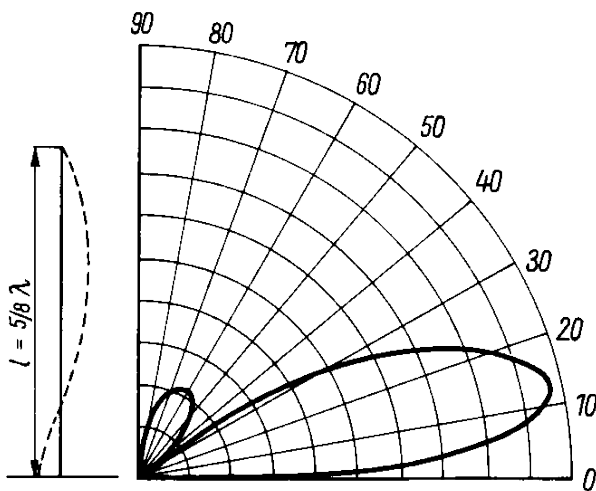
Horizontaldiagramm einer Antenne

Beschreibt die Abstrahlung in verschiedene Richtungen in horizontaler Ebene.



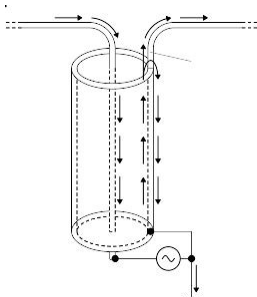
Vertikaldiagramm einer Antenne

Gibt den Anteil der Abstrahlung an, der flach oder steil nach oben gerichtet ist.



Mantelwellen

Wenn die beiden Dipoläste nicht gleich behandelt werden, also eine Asymmetrie herrscht, dann „sucht“ sich die Hochfrequenz einen Gegenpol, der oft in der Abschirmung des Antennenkabels gefunden wird. Dadurch wird aber das Kabel ein Teil des strahlenden Systems, verändert das Strahlungsdiagramm und kann die Senderendstufe zerstören oder andere Störungen verursachen.



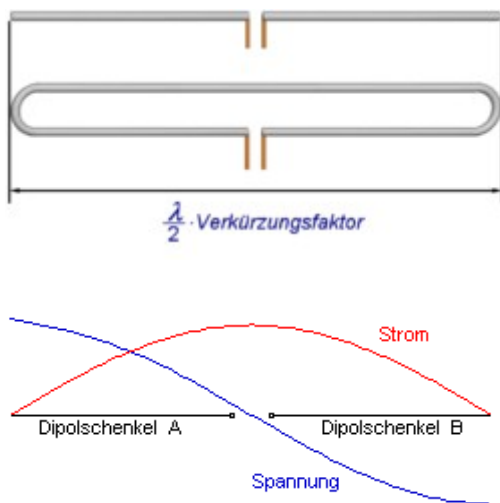
Um Mantelwellen zu vermeiden kann man z.B einen Transformator (balanced-unbalanced, Balun) oder eine „Umwegleitung“ verwenden oder diese mit einer Drossel (Spule Antennenkabel z.B 6 Windungen RG174 DM 2-3cm oder mit Ferritkern, ...) unterdrücken.



Antennenformen

Die allermeisten Antennen mit 868MHz werden durch ein 50 Ohm Kabel gespeist, müssen daher einen Fußpunktwiderstand von 50Ohm und ein niedriges SWR besitzen. Das ist insbesondere für das Senden wichtig. Jede Antennenform hat zwei Komponenten, die auch durchaus unterschiedlich gestaltet sein können (symmetrisch oder Strahler/Gegengewicht). Antennen eignen sich gleich gut zum Senden und zum Empfangen (Reziprozitätsprinzip).

Gestreckter Dipol, Faltdipol



Der Dipol ist die einfachste Antennenform

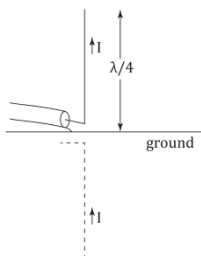
Strahlungswiderstand am Fußpunkt ca. 73 Ω (Anspeisung in der Mitte des Dipols)

Gewinn 2,15 dBi (über isotropem Strahler in Hauptstrahlungsrichtung)

Charakteristik: Breiter, flacher Donut, omnidirektional in der Ebene senkrecht zur Antenne

Bei der Ausführung als Faltdipol erhöht sich der Strahlungswiderstand auf ca. 146 Ω

Viertelwellenstrahler



Eine Strahlerhälfte wird durch eine leitende Oberfläche ersetzt (geringere Abmessungen als voller Dipol).

Strahlungswiderstand \approx 36–37 Ω (über ideal leitender Oberfläche)

Gewinn: 2–3 dBi

omnidirektional horizontal, Maximum horizontal, null nach unten

Rubber Duck Antenne, Helix Antenne



Meist stark verkürzten Strahler + helikal gewickelt (Spule), oft mit Matching-Elementen in einer flexiblen Schutzhülle
kürzer als $\lambda/4$, aber durch die Spule „elektrisch verlängert“ (Verluste!)
robust & flexibel, günstig, ideal für portable Geräte
deutlich schlechtere Reichweite als $\lambda/4$ - oder $\lambda/2$ -Antennen
Gewinn ca. -10 bis 2dBi je nach Länge und Innenleben
annähernd rundstrahlend, aber stark abhängig von Gegengewicht (Massefläche, Hand / Gehäuse, Einbaulage, ...)

Groundplane Antenne

Strahlungswiderstand 36–50 Ω , abhängig von Anzahl und Länge der Radials
(Gegengewicht)
Mit ausreichend Radials 2,15 dBi (vergleichbar mit Dipol)
Ideal: 4 Radials flach: 36–37 Ω

PCB Antenne

Die Antenne ist auf der Printplatte integriert oder extern im Gehäuse angeschlossen.
Gewinn -2 bis 2 dBi, je nach Bauform (Meander, Schmetterling, ...)

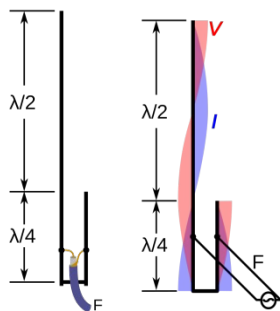


Triple Leg Ground Plane



In der professionellen Funktechnik weit verbreitet
Mit abgewinkelten Radials (45° nach unten geneigt) ergibt sich ein Strahlungswiderstand von 50 Ω.
Gewinn 2–3 dBi
Horizontale Abstrahlung ähnlich wie $\lambda/4$ Viertelwellenstrahler

J-pole Antenne



vertikaler Halbwellendipol + $\frac{1}{4} \lambda$ -Speiseleitung um den Fußpunktwiderstand auf 50 Ω (Matching-Stab) anzupassen
Gewinn ca. 2–3 dBi (vergleichbar mit $\lambda/4$ Groundplane)
omnidirektional in horizontaler Ebene
Polarisation vertikal
Länge bei 868 MHz 34–35 cm für $\lambda/2$ Strahler +ca. 17–18 cm für $\lambda/4$ Matching-Stab
Abmessungen sehr praxistauglich

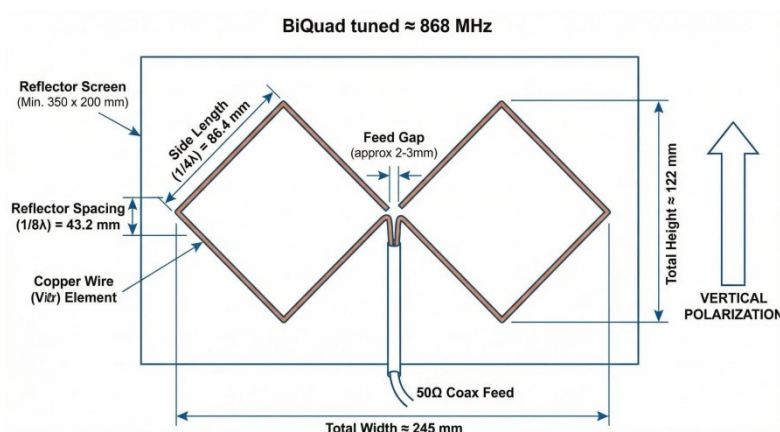
Richtantennen

Die bisher betrachteten Antennen werden in der Praxis so aufgebaut, dass sie horizontal in alle Richtungen gleich gut abstrahlen. Wird hinter einem Strahler ein Reflektor angeordnet, so addieren sich die Wellen in die Richtung nach vorne (Abstand ca. 0.2λ). So entstehen Antennen mit Richtwirkung, deren Sendeleistung bevorzugt in eine Richtung abgestrahlt wird bzw. die Signale aus einem bestimmten Raumsektor besonders gut aufnehmen können. Um die Richtwirkung noch zusätzlich zu steigern kann man vor dem strahlenden Element sogenannte Direktoren anordnen.



Ein wesentliches Qualitätskriterium für Richtantennen ist der Öffnungswinkel (-3dB zum Maximum).

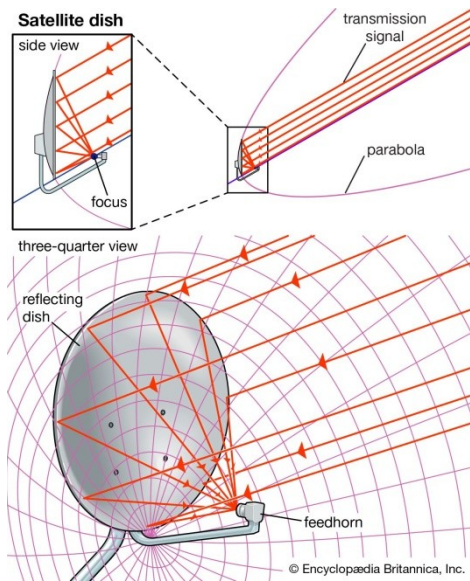
BiQuad Antenne



Besteht aus zwei Ganzwellenschleifen (d. h. Drahtlänge = Wellenlänge, λ) in quadratischer Form. Dahinter befindet sich im Abstand ein Reflektor (z.B. Metallplatte).
Flachstrahler
Impedanz 50–75 Ω (gut anpassbar)
Polarisation vertikal
Gewinn 8–11 dBi (typisch ca. 8–12 dBi)

Öffnungswinkel ca. 60–70°

Parabolantenne



Bei Parabolantennen wird ein Reflektor vor dem eigentlichen strahlenden Element (z.B. Dipol) angeordnet und so die Strahlung in eine bestimmte Richtung gebündelt. Man erreicht so eine hohe Richtwirkung.

Sat-Schüsseln sind übrigens oft als Offset-Antennen ausgeführt um optisch günstige Bauwinkel zu erreichen.

Der Gewinn variiert entsprechend den Abmessungen.

Grid Antenne

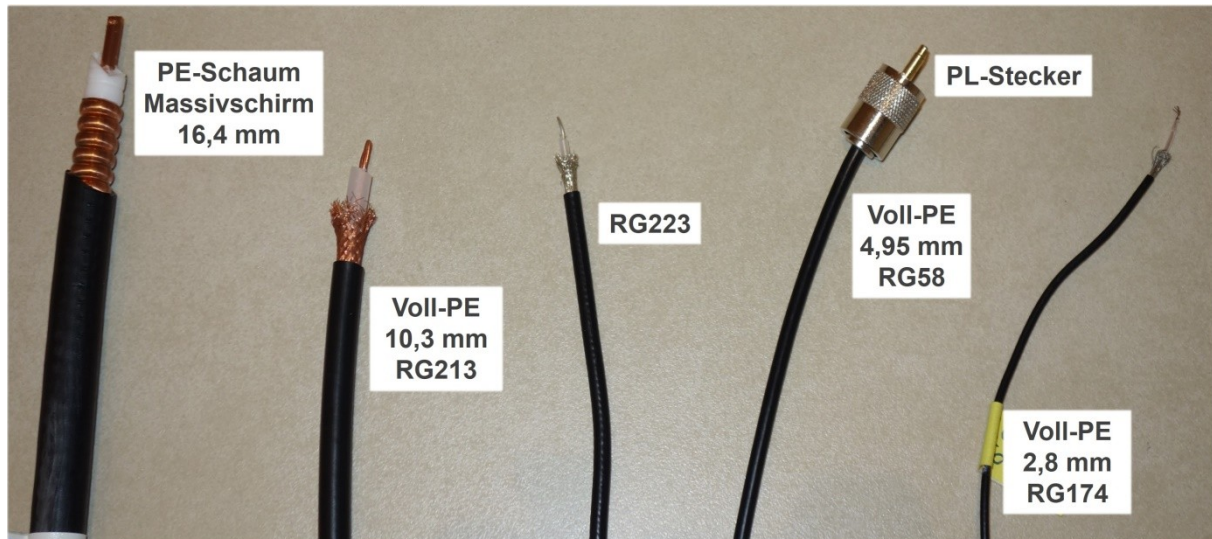


Als Reflektor wird ein Gitter verwendet, das wesentlich kleiner als die Wellenlänge sein muss. Der Gewinn variiert entsprechend den Abmessungen. Vor diesem Gitter befindet sich das strahlende Element. Vorteil: Geringere Windlast als bei Vollmaterial.

Weitere Komponenten einer Funkanlage

Kabel

Kabel unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Abmessungen, der Dämpfung bei unterschiedlichen Frequenzen (je höher die Frequenz desto höher die Verluste) und des Wellenwiderstandes (meist 50 Ohm).



Kabeltyp	Außendurchmesser	Dämpfung @ 868 MHz	Verwendung
RG174	2,8 mm	1,3-1,5 dB/m	für ≤ 1m ok (z. B. Antennen-Pigtail)
RG58	5,0 mm	0,6-0,7 dB/m	für 1-5 m akzeptabel
RG213	ca. 10,3-10,8 mm	0,22-0,25 dB/m	für > 5 m
LMR 400	10,3 mm	0.21-0.22 dB/m	modernes Kabel, wenig Verluste

Das Antennenkabel ist ein wesentlicher Bestandteil einer Funkanlage. Wird beispielsweise ein RG58 Kabel von 10m Länge verwendet, so ergibt sich in diesem bei 868MHz eine zusätzliche Dämpfung von 7dB. Das bedeutet, dass nach dem Antennenkabel nur mehr ca. 20% bis 25% der Leistung vorhanden sind!

RG174: 13-15 dB, nur mehr 3-5 % Leistung
RG58: 6-7 dB, nur mehr 20-25 % Leistung
RG213: 2,2-2,5 dB, nur mehr 55-60 % Leistung

Achtung: Es gibt auch Kabel aus der Fernsehtechnik, diese sind aber für unsere Zwecke ungeeignet (75 Ohm). Meist sind sie weiß gefärbt.

Stecker

Steckverbindungen bewirken eine zusätzlich Durchgangsdämpfung von 0,1 bis 0,3dB. Es gibt zwischen den Stecksystemen Übergangselemente, Adapter.

SMA und RP (Reverse Pole) SMA

Wird sehr häufig bei kleinen Geräten verwendet. Die sehr kleine Steckverbindung ist mechanisch empfindlich. Eine SMA - Verbindung ist nicht wasserdicht und muss für den Außenbereich zusätzlich abgedichtet werden! (z.B. selbstverklebendes Isolierband).

	SMA	RPSMA
Male		
Female		

RP-SMA wird oft bei WIFI Routern verwendet. **Achtung: Mittelstift mit Außengewinde.**

PL=UHF=SO239 Norm



Mechanisch stabil, aber Norm nicht gut definiert. Sollte nach Möglichkeit vermieden werden.

BNC



Mit Bajonett-Verriegelung. Wird oft bei Messgeräten verwendet (Oszilloskop, Antennen Analyzer, ...)

N-Norm



Hohe Qualität, kleine Übergangsdämpfung, wasserdicht und für den Außenbereich geeignet.

Platinenstecker Hirose U.FL, IPEX (MHF 1-4), MMCX, ...

U.FL to SMA-female



Der Stecker ist in SMD Technik auf der Printplatte verlötet und findet sich z.B direkt auf dem LoRa Modul und stellt die Verbindung zu einem, von außen zugänglichen, Stecker her. Nicht für mehrmaliges Stecken geeignet. Verbindung über Pigtail zu einer anderen Norm.

F-Stecker



Dieses Stecksystem stammt aus der Fernsehtechnik und hat eine Impedanz von 75 Ohm, ist daher für unsere Zwecke im Allgemeinen **nicht geeignet!** Allein der Übergang in ein 50 Ohm System bedingt schon ein SWR von 1:1,5.

Ausbreitung von Funkwellen

Funkwellen breiten sich grundsätzlich wie Lichtwellen (optische Sicht) aus. Es handelt sich ja auch um elektromagnetische Wellen, nur mit anderer Frequenz.

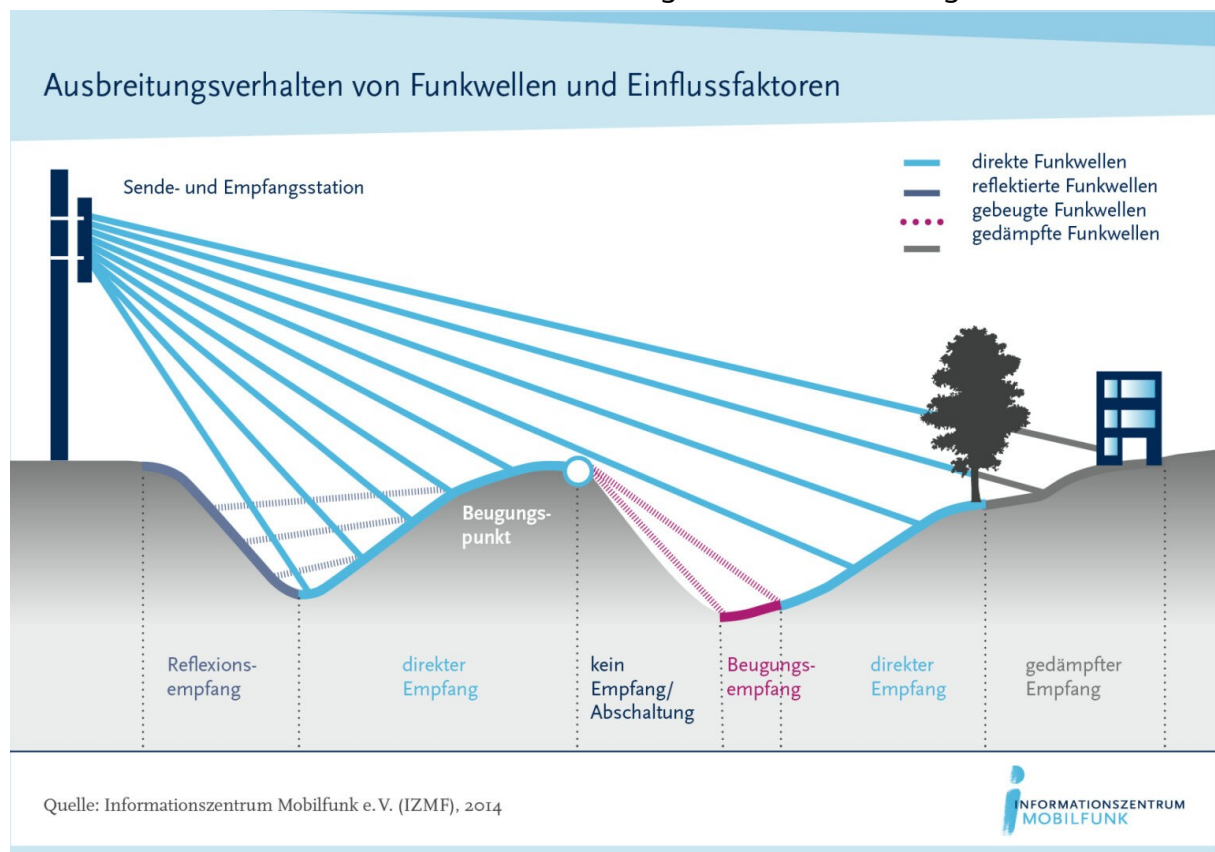
Freiraumdämpfung

Diese entsteht durch die Abnahme des Feldes mit der Entfernung zum Sender (Verteilung der Energie im Raum). Sie ist abhängig von der Entfernung und der Frequenz.

Beispiele für 868MHz:

- 10 m ca. 52 dB
- 100 m ca. 72 dB
- 1 km ca. 92 dB
- 5km ca. 105 dB
- 10km ca. 110 dB

In der Praxis sind aber sehr wesentlich auch folgende Effekte beteiligt:



Dämpfung in Materialien

Die Dämpfung hängt vom Medium ab, durch das die Funkwelle durchdringt und von der Frequenz. Je höher die Frequenz, desto höher die Dämpfung.

Beispiele für 868MHz

- Ziegelmauer 3-6dB pro Wand
- Steinmauer 10-20dB pro Wand

- Wald 0,2-1dB/m, abhängig von Blattwerk (Sommer/Winter!), Feuchtigkeit, Dichte
- Stahl-Abschirmung 40-100dB

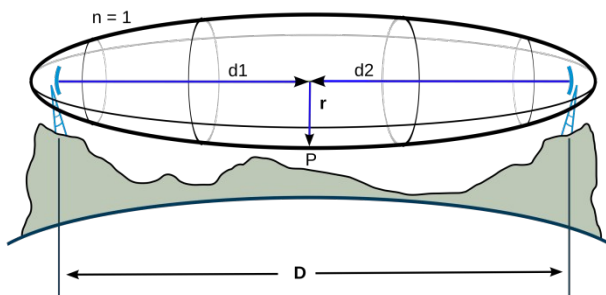
Reflexion

Funkwellen können, wie auch Lichtwellen, an geeigneten Materialien und Flächen gespiegelt und reflektiert werden. Dazu muss eine Fläche in einer Relation zur Wellenlänge vorhanden sein. Dabei entsteht, abhängig von der Leitfähigkeit und den Abmessungen der Reflexionsfläche, eine zusätzliche Dämpfung und u.U. eine Änderung der Polarisation. Auch der Boden kann eine Reflexion bewirken.

Beugung an Kanten, Streuung an Objekten

An (teilweise leitenden und ausreichend großen) Kanten ergeben sich Beugungen der Wellen und damit ein Abweichen von der linearen Ausbreitung hin zur Kante. Das hat auch Auswirkungen auf die Polarisation. An kleinen Objekten wird die Funkwelle gestreut.

Fresnell Zone



Wenn Hindernisse in diese Zone hineinragen wird ein Teil der Energie reflektiert, ein Teil gestreut und ein Teil beugungsbedingt umgelenkt. Dadurch kommt weniger Energie am Empfänger an.

Schon 20–40 % Blockierung der ersten Fresnell-Zone kann mehrere dB Verlust verursachen.

Je mehr die Fresnell-Zone blockiert ist, desto exponentiell höher ist die Dämpfung.

Der maximale Radius der Fresnell Zone beträgt beispielsweise bei 10km Abstand und 868MHz ca. 30m.

Gesamtbetrachtung einer Funkanlage

Der Begriff RSSI

Received Signal Strength Indicator

Maß für die absolute empfangene Leistung in dBm. Sagt nichts über die Brauchbarkeit eines Signals aus.

- -30 dBm: sehr starkes Signal (sehr nah)
- -70 dBm: gutes Signal
- -100 dBm: sehr schwach
- < -120 dBm: meist kein stabiler Empfang mehr

Der Begriff SNR (= S/N)

Jeder Empfänger rauscht, hörbar z.B. am Beispiel Rundfunk (Thermische Effekte, Rauschen aktiver Bauteile, Bandbreite, Antennen- und Umgebungsrauschen, Interne Störquellen, Digitale Quantisierung). Um einen Sender zu hören, muss sich das Nutzsignal aus dem Rauschen hervorheben. Das Verhältnis, bei dem ein brauchbares Signal empfangen werden kann bezeichnet man als SNR, S/N (Signal to Noise Ratio). Bei digitalen Modulationsarten ist das die minimale Leistung, bei der das Signal noch demoduliert werden kann. Diese Leistung muss also für eine brauchbare Funkverbindung beim Empfänger ankommen.

SNR beschreibt, wie viel stärker das Nutzsignal im Vergleich zum Rauschen ist und damit die Brauchbarkeit eines Signals.

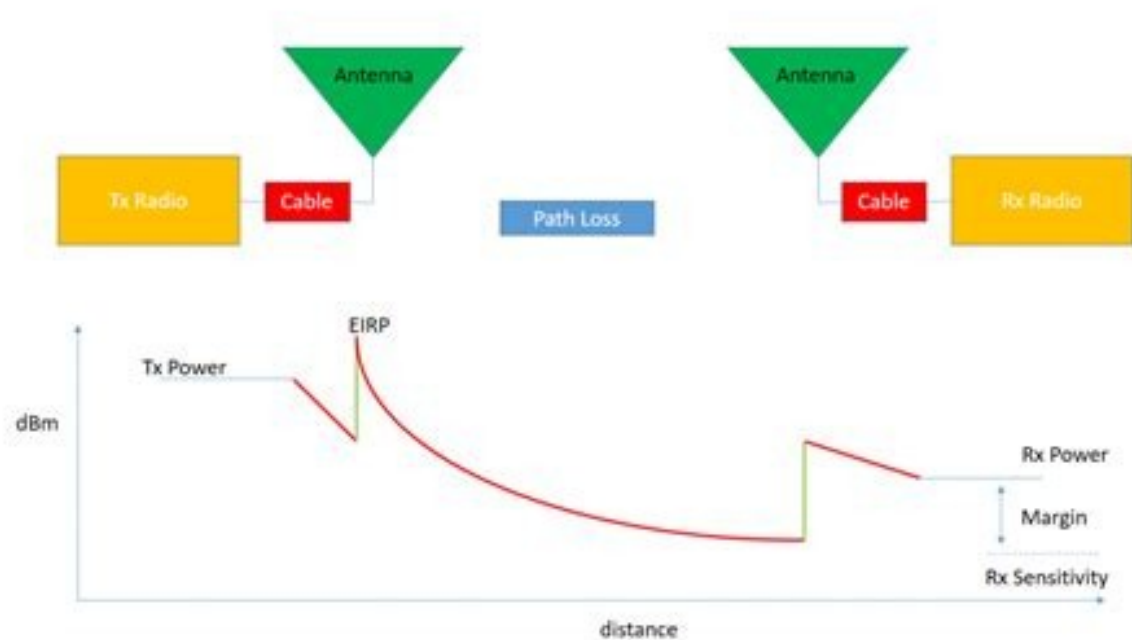
Einheit: dB

Formel (vereinfacht): $SNR = \text{Signal/Rauschen}$

- +20 dB: sehr gutes, sauberes Signal
- +10 dB: gut (Sprache noch gut verständlich)
- 0 dB: Signal = Rauschen (Sprache kaum mehr verständlich)
- -10 dB: Signal schwächer als Rauschen
- -20 dB: extrem schwach, kann aber u.U. bei LoRa noch brauchbar sein

Link Budget

Link Budget = Gewinne (Ausgangsleistung, Antennen) – Verluste (Kabel, Stecker, ...).



Zum Link-Budget zählen:

- Sendeleistung des Senders (+)
- Antennenstecker (-)
- Antennenkabel (-)
- Ggf. Antennenstecker (-)
- Fehlanpassung am Sender (-)
- Antennengewinn Sender (+)
- Freiraumdämpfung (Entfernung) (-)
- Zus. Verluste am Funkweg, Fehlausrichtung, Luftfeuchtigkeit, ...
- Zus. Dämpfung durch div. Materialien im Funkweg (Mauer, Wald, ...) (-)
- Polarisationsverluste (-)
- Antennengewinn Empfänger (+)
- Fehlanpassung am Empfänger (-)
- Antennenstecker (-)
- Antennenkabel (-)
- Ggf. Antennenstecker (-)
- Empfänger Empfindlichkeit (bei Sprachfunk oft angegeben für 10dB oder 12dB SNR, LoRa kann bis -20dB dekodieren)

Beispiel

Outdoor Relais (J-Pole an 5m Kabel) zu Heltec V2 Modul (kurze Helix-Spulenantenne), Entfernung 5km bei guter Sichtverbindung .

Komponente	[dB]	Bemerkung
Sender	14	= 25mW, in der EU zugelassen

Ausgangsleistung		
Antennenumschalter Modul	-0,3	Am RAK4630 Modul (PE4259 0.38dB + ...)
Antennenstecker	-0,2	SMA Stecker- Buchse
Antennenkabel	-3,2	5m RG213
Sendeantenne theoretisch	+2,15	dBi Antennengewinn
Antennenverluste praktisch	-1	Fehlanpassung VSWR 1:2
Freiraumdämpfung	-105	Freiraumdämpfung 5km@868MHz
Mauer	-6	Ziegelwand
Polarisationsverlust	-3	Durch unterschiedliche Polarisierungsebenen (Schrägstellung, etc.)
Antenne am Empfänger	-7	dBi, 2cm Spulen-Helixantenne
Antennenverlust praktisch	-1	Fehlanpassung etc.
Antennenkabel	-0,1	Sehr kurzes Kabel an der Printplatte
Antennenstecker	-0,2	An der Printplatte
Antennenumschalter Modul	-1	Antennenumschaltung und Ansteuerung
Summe	-111,85	dB kommen am Empfänger an
Empfänger-Empfindlichkeit	-132	dB Datenblatt
Bilanz	20,15	dB als Reserve,

Bei einer Empfangsleistung von -111,85dB und einer Empfindlichkeit des Empfängers von -132dB (typ. LongFast 250 kHz, SF 11 ca., -134 bei SF12, SX1262 Datenblatt) hat die Funkverbindung mit 20,15dB ausreichend Reserven und wird in der Praxis funktionieren.

Reichweitenberechnung im Internet

Die Webseite: https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp ermöglicht eine praxistaugliche Berechnung der Reichweite von Linkstrecken.

Nach der Anmeldung und New Site zieht man den Marker auf der Karte auf die jeweilige Position.

Submit speichert die Location und zeigt die Koordinaten auf der nächsten Seite.

Jetzt kann man der Position einen Namen geben und mit submit abspeichern.

Wenn man mindestens zwei Sites definiert hat kann man unter New Link im Main Menu die weiteren Daten zur Linkberechnung eingeben.

From und To: Auswahl der Stationen und der Antennenhöhen

Frequency 868 MHz

Tx power 0,0000398 W (entspricht -14 dBm, der üblichen Sendeleistung bei LoRa Meshtastic)

Tx line loss 3 dB ist realistisch und berücksichtigt die Verluste am Sendeweg (Antennenumschalter, Stecker, Kabel, Anpassungsverluste, ...)

Tx antenna gain: 2.15 dBi (für Dipol, J-Pole/-5 bis -10 für Rubber Duck,...)

Rx antenna gain: siehe Tx antenna gain

Rx line loss: 2 (siehe Tx line loss)

Rx threshold: 0.16 (LongFast SF9, 250 kHz bei SX12262 chip -123 dBm entspricht 0,16 μ V an 50 Ω)

Radio Mobile

debar schließen

From: Radio link study 1*****

From: Stefan

Antenna height (m above ground): 4 (13.12 ft)

To: Damberg Warte

Antenna height (m above ground): 30 (98.43 ft)

Description: Radio link study 1*****

Frequency (MHz): 868

Tx power (Watts): 0.0000398 (-14.00 dBm)

Tx line loss (dB): 3

Tx antenna gain (dBi): 2.15

Rx antenna gain (dBi): -5

Rx line loss (dB): 2

Rx threshold (μ V): 0.16 (-122.92 dBm)

Required reliability (%): 70

Use land cover:

Use two rays:

Define as default values | Restore original values

Submit

Cancel

Danach erhält man ein Diagramm über den Querschnitt des Links (incl. Fresnell Zonen), eine Tabelle mit den errechneten Werten und eine Kartendarstellung des Links. Außer der Darstellung von Links kann auch der Abdeckungsbereich etc. berechnet werden.

Praxistipps zum Aufbau

Antenne

Merke: Die Antenne ist der beste Verstärker!

Wenn du eine vorhandene Antenne verwenden willst, musst du folgende Punkte beachten:

Ist die Antenne spezifiziert für 868MHz? Manchmal werden 915MHz Antennen, die für die USA verwendet werden, auch für 868MHz verkauft. Diese sind aber normalerweise nicht geeignet.

Antennen mit möglichst hohem Gewinn verwenden. Das SWR kann und sollte gemessen werden (möglichst unter 1:2), ist aber nicht das einzige Maß für die Qualität der Abstrahlung.



Rubber-Duck Antennen enthalten oft Spulen um die Antenne elektrisch zu verlängern. Sie sollten möglichst **nicht abgewinkelt** verwendet werden (verschlechtert die HF – Eigenschaften).

Kabel

Die Antenne möglichst nahe am Sendegerät anordnen und möglichst kurzes Antennenkabel verwenden um Verluste zu vermeiden. Wo das nicht möglich ist hochwertige Kabel mit geringer Dämpfung verwenden.

Grobe Faustformel: dünnes Kabel – viel Dämpfung/Dickes Kabel – wenig Dämpfung

Stecker

Möglichst wenig Steckverbindungen und diese mit möglichst hoher Qualität (Fehlerquelle!).

Das meistverwendete Stecksystem ist SMA, aber normales SMA (Stecker mit Überwurfmutter und Mitteldorn) oder Reverse SMA (ohne Mitteldorn)?



Steckverbindungen im Außenbereich mit selbstverschweißendem Isolierband abdichten! (Ausnahme N-Norm, diese sind wasserdicht).

Aufbau

Die Antenne möglichst im Außenbereich montieren um Dämpfung durch die Wände zu vermeiden. Montageort möglichst hoch und frei von Hindernissen wählen, idealerweise mit guter Sichtverbindung zur Gegenstation.

Antennen in größerem Abstand zu Metallteilen aufbauen (Verstimmung, Verzerrung der Richtcharakteristik, ...). Mindestabstand $\lambda/4$, ca. 10cm.

Die Polarisierung sollte für Meshtastic vertikal sein, d.h. im Allgemeinen sollte die Antenne senkrecht stehen.



Für die Durchführung bei Fenstern gibt es 3 Möglichkeiten:

Bohrung durch die Mauer, durch den Fensterrahmen oder die Verwendung eines Flachbandkabels. Letzteres bewirkt eine zusätzliche Dämpfung von ca. 1dB.

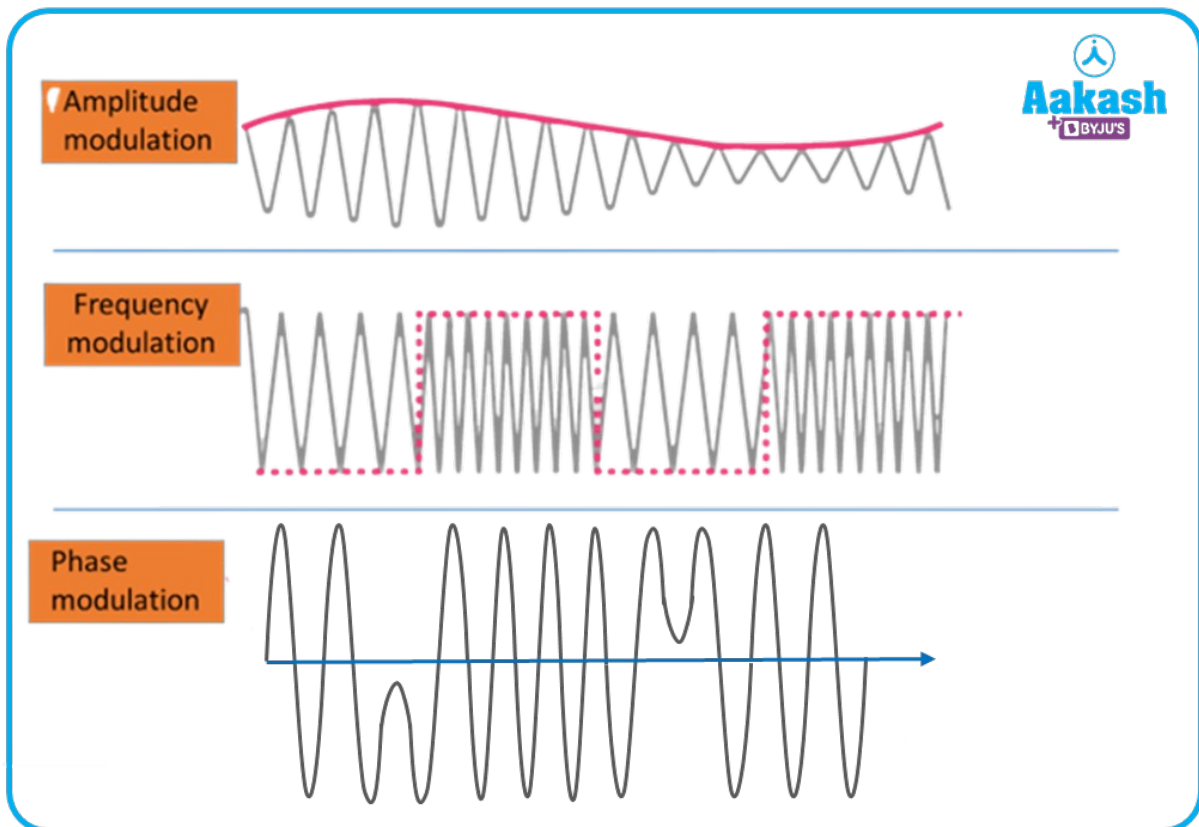
Sind die Anschlüsse am Gerät und an der Antenne unterschiedlich, so braucht es einen Adapter. Diese stellen eine Fehlerquelle dar und bewirken eine zusätzliche Dämpfung des Signals.



Der SMA Stecker ist mechanisch nicht sehr robust und kann Kräfte, die von einem Adapter und einem dickeren Kabel übertragen werden schlecht aufnehmen. Die Stecker sind oft auch in der Platine verlötet und brechen leicht. Es gibt sogenannte Pigtails, die durch ein kurzes Stück flexibleres Kabel dies verhindern.

Modulation

Bisher wurden nur reine Sinusschwingungen behandelt, die an sich keine Information beinhalten. Modulation nennt man den Vorgang, auf eine Funkwelle Information aufzubringen. Das kann z.B. im einfachsten Fall das Ein/Ausschalten sein (wie beim Morsen), aber auch eine Veränderung der Amplitude, der Frequenz oder der Phase können Informationen beinhalten.



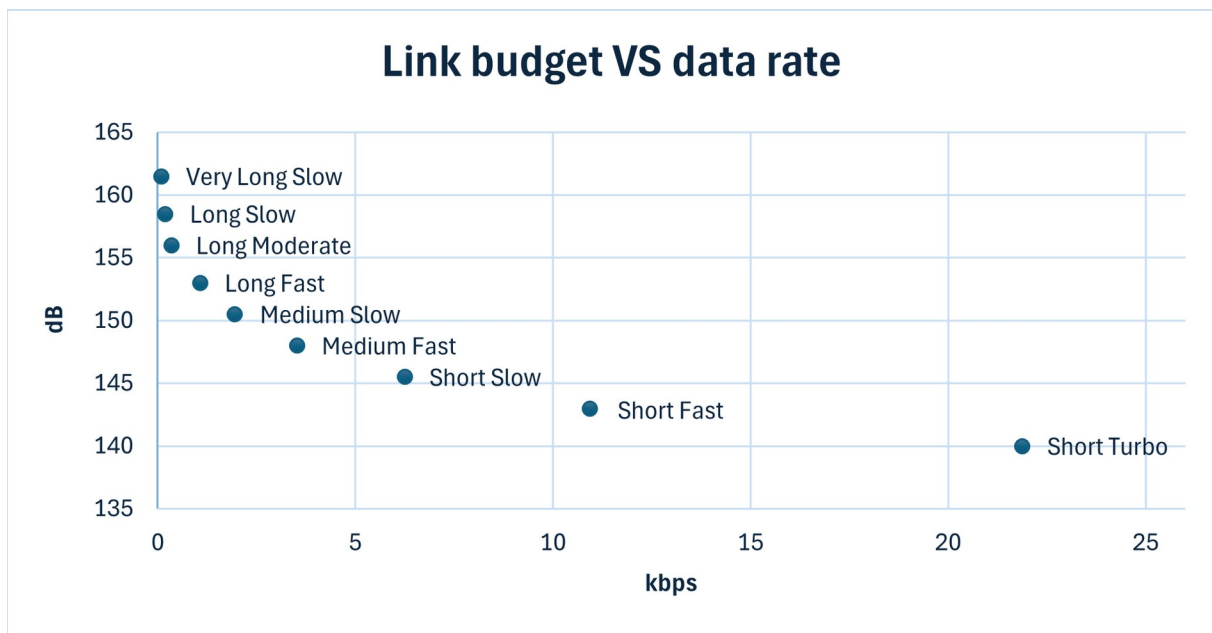
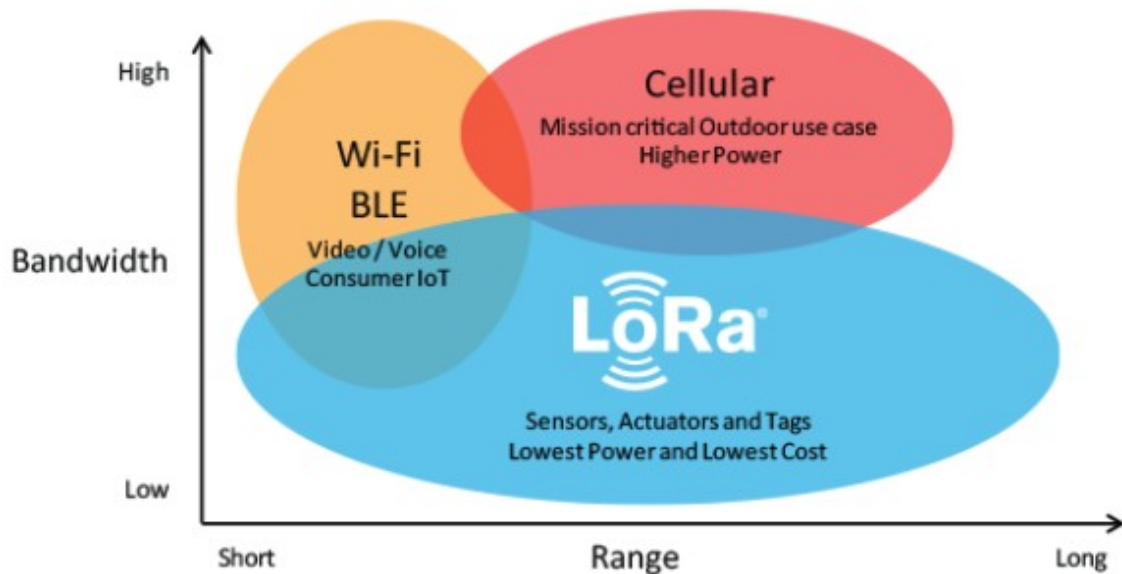
FM (Frequenzmodulation) z.B. beim UKW Rundfunk: Die Frequenz wird im Takt des Audiosignals rund um einen Mittelwert verändert.

AM (Amplitudenmodulation) z.B. beim Kurzwellenfunk, Flugfunk verändert die Amplitude der Funkwelle mit dem Audiosignal.

PM (Phasenmodulation mit 2 unterschiedlichen Phasenlagen) und ihre Abkömmlinge QPM (Quadratur PM mit Phasenlagen 0° , 90° , 180° , 270°) und andere, komplexe Modulationen verändern mit den Informationen die Phasenlage des HF-Signals. PM wird oft bei digitalen Signalen verwendet, u.a. für Satellitenkommunikation (DVB-S, GPS), LTE / 4G / 5G (Basis für QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

LoRa®

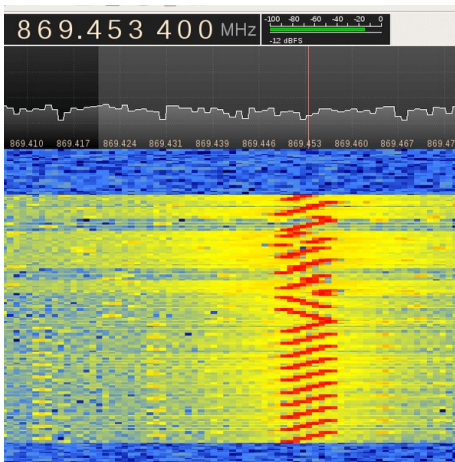
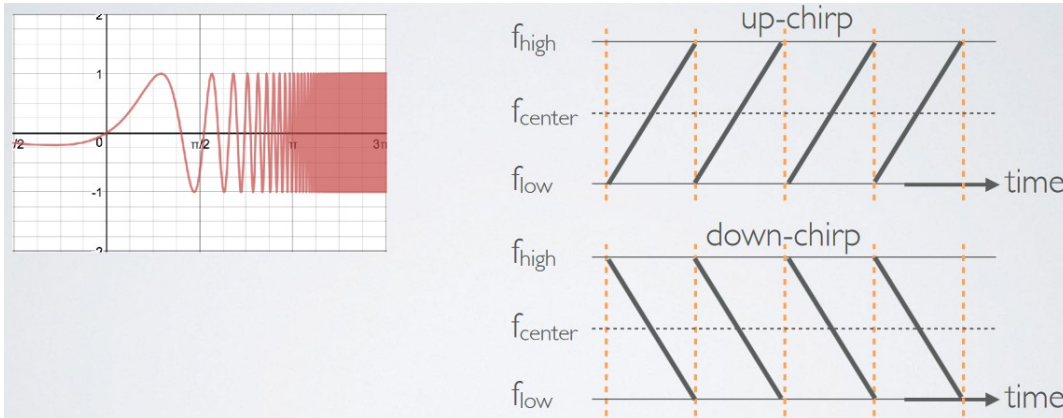
LoRa® wurde 2009 erfunden, die Rechte liegen bei der Semtech® Cooperation. Der Name LoRa® (Long Range) kommt von den extrem langen Übertragungsdistanzen, die diese Technologie ermöglicht. Dabei wird durch eine besondere Modulationsform die hohe Reichweite mit einer geringen Datenrate erkauft. Die Übertragung geschieht im ISM Frequenzbereich.



Das LoRa Signal

Modulation

LoRa verwendet eine Chirp Spread Spectrum (CSS) Modulation. Ein Chirp ist ein physikalische Signal, das linear in der Frequenz ansteigt oder abfällt. Dabei sind die Frequenz, die Bandbreite und die Phasenlage veränderlich und enthalten Information.



LoRa nutzt standardmäßig Up-Chirps für Daten.

Die Bits werden in Symbole zusammengefasst und durch Phasenverschiebung (zeitliche Verschiebung) des Chirps kodiert.

Die LoRa Modulation ist sehr robust gegen Störungen und Mehrwegeausbreitung. Durch hohe Empfindlichkeit ist der Empfang auch bei sehr schwachen Signalen möglich (Signal/Rausch Verhältnis < -20 dB)

Datenrate

Abhängig von Parametern

Typisch: 0,3 kbps (SF12) bis 50 kbps (SF7, 500 kHz)

Reichweite bei 14dBm (gesetzliche Vorgabe)

Realistisch im Stadtgebiet: 1–5 km

Bei Sichtbedingungen: 10–20 km oder mehr

Mit Richtantennen und guten Standorten sind Reichweiten über 50 km möglich

Polarisation der Antenne

Meist vertikal

Parameter bei LoRa

Duty – Cycle

Verhältnis von Senden/Empfangen in [%]

Frequenz

Gibt die Mittenfrequenz der Aussendung an

Meist in den lizenzfreien ISM-Bändern (EU868-Band: 863–870 MHz, EU433-Band: 433.05–434.79 MHz)

Die Leistung und der Duty cycle sind gesetzlich begrenzt

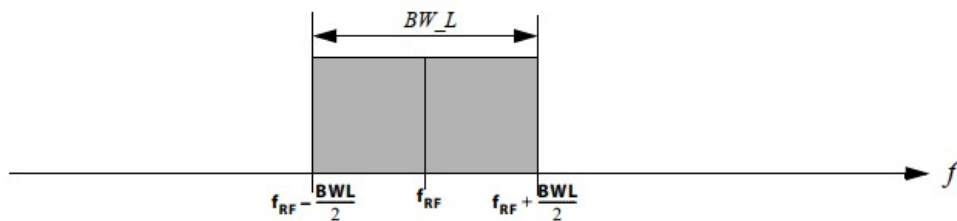
Ausgangsleistung Tx Power

Lt. Meshtastic:

European Union 868MHz Band: 14dBm bei 1% Duty Cycle (869.4 - 869.65MHz: 27dBm Power Output bei 10% Duty Cycle)

Höhere Leistung → größere Reichweite, aber höherer Stromverbrauch

Bandbreite, Bandwidth BW



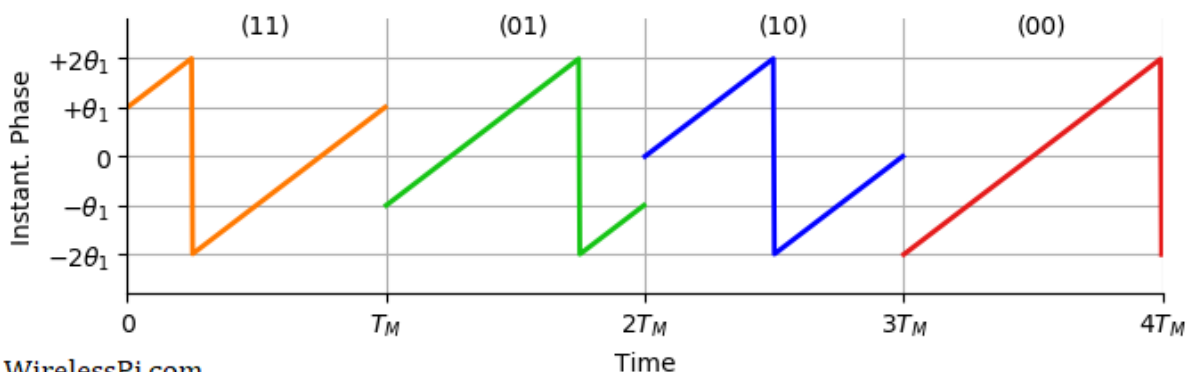
Abweichung von der Mittenfrequenz nach oben und unten

Typische Werte: 62.5kHz, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz

Je breiter die Bandbreite desto höhere die Datenrate desto kürzer Übertragungszeit.

Vom Bit zu Symbols

Darstellung der möglichen Symbole bei 2 Bit/Symbol:



Spreading Factor SF

Der Spreading Factor gibt an, wieviele Bit für ein Symbol zusammengefasst werden. Ein Symbol repräsentiert also, abhängig vom SF mehrere Bits gleichzeitig.

Jedes Symbol wird in einem einzelnen Chirp übertragen.
 Jedes LoRa-Symbol besteht aus 2^{SF} möglichen Zuständen (SF = Spreading Factor).

Praktische Werte reichen von SF7 bis SF12

SF	Anz. unterschiedlicher Werte	Datenrate	Robustheit
7	128	schnell	gering
8	256	schneller	mittel
9	512	langsamer	besser
10	1024	langsamer	robust
11	2048	sehr langsam	sehr robust
12	4096	extrem langsam	maximal robust

Beispiel:

SF7 ermöglicht 128 unterschiedliche Werte (7 Bits pro Symbol)

SF12 ermöglicht 4096 unterschiedliche Werte (12 Bits pro Symbol)

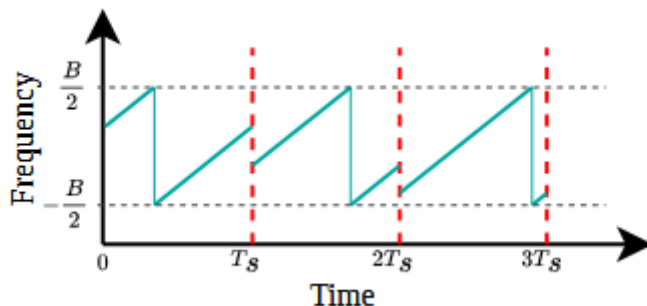
Je höher der SF desto größer die Reichweite bei höherer Robustheit aber geringerer Datenrate.

Die einzelnen Werte werden durch eine Verschiebung des Startpunkts des Chirps übertragen.

Der Chirp beginnt nicht immer bei der gleichen Phase, sondern wird um einen bestimmten Betrag zeitlich verschoben. Diese Verschiebung entspricht dem Symbolwert.

Beispiel für die zeitliche Verschiebung bei SF7 (128 mögliche Werte):

Symbolwert	Verschiebung	Bedeutung
0	keine	0000000
1	1/128 des Chirps	0000001
2	2/128 des Chirps	0000010
...
27	127/128	1111111



Die einzelnen Symbole sind im Diagramm durch die roten Striche getrennt.

Wenn der SF steigt, steigt die Chirpzeit (exponentiell). SF12-Chirps sind also 32-mal länger als SF7-Chirps (bei gleicher Bandbreite).

Wenn die BW steigt, verringert sich die Chirpzeit (linear).

Der SF ist nicht explizit im Paket gespeichert, sondern wird vom Empfänger durch Signalverarbeitung im LoRa chip erkannt. Der Empfänger versucht, das Signal mit allen möglichen SF-Werten zu dekodieren. Nur bei passendem SF kommt ein korrektes Symbol heraus und das Paket wird gelesen.

Coding Rate CR

Sie bestimmt, wie viele zusätzliche Redundanzbits zu den Nutzdaten hinzugefügt werden, damit der Empfänger Bitfehler (und mehrere Bitfehler pro Symbol?) selbst korrigieren kann. LoRa verwendet Hamming-Code-ähnliche Forward Error Correction (FEC) auf Symbol-Ebene.

CR	Bedeutung	FEC	Robustheit, Datenrate
4/5	4 Nutzbits + 1 Redundanzbit	wenig FEC	höhere Datenrate, weniger robust
4/6	4 Nutzbits + 2 Redundanzbits	moderat	guter Kompromiss
4/7	4 Nutzbits + 3 Redundanzbits	mehr FEC	robuster gegen Störungen, Datenrate sinkt
4/8	4 Nutzbits + 4 Redundanzbits	maximal FEC	sehr robust, aber langsamste Datenrate

Je größer der Nenner, desto mehr Redundanz, desto robuster, aber desto langsamer.

Dadurch ergibt sich eine bessere Demodulation bei schlechtem SNR und somit weniger Paketverluste. Dies erhöht die Reichweite, durch Erhöhung der Fehlertoleranz.

Die effektive Nutzdatenrate ergibt sich vereinfacht aus:

CR	Nutzanteil
4/5	80 %
4/6	67 %
4/7	57 %
4/8	50 %

CR 4/8 halbiert also fast die Nutzdatenrate gegenüber 4/5.

Effekt auf Reichweite

Höhere CR ergibt bessere Fehlerkorrektur und somit ein geringfügig niedrigeres benötigte SNR. Der typischer Gewinn im Link Budget beträgt ca. 1-2dB. Es ergeben sich deutlich weniger Paketverluste am Rand der Reichweite

CR verlängert die „brauchbare Reichweite“, nicht die theoretische Maximaldistanz. CR erhöht nicht die Reichweite sondern reduziert nur Fehler am Rand der Reichweite.

SF entscheidet, ob ein Signal ankommt, CR entscheidet, ob es lesbar ist.

Für den Header wird eine fixe CR von 4/8 verwendet. Die CR für die Payload wird im Header codiert. Der Empfänger liest diese Bits nach erfolgreicher SF-Synchronisation und weiß dann, wie die Forward-Error-Correction angewendet werden muss.

LoRa Hardware

PART NUMBER	PRODUCT FAMILY	PRODUCT STATUS	LORA IP GEN	MODULATIONS	FREQUENCY RANGE (MHZ)	RX CURRENT (MA)	SENSITIVITY @SF12/125 KHZ (DBM)	TX POWER (DBM)	SF	LORA BW (KHZ)
LR2021	LoRa Plus™	New	4	FSK, LoRa, LR-FHSS, FLRC, O-QPSK, OOK	150-960 1600-2500	5.5	-142	+22	5-12	7.8-500 203-812
LR1121	LoRa Connect™	Active	3	FSK, LoRa, LR-FHSS	150-960 1900 S-band 2400-2500	5.4	-141	+22 (sub-GHz) +11.5 (2.4GHz)	5-12	62.5-500 125-500 203-812
SX1261	LoRa Connect™	Active	2	FSK, LoRa, LR-FHSS	150-960	4.6	-137	+15	5-12	7.8-500
SX1262	LoRa Connect™	Active	2	FSK, LoRa, LR-FHSS	150-960	4.6	-137	+22	5-12	7.8-500

LoRa Chips Semtech Chips SX1261, SX1262

Dies sind die derzeit (2026) meistverwendete ICs für LoRa.

Semi-Duplex LoRa Sender/Empfänger

SPI Interface

Empfindlichkeit abhängig von den Parametern BW und SF -117 bis -148dBm

Maximale Ausgangsleistung +15dBm (SX1261), +22dBm (SX1262)

Benötigt externe Filterung und Umschaltung der Antenne zwischen Sender und Empfänger, deswegen in der Praxis oft in fertigen Modulen verbaut.

In den Boards von Heltec wird dieser Chip direkt verwendet. In anderen Boards wird der Chip mit dazugehörigen Bauteilen kombiniert.

LoRa Module

Bestehen aus LoRa Chip + Peripherie (Antennenumschalter, Filter/Anpassung, ...) Als Antennenumschalter dient oft der Chip PE4259 (0.35dB Signaldämpfung).

HPD16A Modul: (Lilygo)



Kombination aus SX1262 + Antennenumschalter + Anpassung/Filter + Antennenanschluss über Pads. Wird beispielsweise bei den Boards der Lilygo Serie (T-beam, T-Deck, T-Lora, ...) verwendet. Dort wird es mit ESP32 MCUs verbaut.

RAK4630, RAK4631 Modul (RAK, Wiscore), Wisblock Serie



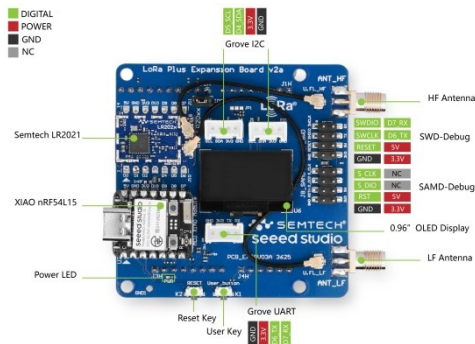
Das RAK 4630 Core – Modul besteht aus seiner Kombination von Nordic nRF52840 MCU (ARM®Cortex®-M4 32-bit processor with FPU, 64 MHz, BLE, 1 MB Flash, 256 kB RAM ...) + SX1262 (RAK4630) + Antennenumschalter + Anpassung/Filter + Antennenanschluss für LoRa und BLE über U.FL / IPEX.

Das zugehörige Adapterboard heisst RAK4631 und wird sehr oft mit den Base boards der RAK1900x Wisblock Serie verwendet (unterschiedliche Peripherievarianten, USB Interface, Battery management, Solar charger, Sensor Anschlüsse...)



Das Modul RAK13302 bietet über ein zusätzliches HF-FrontEnd (PA + LNA) eine Ausgangsleistung von 1W für Regionen, in denen das erlaubt ist.

Semtec LR2021 chip, LR20xx Serie



Neue Chipgeneration mit verbesserter Empfindlichkeit und verschiedenen Modulationsarten. Derzeit erste Evaluierungsboards erhältlich, aber noch relativ teuer.

LoRa Parameter bei Meshtastic

Beispiel LongFast

Frequenz: 869.525 MHz im ISM-Band 868 MHz

Bandbreite (BW): 250 kHz

Spreading Factor (SF): 11

Coding Rate (CR): 4/5

Transmit Power 14dBm

Preamble Length: 16

Sync Word: 0x2B

Datenrate: ca. 1.07 kbps (theoretisch)

Link Budget: ca. 153 dB

LoRa Parameter bei Meshcore

Beispiel EU/UK Narrow

Frequenz: 869.618 MHz (EU/UK)

Bandbreite (BW): 62.5 kHz

Spreading Factor (SF): 8

Coding Rate (CR): 8 (also 4/8)

Transmit Power: 22 dBm empfohlen (nur im 869,5-MHz-Sonderband bis max. 27dB erlaubt)

Sync Word: 0x12

Datenrate: ca. 1.0 kbps (theoretisch)

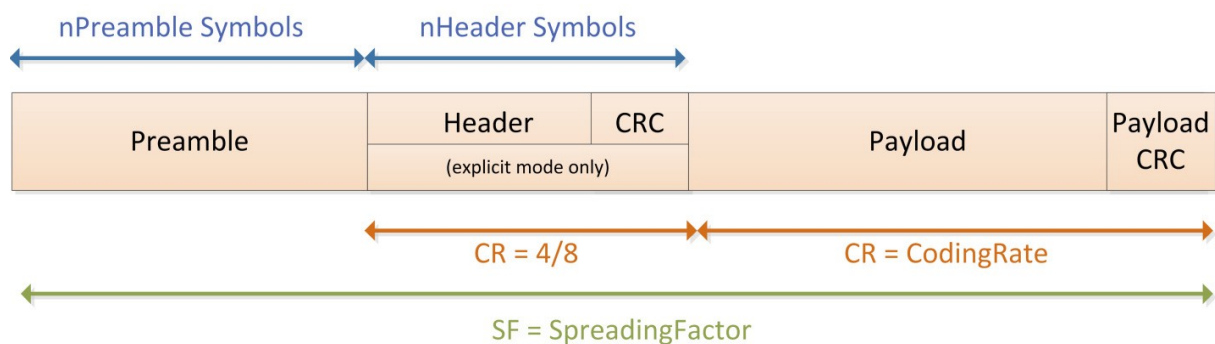
Link Budget: 159–161 dB

LoRa PHY (physical layer)

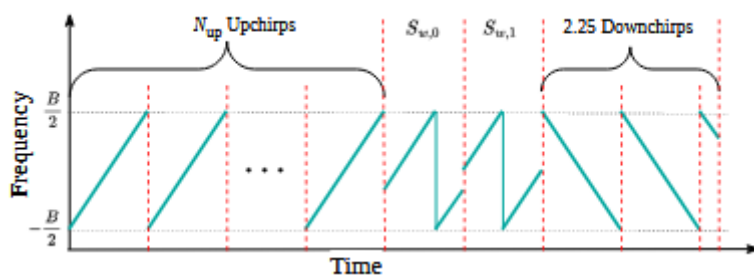
Der physical layer wird vom Chip generiert. Es werden an diesen nur die Nutzdaten (Payload) übergeben.

Ein LoRa Datenpaket besteht aus folgenden Teilen:

- Preamble + Sync Word, damit findet der Empfänger das Paket im Rauschen und erkennt das Netzwerk, für das ein Paket gültig ist
- Header sagt aus, wie die Payload zu interpretieren ist
- Payload (+ optional CRC) enthält die eigentliche Daten (+ optional Fehlerprüfung)



Preamble



Up-chirps

Länge: 6–65535 Symbole (16 up chirps bei Meshtastic, 8 typisch bei LoRaWAN)

Ermöglicht dem Empfänger den Start des Pakets zu erkennen und Takt sowie den SF korrekt einzustellen.

Erkennen, dass ein LoRa-Signal anliegt

Frequenz-Synchronisation zwischen Sender und Empfänger

Timing-Synchronisation

Erkennen des Spreading Factors (SF)

Erkennen der Bandbreite (BW)

SF und BW kann der Empfänger aus der Präambel ableiten, weil die Chirp-Struktur eindeutig ist.

Sync Word Netzwerkkennung

1 Byte, 2 Symbole

Dient zur Unterscheidung von Netzwerken / Protokollen

Ermöglicht die Filterung von Paketen fremder Systeme

Meshtastic 0x2B

Meshcore 0x12

LoRaWAN 0x34

Abschluss der Präambel

2.25 Down – Chirps

Header, Steuerinfos

Dieser wird immer mit CR = 4/8 (höchste Redundanz) codiert

Beim Empfang wird der SF verwendet, der aus der Präambel erkannt wurde

Es gibt Explicit oder Implicit Header Mode. Meshtastic nutzt immer den expliziten Header.

Implicit Header: feste Länge, kein Header und somit kleinere Pakete, schneller.

Der Header besteht aus 3 Bytes + 1 Byte CRC (insgesamt 4 Bytes):

Byte 0: PHDR1 – Payload Length

Bits 7..0 = Payload length

Gibt an, wie viele Bytes Nutzdaten im Paket sind

Wertebereich: 0–255

Meshtastic-Payload liegt typischerweise zwischen 20–80 Bytes

Byte 1: PHDR2 – Coding Rate + reserved

Nicht genau dokumentiert, aber aus Messungen ergibt sich

Bit 4-7: Reserved

Bit 0: immer 0

CR-Bits (3..1)	Bedeutung	Coding Rate
0000 0010	4/5	CR = 1 Standard
0000 0100	4/6	CR = 2 stärker
0000 0110	4/7	CR = 3 stärker
0000 1000	4/8	CR = 4 maximal

Meshtastic nutzt meist CR 4/5.

Byte 2: PHDR3 – CRC-Flag + Reserved

Bit 1-7: Reserved

0000 0001 Payload-CRC aktiv (nach der Payload wird noch CRC angefügt)

0000 0000 kein CRC

Meshtastic nutzt immer CRC = 1.

Byte 3: PHDR_CRC – Header-CRC

1 Byte, prüft nur den Header, nicht die Payload

Nach Norm CRC-8-ATM / CRC-8-ITU

Polynom $x^8+x^5+x^4+1$, Hex: 0x31

Initialwert 0x00

RefIn false

RefOut false

XOR-Out 0x00

Datenreihenfolge MSB zuerst

Payload

Nutzdaten, Länge 0–255 Byte (abhängig von SF, BW, CR, max. Paketgröße) bei explizitem Header, fix bei implizitem Header.

Die eigentliche Payload ist je nach Netzwerk (Meshtastic, Meshcore, LoRaWAN, ...) unterschiedlich aufgebaut.

Vor der Übertragung wird die Payload mit FEC codiert (Coding Rate 4/5 ... 4/8) und ggf. verschlüsselt.

Optional Prüfsumme CRC

Wenn im Byte 2 des Headers PHDR3 aktiviert:

2 Bytes, prüfen, ob die Payload korrekt empfangen wurden (bei Meshtastic aktiviert)

Meshtastic Payload

Dokumentationen sind zum Teil widersprüchlich.

Die Dokumentation findet sich auf Github unter <https://github.com/meshtastic> .

Meshtastic nutzt Protobuf-Nachrichten, die in die LoRa-Payload eingebettet ist. Protocol Buffers (Protobuf) ist ein binäres Datenformat von Google. Es dient dazu, strukturierte Daten kompakt, schnell und plattformunabhängig zu übertragen.

Die Daten sind binär serialisiert, Ergebnis ist klein, effizient, ideal für LoRa

- Ideal bei extrem wenig Bandbreite
- erzeugt sehr kleine Nachrichten
- robust gegen Bitfehler
- leicht erweiterbar (kompatibel zu alten Versionen)

siehe <https://buf.build/meshtastic/protobufs/docs/master:meshtastic>

Die genaue Dokumentation der Meshtastic Protobuf Definitions kann unter <https://buf.build/meshtastic/protobufs/docs/master:meshtastic> eingesehen werden.

Die Payload enthält Meta-Informationen für Routing, Sender/Empfänger, Typ, Flags

Feld	Länge	Bedeutung
Version	1 Byte	Protokollversion
Flags	1 Byte	Steuerbits: z. B. ACK, Broadcast, verschlüsselt?
Sender ID	2 Bytes	ID des Geräts, das das Paket sendet
Recipient ID	2 Bytes	Empfänger-ID oder 0xFFFF für Broadcast
Packet Counter	2 Bytes	Zähler für Paketreihenfolge
Hop Count / TTL	1 Byte	Wie oft das Paket noch weitergeleitet werden darf
Message Type	1 Byte	Typ der Nachricht (z. B. Text, Telemetrie, GPS)

Das ist die Struktur, die an den LoRa-Chip übergeben wird.

Wichtige Felder:

- id → eindeutige Paket-ID
- from → Node-ID des Senders
- to → Zieladresse (Broadcast, Gruppe, Node)
- channel → Kanalnummer
- payload → eigentliche Nachricht, Paket
- hop_limit → TTL
- priority → normal, background, admin
- rx_time → Zeitstempel

Packet Typen

Die folgenden Packet Typen sind definiert:

1. DataPacket

Für normale Text- oder Sensor-Nachrichten.

Enthält:

- portnum (z. B. TEXT_MESSAGE_APP, POSITION_APP, NODEINFO_APP)
- payload (z. B. Text, JSON, Binärdaten)

want_ack
reply_id

2. PositionPacket

GPS-Daten:
lat, lon, alt
sats
battery level
timestamp

3. NodeInfoPacket

Infos über den Knoten:
Name
Hardware
Firmwareversion

4. RoutingPacket

Für Mesh-Routing:
Hop-Limit
Priorität
Weiterleitungsflags

Beispiel für Textpaket

Angenommen, der Text lautet: "Hi"
Meshtastic verpackt das in ein DataPacket.

Ein mögliches komplettes LoRa-Payload-Beispiel (gekürzt):
Code: 0A 0C 08 01 12 08 0A 02 48 69 10 01

0A Feld 1, wire type 2 (length-delimited), Feld payload im äußeren ToRadioPacket
0C Länge: 12 Bytes folgen
08 Feld 1, wire type 0 (varint), portnum
01 Wert: 1, Port 1 = TEXT_MESSAGE_APP
12 Feld 2, wire type 2 (length-delimited), payload des DataPacket
08 Länge: 8 Bytes folgen
0A Feld 1, wire type 2, Textinhalt
02 Länge: 2 Bytes
48 69 ASCII: H = 0x48, i = 0x69, Nachricht: "Hi"
10 Feld 2, wire type 0, want_ack
01 Wert: 1 (true)

Meshcore Payload

Siehe: https://github.com/meshcore-dev/MeshCore/blob/main/docs/payloads.md?utm_source=copilot.com

Payload-Größe bis zu 184 Bytes pro Paket weil LoRa-Pakete sonst zu lang werden.

Feld	Beschreibung
Header	Routing-Typ, Payload-Typ, Version
Transport Codes	optional, 2×16-Bit
Path	Routingpfad (0–64 Bytes)
Payload	bis 184 Bytes Nutzdaten
CRC	LoRa-Hardware-CRC

1. Node Advertisement (Knotenmeldung)

Wird regelmäßig ausgesendet, um die eigene Existenz im Mesh bekanntzugeben.

Inhalt:

- Node-ID / Hash
- Firmware-Version
- Fähigkeiten (z. B. GPS vorhanden, Sensoren)
- Routing-Informationen (z. B. Hop-Limit)
- Optional: Statusflags

2. Acknowledgment (ACK)

Bestätigung eines empfangenen Pakets.

Inhalt:

- Hash des bestätigten Pakets
- Flags (z. B. erfolgreich / Fehler)

3. Returned Path

Wird verwendet, wenn ein Knoten den Rückweg zu einem Sender mitteilt.

Inhalt:

- Liste der Node-Hashes, die den Rückweg bilden
- Länge der Route

4. Request (REQ)

Eine gezielte Anfrage an einen bestimmten Knoten.

Inhalt:

- Ziel-Hash
- Quell-Hash
- MAC (Message Authentication Code)
- Anfrage-Typ (z. B. Position, Text, Telemetrie)

5. Response (RESP)

Antwort auf eine Request-Payload.

Inhalt:

- Quell-Hash
- Ziel-Hash
- Antwortdaten (z. B. Position, Text, Telemetrie)
- MAC

6. Plain Text Message (TEXT_MESSAGE)

Eine einfache Textnachricht.

Inhalt:

- UTF-8-Text
- Absender-Hash
- Optional: Gruppen- oder Broadcast-Flags

7. Anonymous Request (ANON_REQ)

Wie REQ, aber ohne Absenderidentität.

Inhalt:

- Ziel-Hash
- Anfrage-Typ
- Nutzdaten (z. B. Sensorabfrage)

8. Group Text Message (unverified)

Nachricht an eine Gruppe, ohne kryptografische Signatur.

Inhalt:

- Gruppen-ID
- Text
- Flags

9. Group Datagram (unverified)

Binäre Daten an eine Gruppe.

Inhalt:

- Gruppen-ID
- Binärdaten (z. B. Sensordaten, Statuspakete)