

LoRaWAN

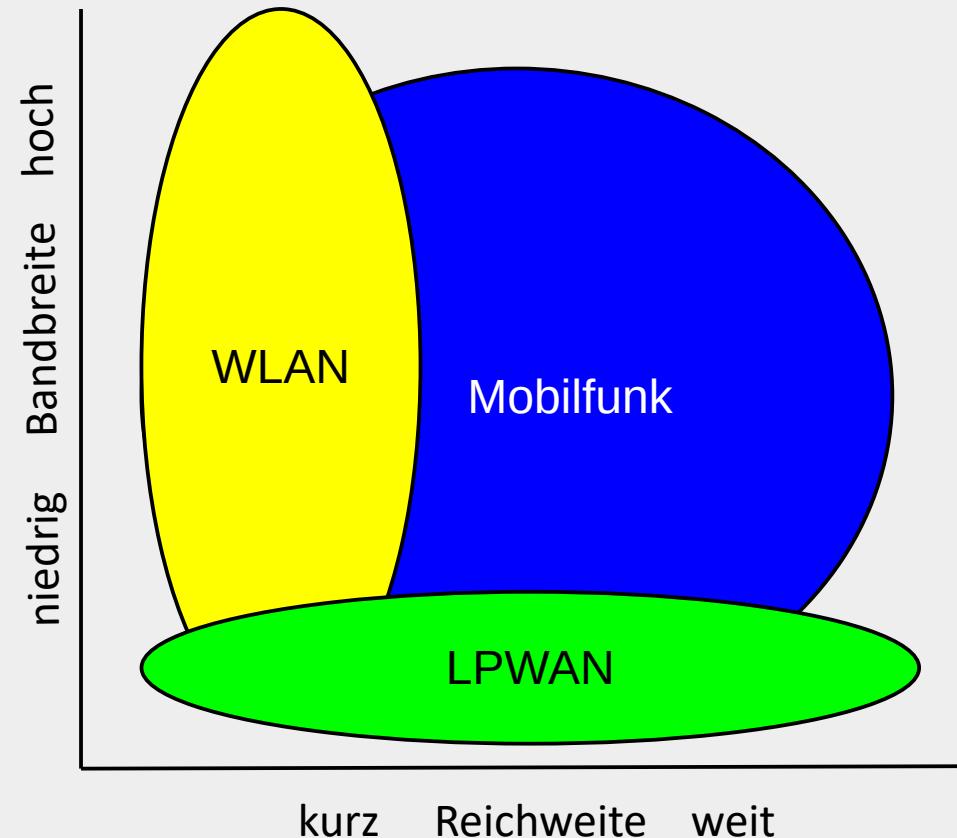


Stand: 12.05.25

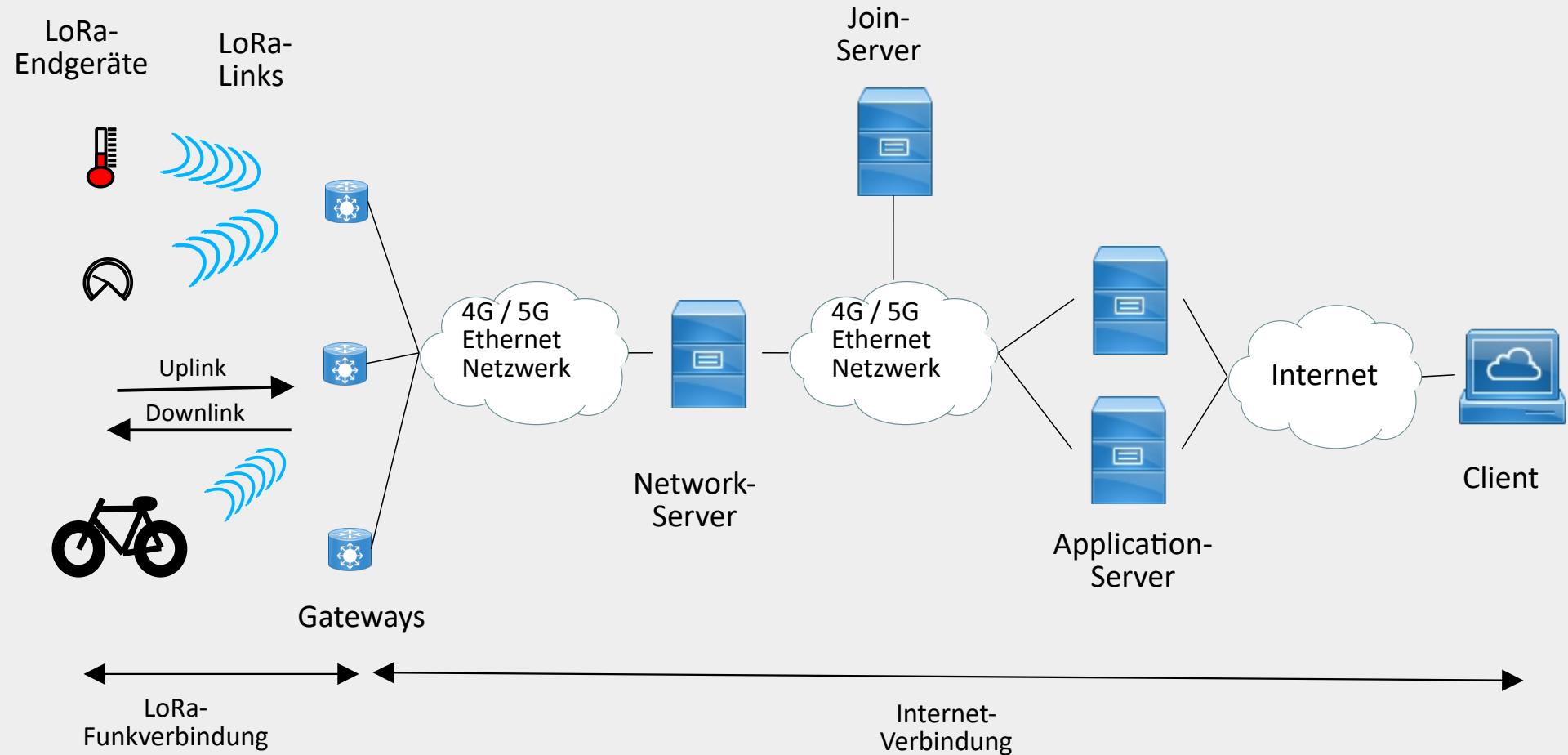
Inhalt

- Einführung
- Netzwerk-Topologie
- Historisches
- Frequenzbereiche
- CSS-Modulation
- Synchronisation
- Dekodierung
- Spreadingfaktor und Symbolfehlerrate
- LoRa-Geräteklassen

Einführung



Netzwerk-Topologie



Historisches

1940 Der deutsche Ingenieur Erich Hüttmann reicht eine Patentschrift für Intrapulsmodulation mit nachfolgender Pulskompression ein.

Die Erfindung wurde zur Verbesserung von Radaranwendungen entwickelt und bildet die Basis für das CHIRP-Spreizspektrum-Verfahren.

2008

Das erste Patent zu LoRa wurde von der französischen Firma Cycleo SAS eingereicht.

2013

Nach dem Aufkauf von Cycleo durch Semtech wurde LoRa weiter entwickelt und als Patent EP2763321 mit dem Titel „Low Power Long Range Transmitter“ eingereicht.

2015

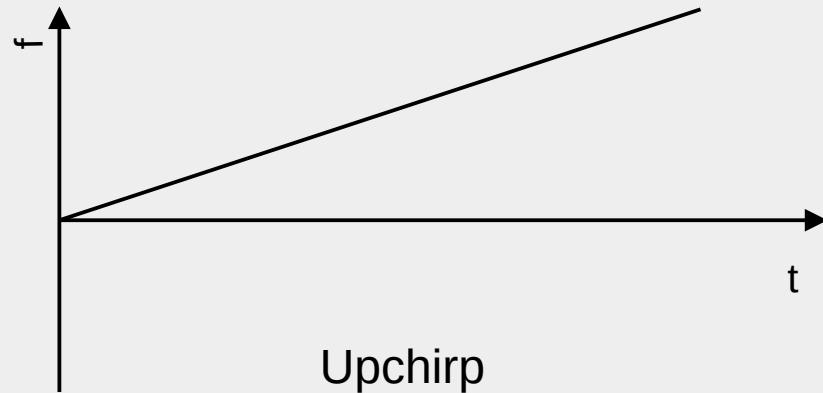
Semtech registriert das Warenzeichen LoRa und die LoRa Alliance kommuniziert die Version 1.0

Frequenzbereiche

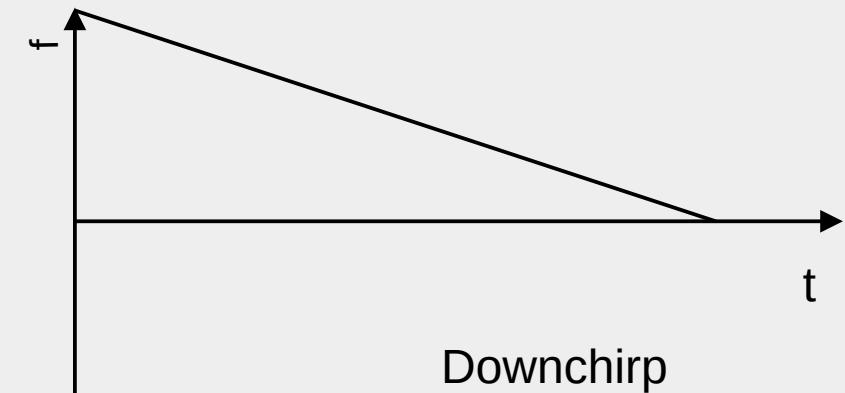
Frequenzbänder im Sub-Ghz-Bereich verwendet.

- 470 – 510 MHz (China)
- 779 – 787 MHz (China)
- 863 – 870 MHz (Europa)
- 902 – 928 MHz (USA)

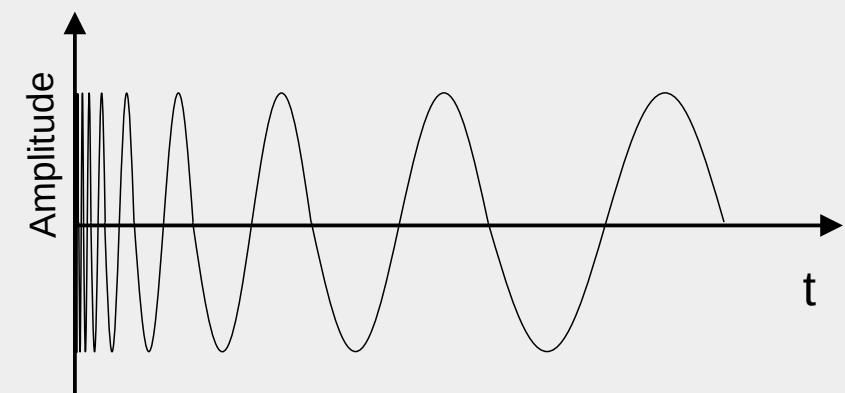
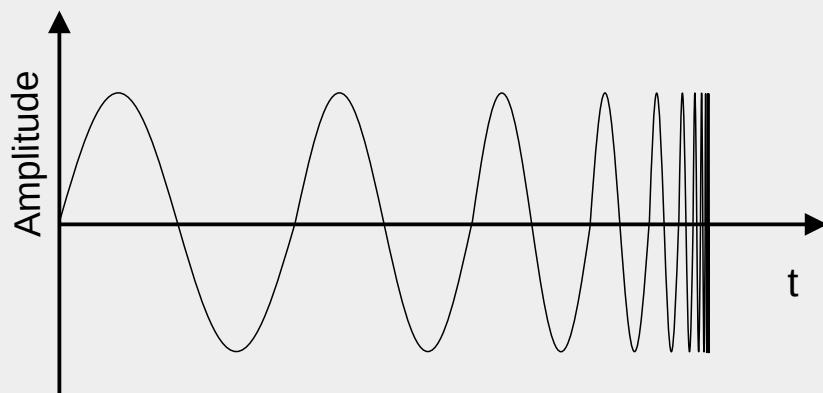
CSS Modulation



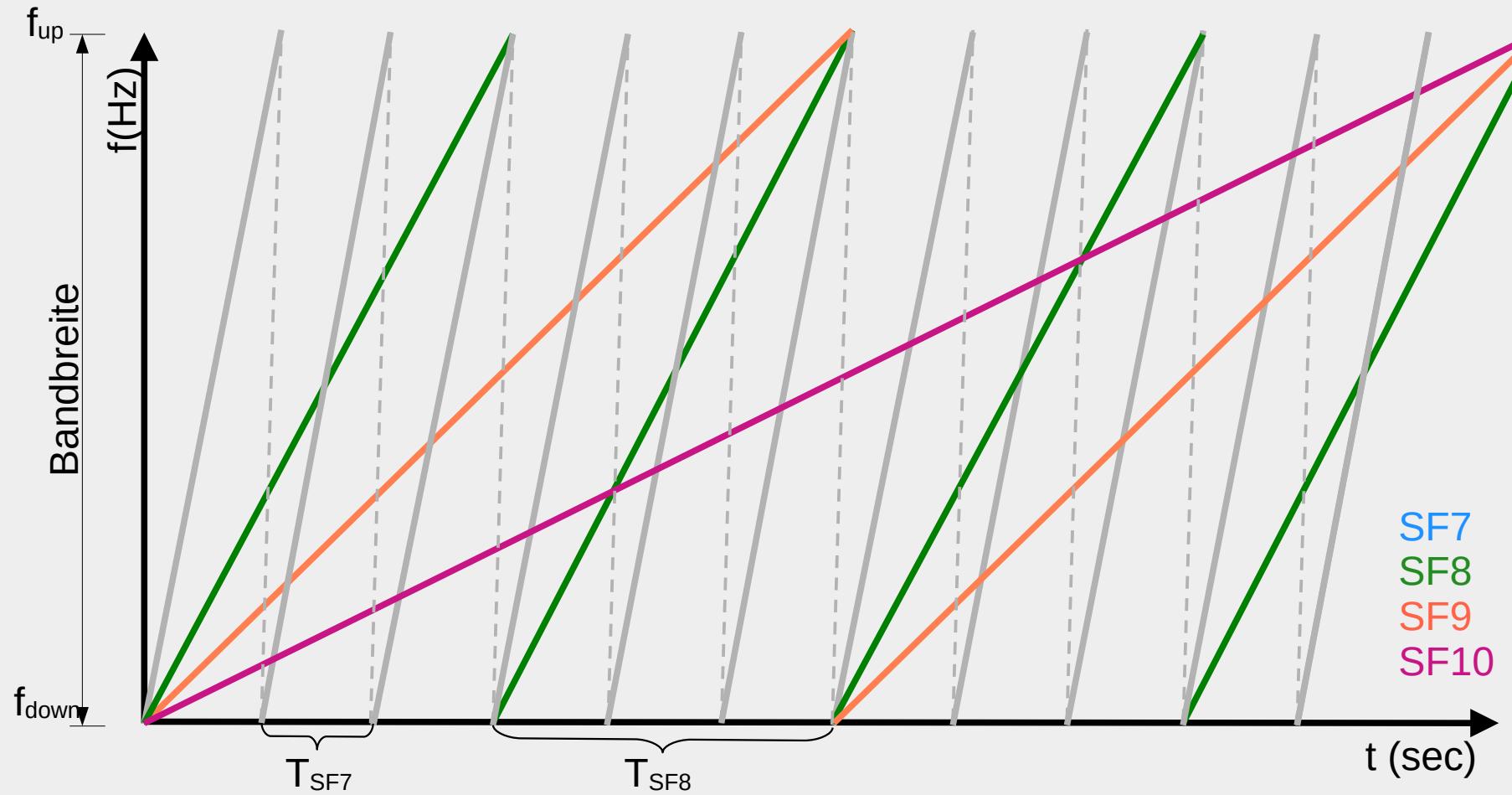
Upchirp



Downchirp

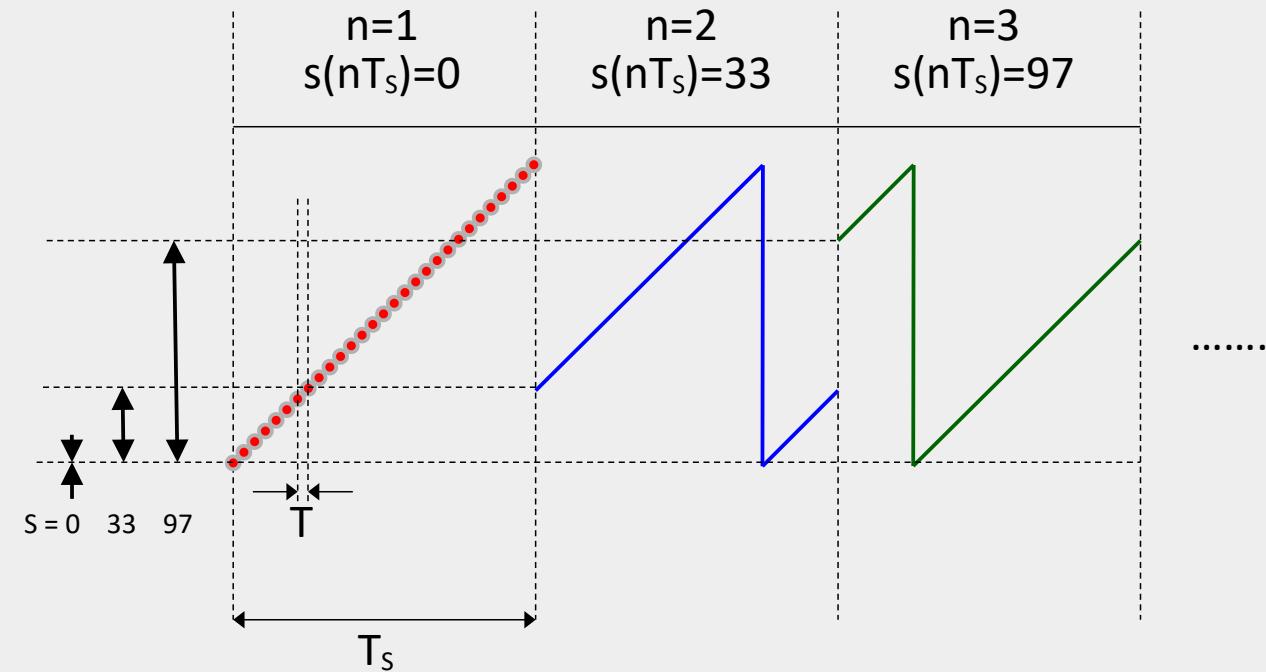


Spreizverfahren



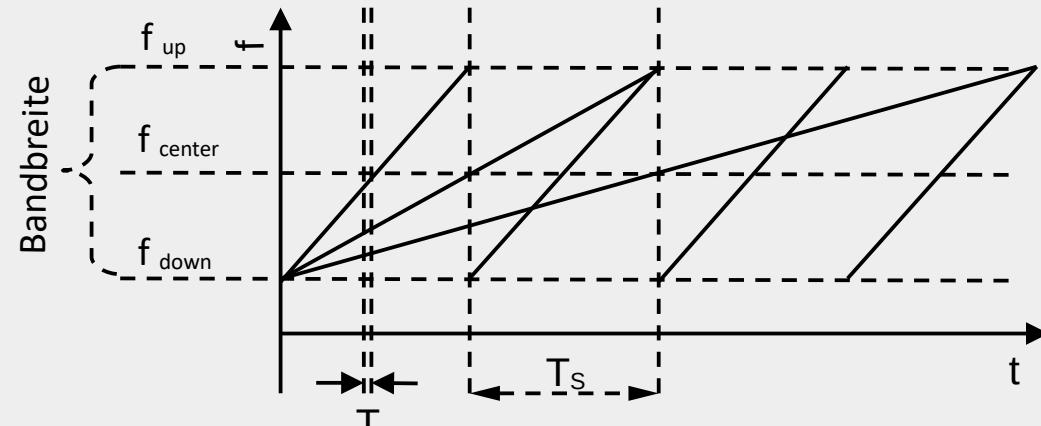
Symboldarstellung

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod s^{SF}) \frac{k}{2^{SF}}}$$

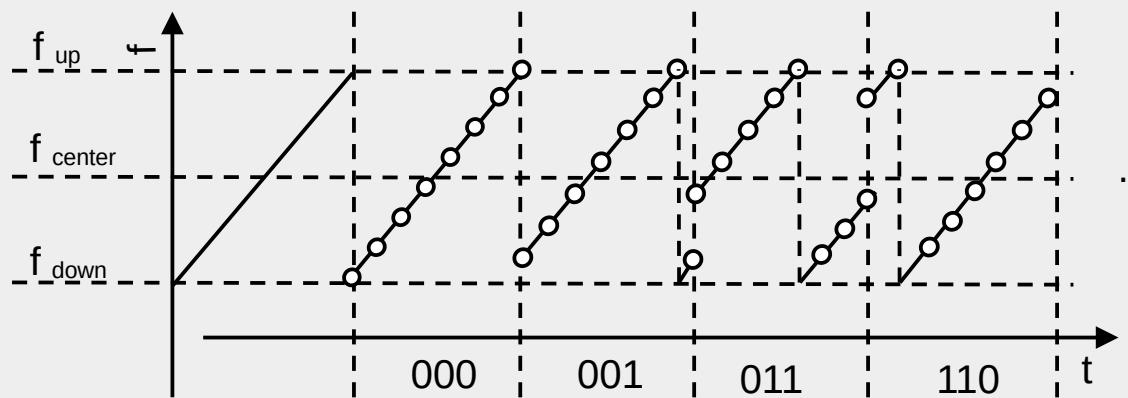


Kodierung von Symbolen

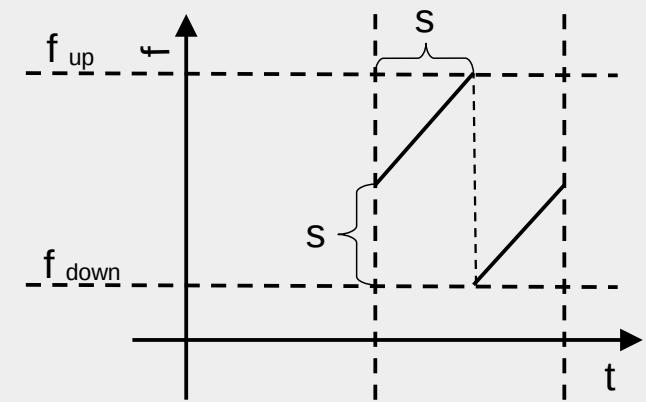
a)



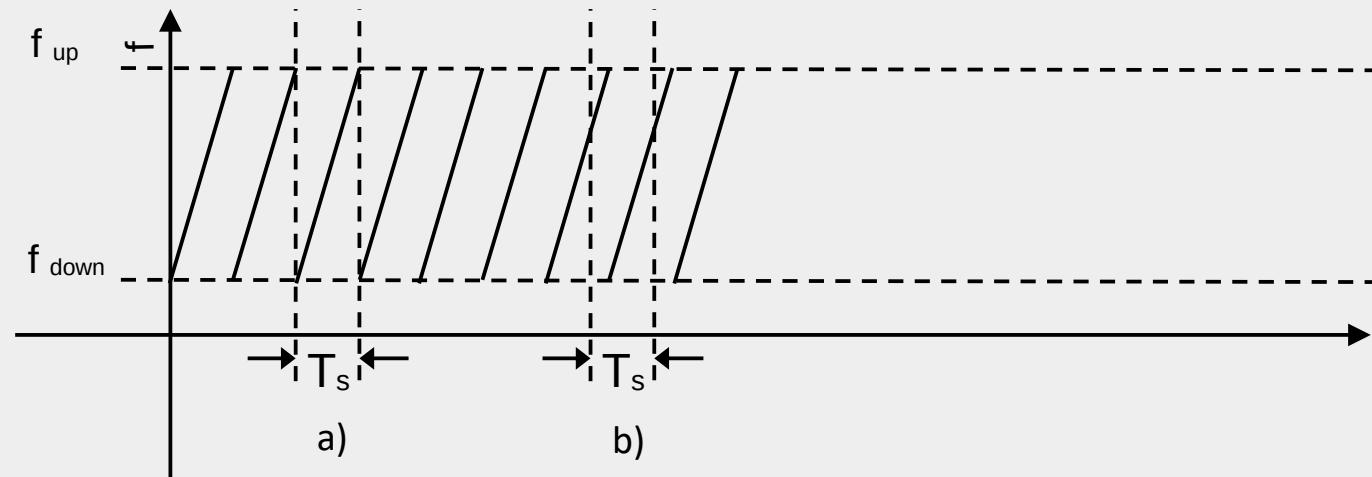
c)



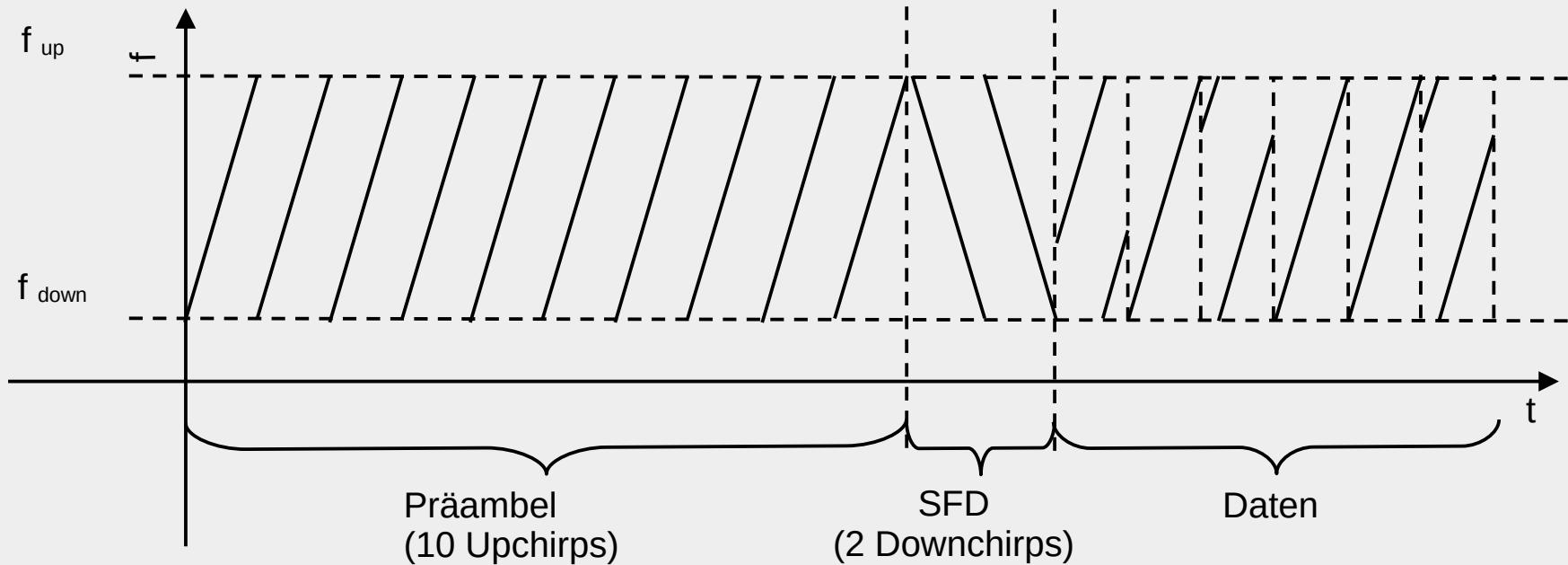
b)



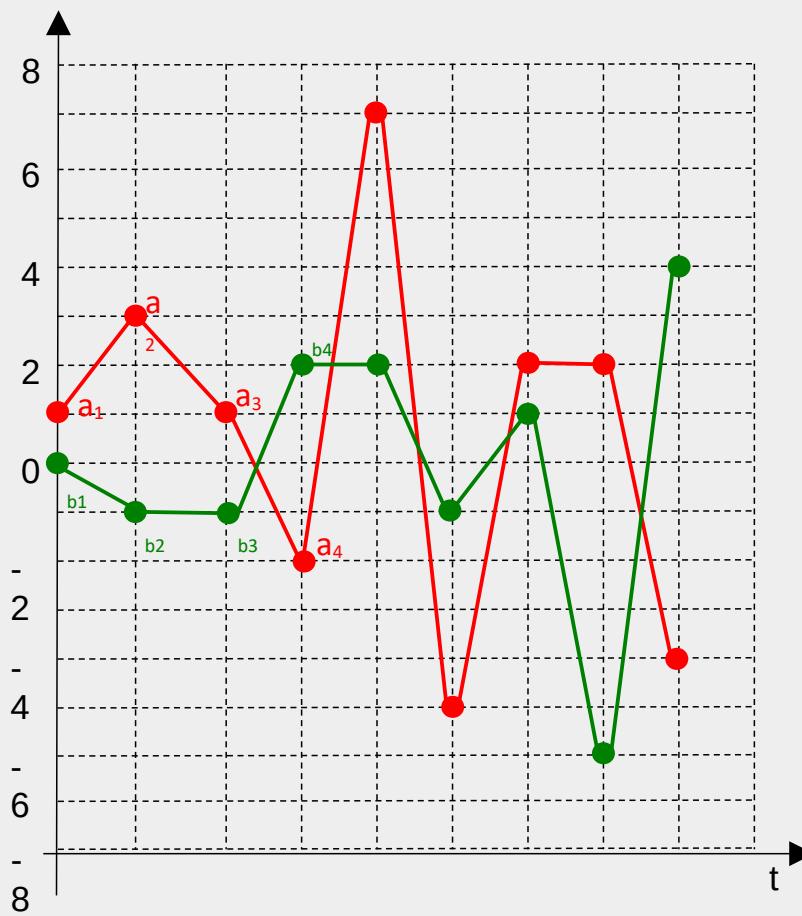
Problem der Synchronisierung



Synchronisierung



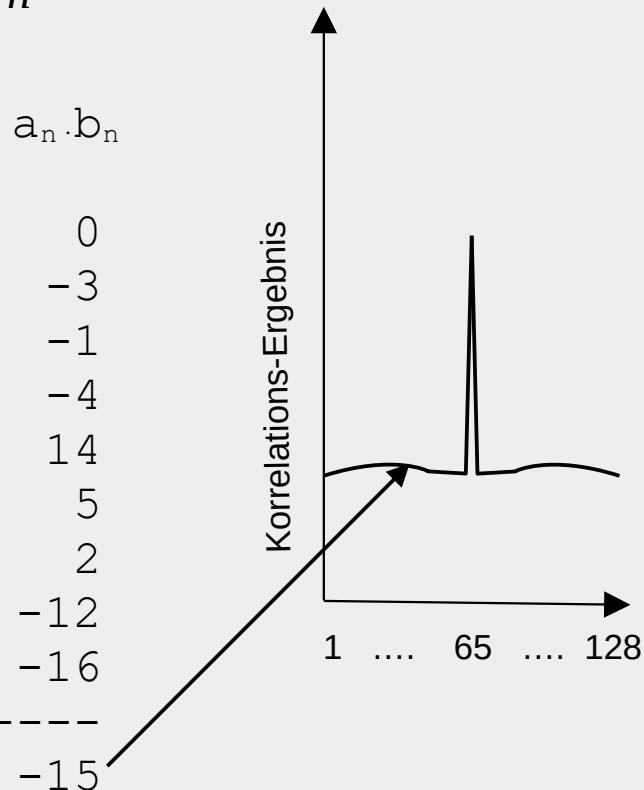
Dekodierung der Daten



$$\sum_{n=1}^{2^S} a_n \cdot b_n$$

$$a_n \times b_n = a_n \cdot b_n$$

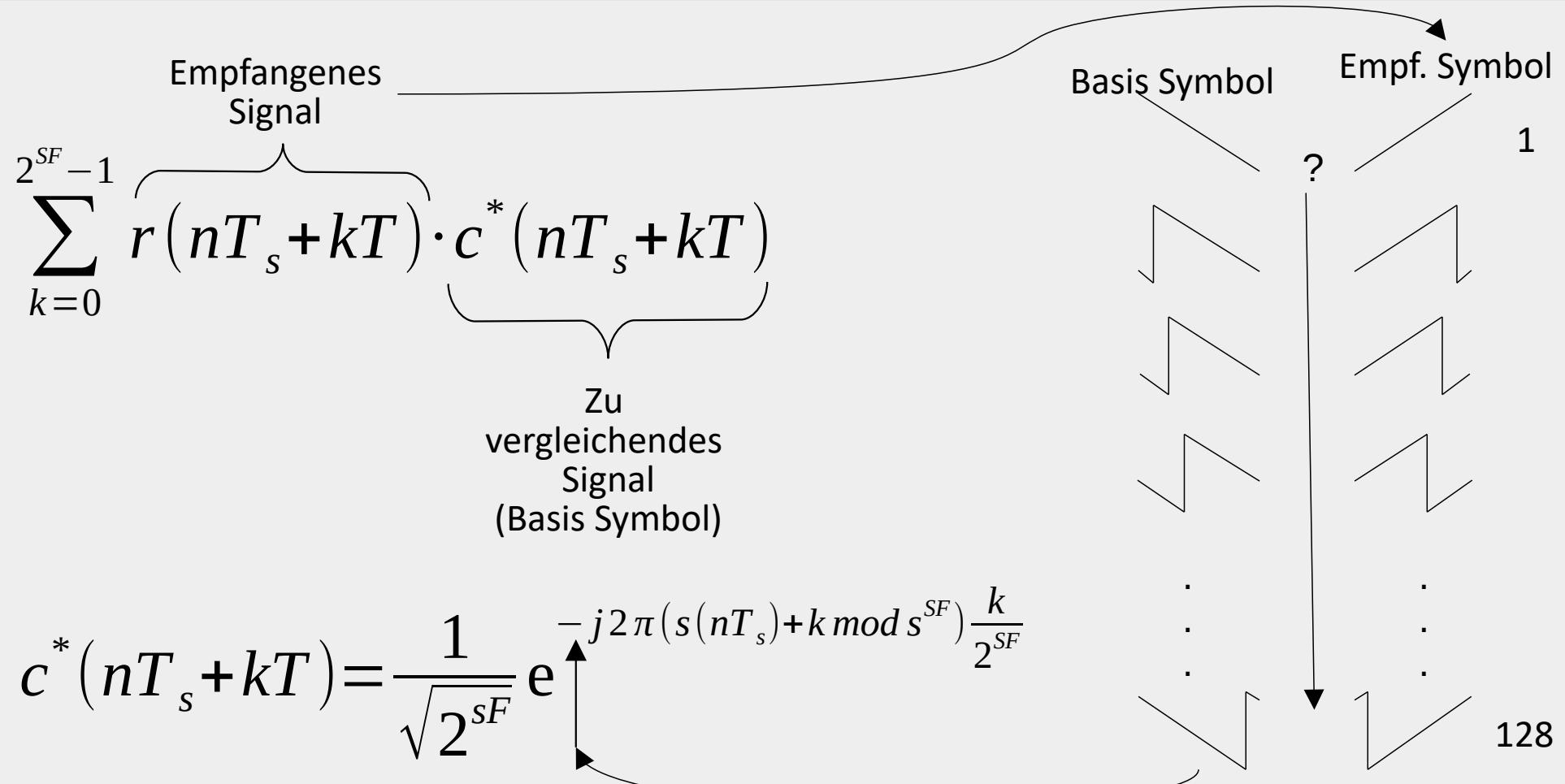
1	\times	0	$=$	0
3	\times	-1	$=$	-3
1	\times	-1	$=$	-1
-2	\times	2	$=$	-4
7	\times	2	$=$	14
-5	\times	-1	$=$	5
2	\times	1	$=$	2
2	\times	-6	$=$	-12
-4	\times	4	$=$	-16



Abarbeitung der Korrelation

$$\sum_{k=0}^{2^{\text{SF}}-1} r(nT_s + kT) \cdot c^*(nT_s + kT)$$

Abarbeitung der Korrelation



Der mathematische Trick

$$c^*(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod s^{SF}) \frac{k}{2^{SF}}}$$

Basis Symbol

Basis Downchirp

$$c^*(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod s^{SF}) \frac{k}{2^{SF}}} + k - k$$

Basis Symbol

Empf. Symbol

$$= \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \left(e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} \right) e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod 2^{SF} - k) \frac{k}{2^{SF}}}$$

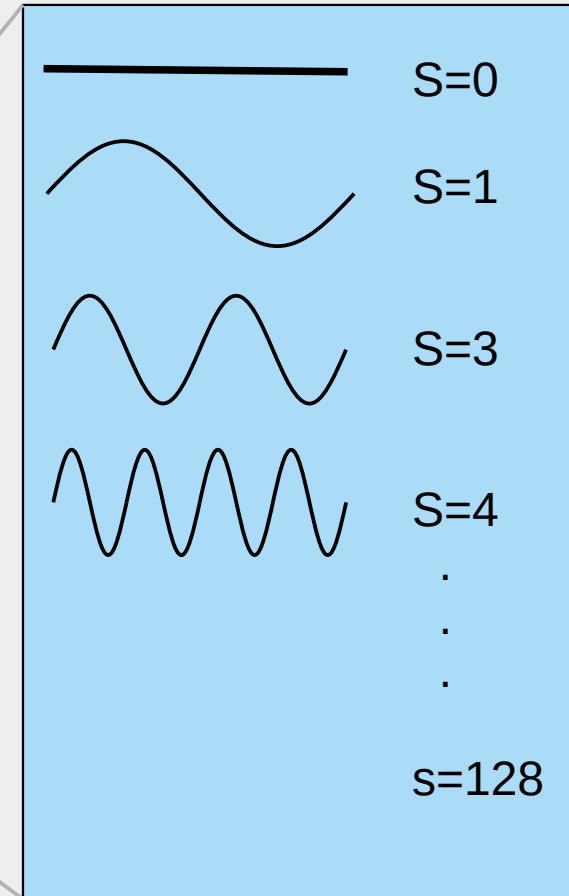
Basis Downchirp Sinuswelle mit der Frequenz s

Umsetzung der Dekodierung

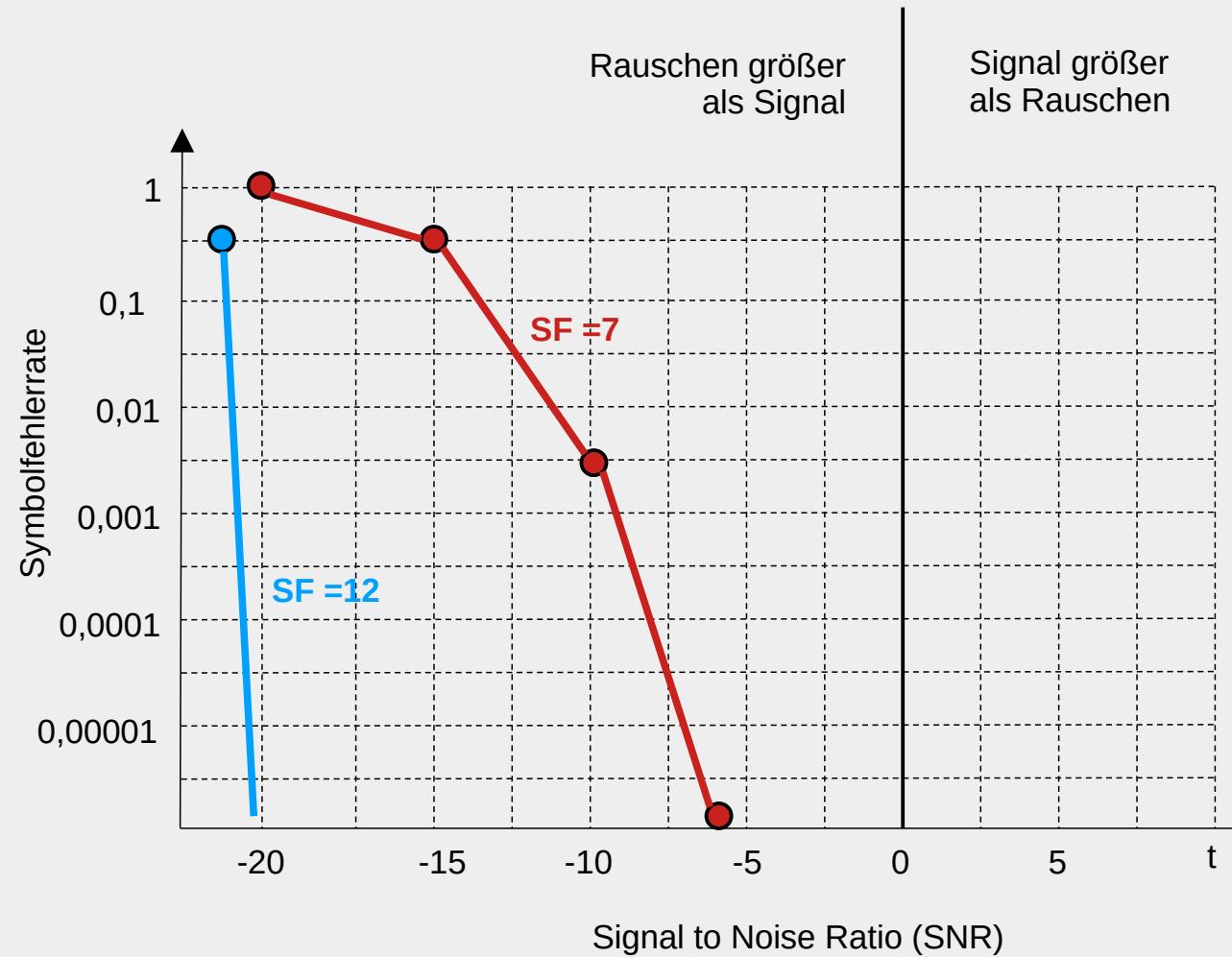
$$= \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \left(e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} \right) e^{-j2\pi (s(nT_s) + k \bmod 2^{SF} - k) \frac{k}{2^{SF}}}$$

Basis Downchirp Sinuswelle mit der Frequenz s

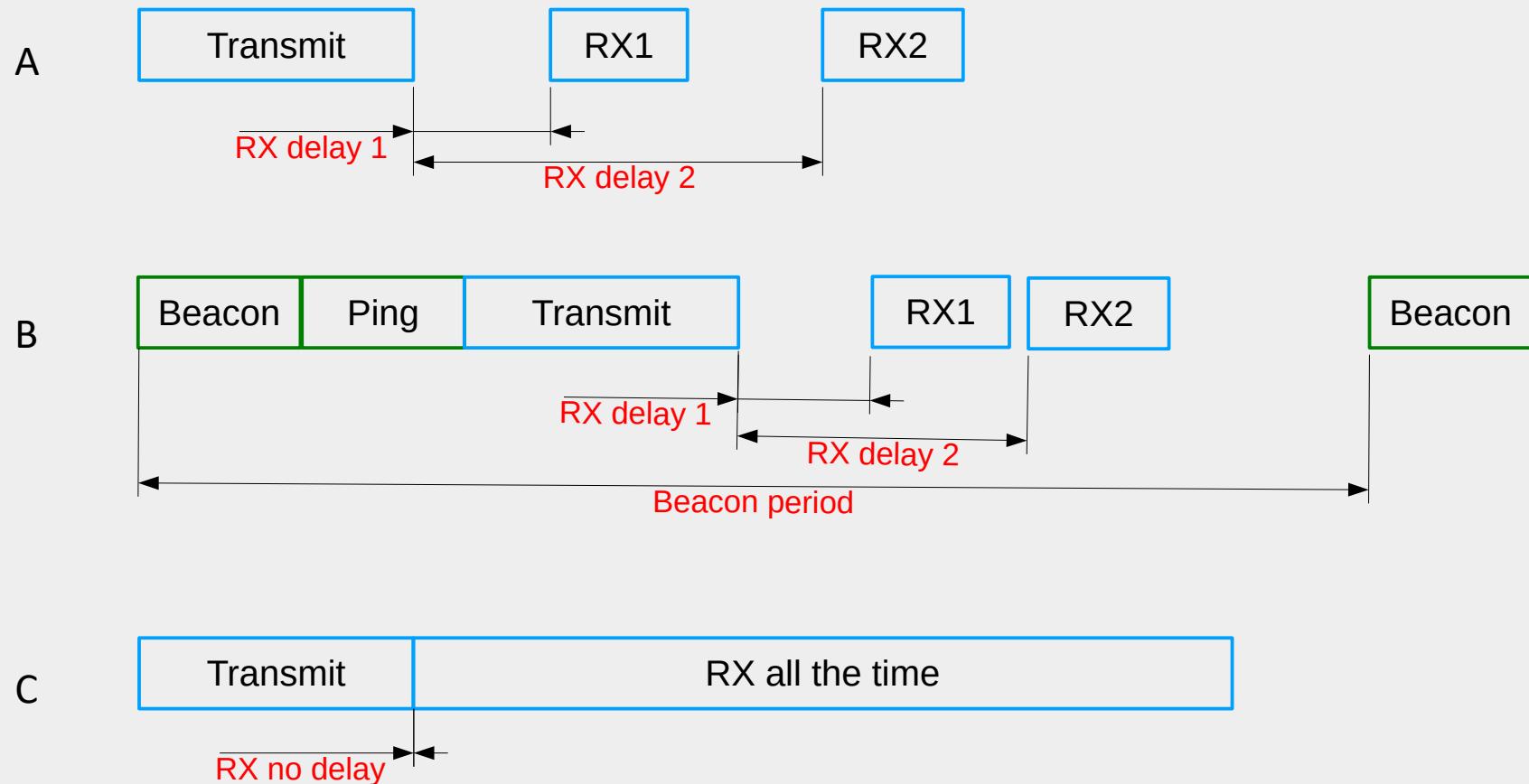
Empfangenes Symbol → Dechirping → FFT → Korrelation



Der mathematische Trick



LoRa-Endgeräte-Klassen



Inhalt

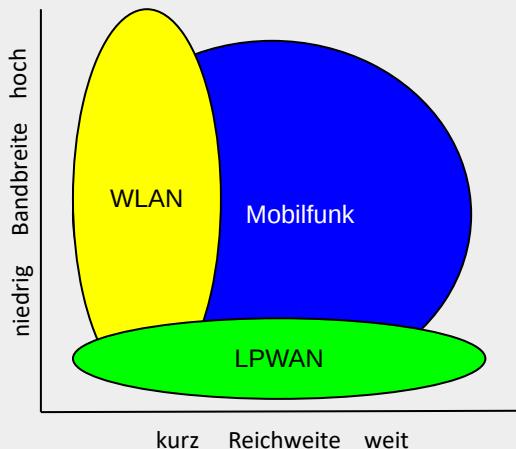
- Einführung
- Netzwerk-Topologie
- Historisches
- Frequenzbereiche
- CSS-Modulation
- Synchronisation
- Dekodierung
- Spreadingfaktor und Symbolfehlerrate
- LoRa-Geräteklassen

LoRaWAN



Stand: 12.05.25

- Einführung
- Netzwerk-Topologie
- Historisches
- Frequenzbereiche
- CSS-Modulation
- Synchronisation
- Dekodierung
- Spreadingfaktor und Symbolfehlerrate
- LoRa-Geräteklassen



Einsortierung:

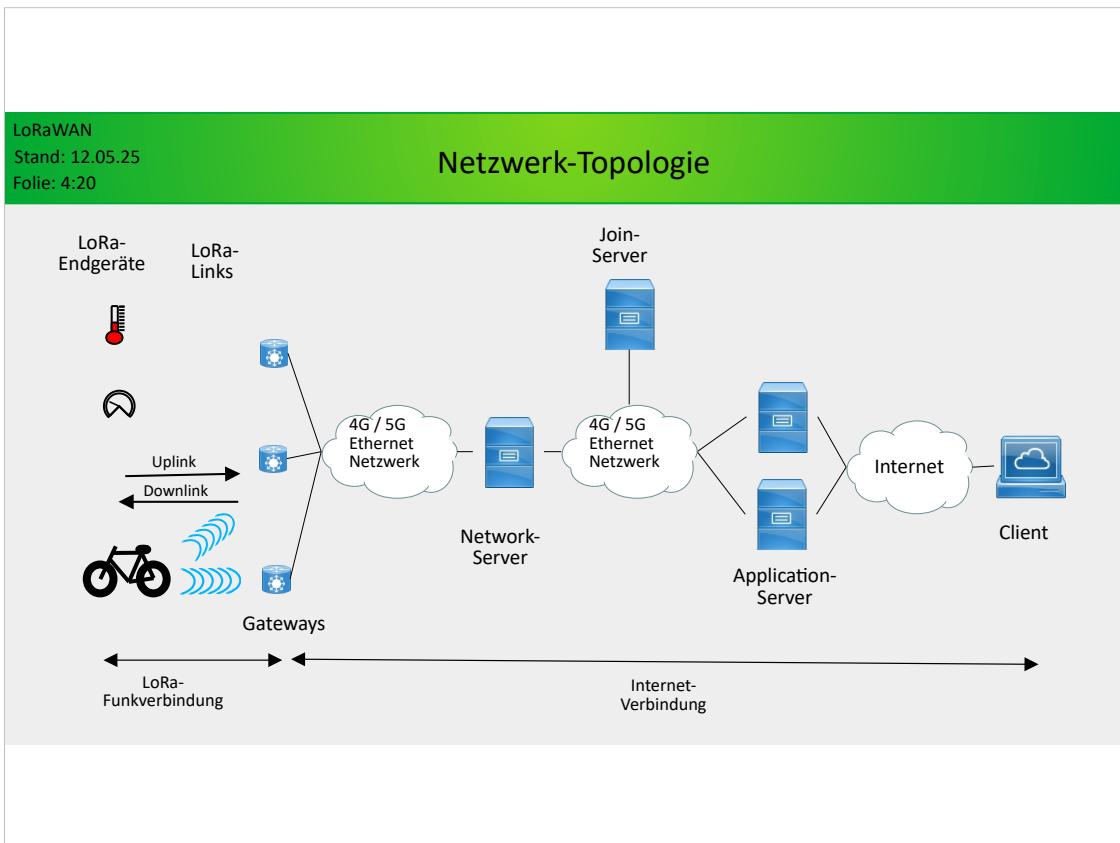
LPWANs wurden mit dem Ziel entwickelt, sehr viele IoT-Sensoren zu vernetzen. Dabei können sie mit billigen Geräten mit relativ kleinen Bandbreiten große Distanzen überbrücken.

LoRa steht für **Long Range**, was ein Hinweis auf eine Funkübertragung mit großen Reichweiten sein soll.

LoRaWAN ist ein offener Funkstandard für ein Low Power Wide Area Networks. (LPWAN).

LoRaWAN wurde auf der LPWAN-Basis konsequent mit den Zielen lange Batterielaufzeit, Erhöhung der Kapazität, größerer Reichweite und geringeren Betriebskosten weiter entwickelt. Mit LoRaWAN sind z. B. Batterielaufzeiten bis zu 10 Jahre möglich.

Mit LoRaWAN ist es möglich, private Netzwerke aufzubauen, oder sich an öffentlichen Netzwerke anzuschließen.



Ein LoRaWAN-Netzwerk hat eine Stern-Topologie. Die LoRa-Endgeräte, auch Nodes oder Devices genannt, sind klassischerweise Sensoren die Informationen aufnehmen, aufbereiten und verschlüsselt über ein LoRa-Gateway weiter senden.

LoRa-Endgeräte bauen eine verschlüsselte Verbindung über ein oder mehrere Gateways zu einem Network-Server auf.

Die Datenübertragung kann über mehrere LoRa-Gateways erfolgen. Bei mehreren gleichen Informationen wird vom Network-Server aussortiert. Die Verwaltung der Verbindungen wird vom Join-Server geregelt.

Die Verbindung vom LoRa-Endgerät zum LoRa-Network-Server heißt Uplink. Die Verbindung in Gegenrichtung wird Downlink genannt. Der Network-Server wählt das beste Gateway für den Downlink aus. Er ändert auch die adaptive Datenrate (ADR) zum LoRa-Endgerät hin. An dieser Stelle werden die Daten vom LoRa-Endgerät entschlüsselt und die Daten zum LoRa-Endgerät hin verschlüsselt.

Da LoRa-Endgeräte normalerweise batteriebetrieben sind, haben sie ausgefeilte Stromsparfunktionen um eine lange Batterielebensdauer zu ermöglichen.

Die Application-Server empfangen die Daten, speichern sie und bereiten sie auf. Die Kommunikation zwischen LoRa-Endgerät und LoRa-Application-Server kann in beiden Richtungen erfolgen. Die Server stellen die Schnittstelle zwischen dem LoRa-Netzwerk und der Anwendungssoftware.

Der Join-Server kümmert sich um die Authentifizierung. Er erzeugt die Schlüssel, verwaltet und verteilt sie. Es gibt zwei Authentifizierungsmethoden. Die Activation-by-Personalization (ABP) und die Over-the-Air-Activation (OTAA).

Bei der ABP-Aktivierung werden eine feste Gerät-Adresse und ein Session-Key für ein vorausgewähltes Netzwerk in das Gerät fest eincodiert. Sie bleiben während der gesamten Lebensdauer eines ABP-Endgerätes gleich. In diesem Modus wird die Join-Prozedur übersprungen. Die Rahmenzähler sollten hierbei nicht geändert oder zurückgesetzt werden, da die Nachrichten von diesen Endgeräten sonst verworfen werden.

Im Gegensatz dazu verhandeln OTAA-Geräte die Rahmenzähler und Sitzungsschlüssel bei jedem Sitzungsaufbau neu aus.

1940 Der deutsche Ingenieur Erich Hüttmann reicht eine Patentschrift für Intrapulsmodulation mit nachfolgender Pulskompression ein.
Die Erfindung wurde zur Verbesserung von Radaranwendungen entwickelt und bildet die Basis für das CHIRP-Spreizspektrum-Verfahren.

2008
Das erste Patent zu LoRa wurde von der französischen Firma Cycleo SAS eingereicht.

2013
Nach dem Aufkauf von Cycleo durch Semtech wurde LoRa weiter entwickelt und als Patent EP2763321 mit dem Titel „Low Power Long Range Transmitter“ eingereicht.

2015
Semtech registriert das Warenzeichen LoRa und die LoRa Alliance kommuniziert die Version 1.0

Inspiriert wurde Erich Hüttmann durch Fledermäuse, die einen ansteigenden Ton aussenden und die Reflexion zur Ortung ihrer Beute nutzen.

Die Erfindung wurde zur Verbesserung von Radaranwendungen entwickelt und bildet die Basis für das CHIRP-Spreizspektrum-Verfahren CHIRP Spread Spectrum (CSS). CHIRP ist die Abkürzung für Compressed High Intensity Radar Pulse. Durch Zufall ergibt chirp aus dem Englischen ins Deutsche übersetzt: tschilpen, zirpen, zwitschern

„Low Power Long Range Transmitter“ beschreibt die Verwendung von CHIRP-Modulation zur Übertragung von Signalen mit geringer Leistung über große Entfernungen.

Frequenzbereiche

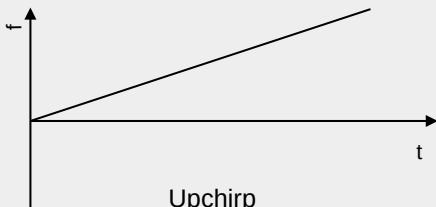
Frequenzbänder im Sub-Ghz-Bereich verwendet.

- 470 – 510 MHz (China)
- 779 – 787 MHz (China)
- 863 – 870 MHz (Europa)
- 902 – 928 MHz (USA)

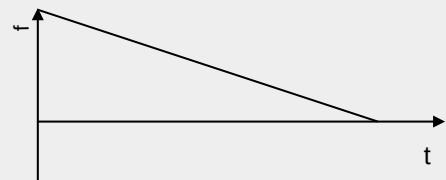
Wie so oft, sind hier regionale Unterschiede zu berücksichtigen.

Region	Frequenzband	EIRP [dBm]	Duty-Cycle
Europa	863 - 870	14	0,1 / 1 / 10 (Sendezzeit: 360ms – max.360s)
USA	902 – 928	26	- (max. 400ms Sendezzeit. Danach Sprung um über 15 Kanäle)
China	470 – 510 779 - 787 920 – 924,5	10	-

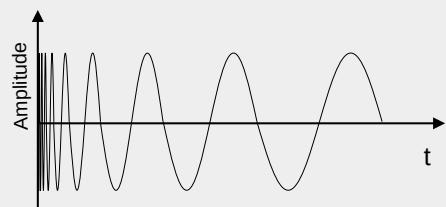
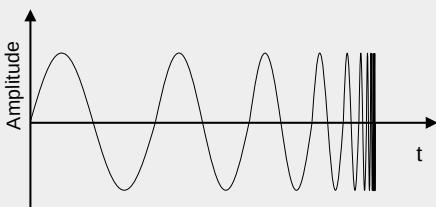
CSS Modulation



Upchirp



Downchirp



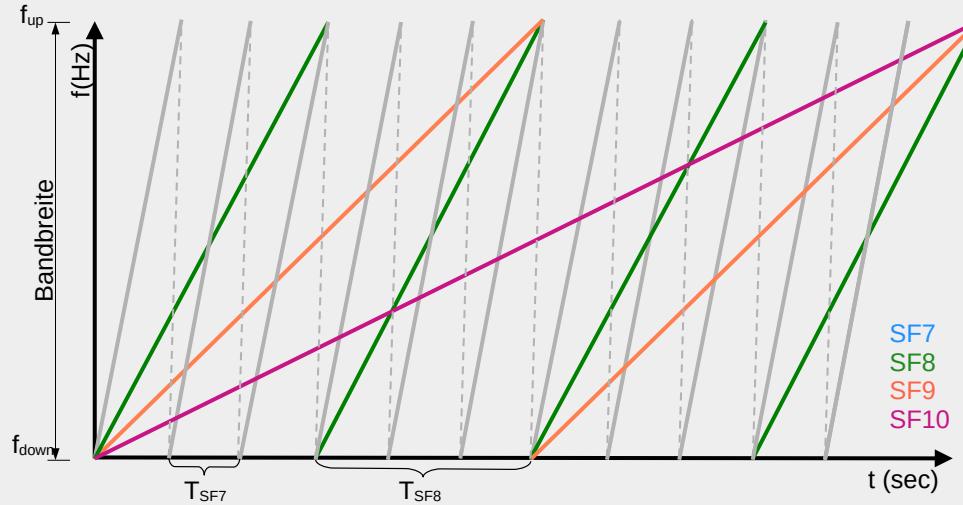
Ein Upchirp wird bei gleichbleibender Amplitude mit einer über der Zeit stetig ansteigenden Frequenz moduliert.

Bei einem stetig absteigenden Frequenz wird von einem Downchirp gesprochen.

Dieses Modulationsverfahren ist robust gegen Kanalrauschen, Frequenzfehler, Mehrwegeeffekte, Fading und Dopplereffekte.

Der Nachteil liegt in der geringen Datenrate zwischen 297 Bits Pro Sekunde und 5140 Bits pro Sekunde bei einer Bandbreite von 125kHz.

Spreizverfahren



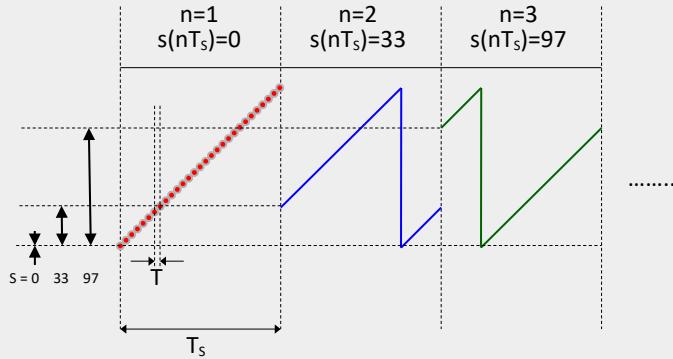
Ein Upchirp beginnt mit seiner Modulation bei einer unteren Grenzfrequenz (f_{down}) und steigt bis zu einer oberen Grenzfrequenz (f_{up}) an. Dabei ist die Steigung vom Spreizfaktor (SF) abhängig.

Bei LoRaWAN werden Spreizfaktoren von 7 (SF7) bis 12 (SF12) verwendet.
Es können pro Symbol 2^{SF} Bits kodiert werden.

Beim SF7 werden somit $2^7 = 128$ Bits kodiert.
Bei SF8 sind es 256 Bits usw.

Symboldarstellung

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod 2^{SF}) \frac{k}{2^{SF}}}$$



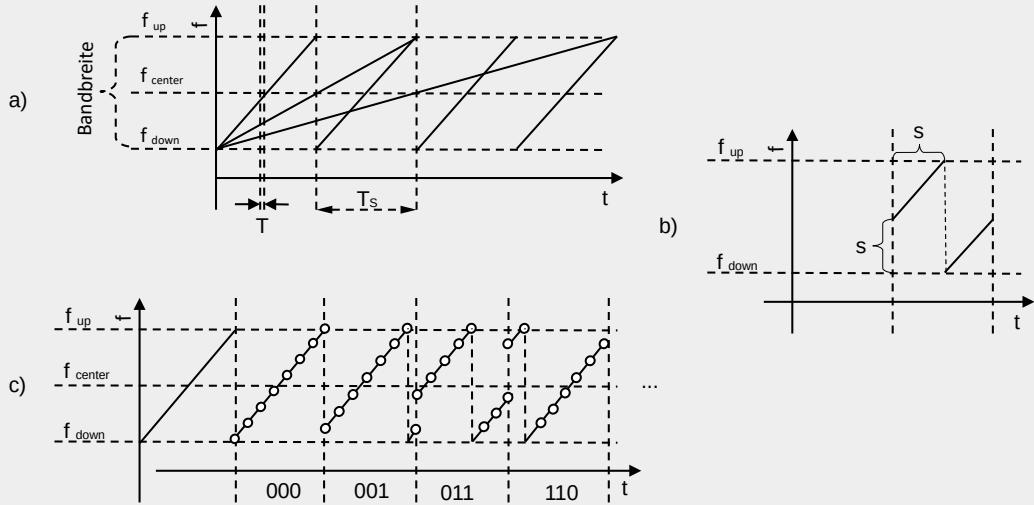
Mathematisch gesehen, lässt sich ein Symbol als Funktion von s beschreiben. (links oben)

Wobei T_s die Symboldauer ist und T das Abtastintervall. Die Symbolnummer wird mit s bezeichnet. Nach jeder Abtastung wird k inkrementiert. Durch $k \bmod 2^{SF}$ wird die Frequenz, beim Erreichen der Oberen Grenzfrequenz, auf die untere Grenzfrequenz zurückgesetzt.

Das ergibt eine Unterbrechung, die je nach Symbol, an einer anderen Stelle auftritt und deshalb als Kennzeichnung eines Symbols verwendet werden kann.

Wie zu sehen ist, hat jedes Symbol eine eigene Startfrequenz. Damit kann s auch als Startfrequenz, oder Startpunkt einer Chirp-Wellenform angesehen werden.

Kodierung von Symbolen



In Abbildung a) ist zu sehen, dass die Dauer eines Symbols T_S vom Spreizfaktor (SF) abhängt. Das Abtastintervall T ist die Zeit zwischen zwei Abtastungen. Auch hier ist zu sehen, dass je größer der Spreizfaktor ist umso mehr Abtastpunkte können zur Anwendung kommen und umso mehr Bits können pro Symbol kodiert werden. Bei einem SF von 7 können 7 Bits kodiert werden. Bei einem SF von 8 können 8 Bits kodiert werden. Usw.

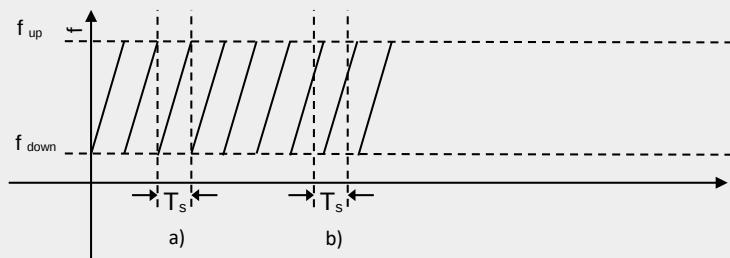
Abbildung b) zeigt wie die Symbole an der Startfrequenz (s) unterschieden werden können. Je höher der Wert des Symbols desto höher ist die Startfrequenz. Erreicht die Frequenz die obere Grenzfrequenz wird nach einem Sprung auf die untere Grenzfrequenz das Symbol weiter übertragen. Interessant dabei ist, dass die Startfrequenz eines Symbols auch die Endfrequenz ist.

In Abbildung c) ist beispielhaft dargestellt, wie unterschiedliche Symbole kodiert werden. Dabei wird ein SF von 3 angenommen was dazu führt dass 8 unterschiedliche Symbole dargestellt werden können.

Das Symbol mit der Kodierung 000 beginnt bei der unteren Grenzfrequenz. Das Symbol mit der Kodierung 001 beginnt mit der nächst höheren Startfrequenz. Kurz vor Ende der Symboldauer springt die Frequenz von f_{up} auf f_{down} und steigt am Ende des Symbols auf die Startfrequenz des Symbols an.

Bitte beachten, dass es einen Spreizfaktor von 3 bei LoRaWAN nicht gibt. SF3 wurde an dieser Stelle nur zur einfacheren Darstellung gewählt. Bei LoRaWAN werden Werte von SF6 bis SF12 verwendet!

Problem der Synchronisierung



Irgendwo fängt ein Symbol an. Doch wo ist das?

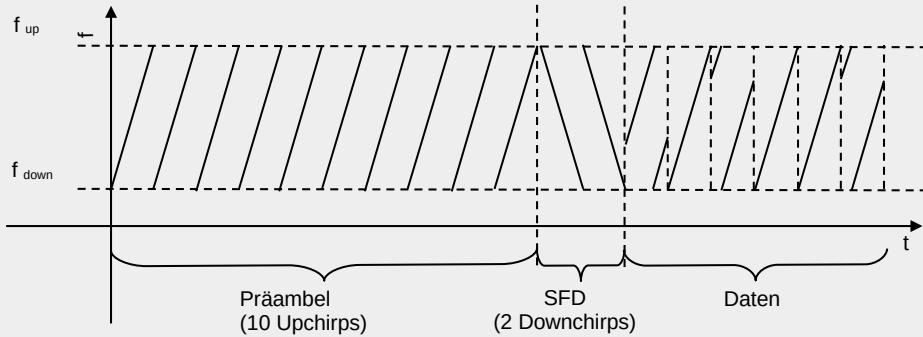
Um zu wissen welche Kodierung ein Symbol hat, muss der Anfang bekannt sein.

In der Folie ist das Problem nochmals dargestellt.

Im Fall a) ist das Symbol sauber auf den Start bei der unteren Grenzfrequenz ausgerichtet.

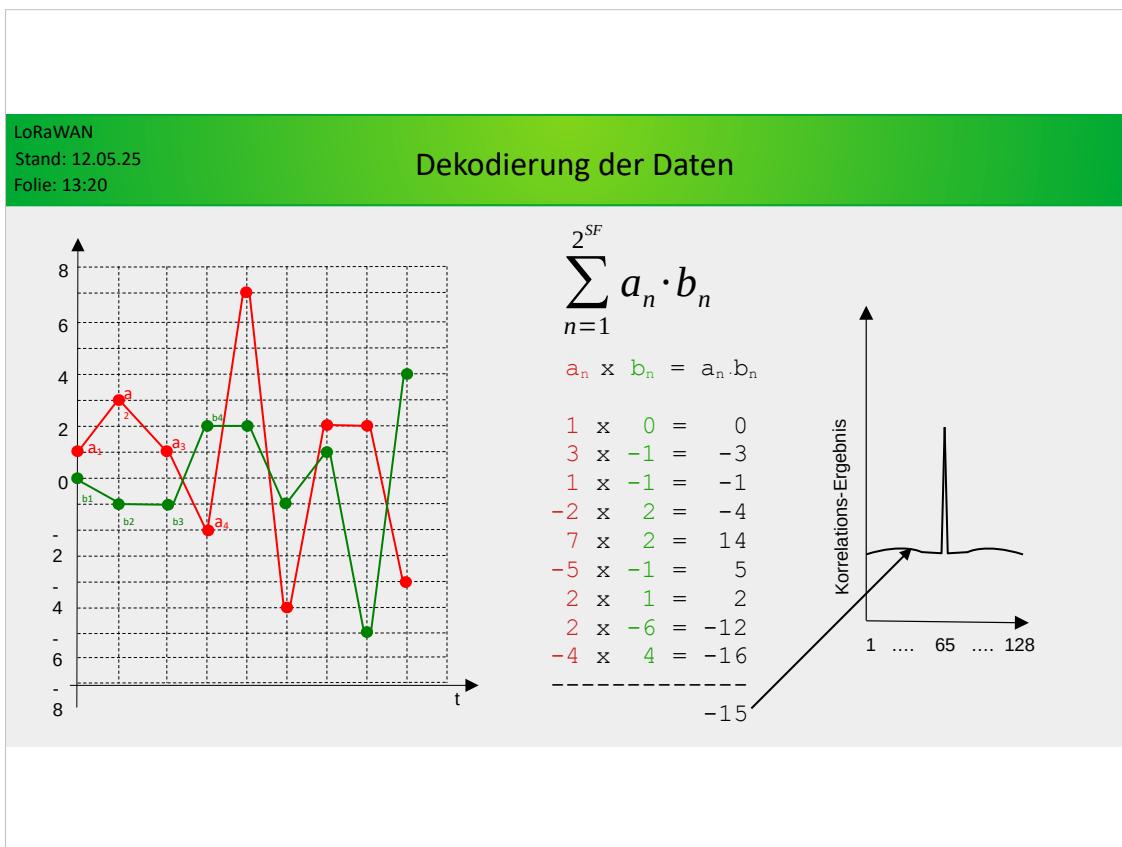
Im Fall b) ist zu sehen, dass der Symbolbeginn später stattfindet und somit eine andere Codierung erfolgt. Hierbei spricht man von einem Misalignment.

Synchronisierung



Da alle Symbole als Daten interpretiert werden, greift man, wie bei vielen anderen Lösungen, beim Beginn einer Übertragung auf die Anwendung einer Präambel zurück.

Dabei werden z. B. wie in der Folie mehrere gleiche Upchirps gefolgt von 2 Downchirps gesendet. Die Kodierung der Upchirps ergibt unter Umständen einen Wert der als Versatz interpretiert werden kann um die richtige Symbolausrichtung einzustellen.



Bei der Dekodierung der Symbole könnte das Prinzip der Korrelation verwendet werden.

Dabei werden die empfangenen Abtastwerte (a_n) mit den bekannten möglichen Werten (b_n) korreliert. Dazu wird für jede Abtastung eines Symbol das innere Produkt aus empfangenen Abtastwert und den Abtastwerten der bekannten Basissymbole ermittelt und symbolweise aufaddiert. Bei dem Basissymbol mit der größten Übereinstimmung ergibt sich der größte Korrelationswert. In der Folie auf der rechten Seite ist es der Wert 65.

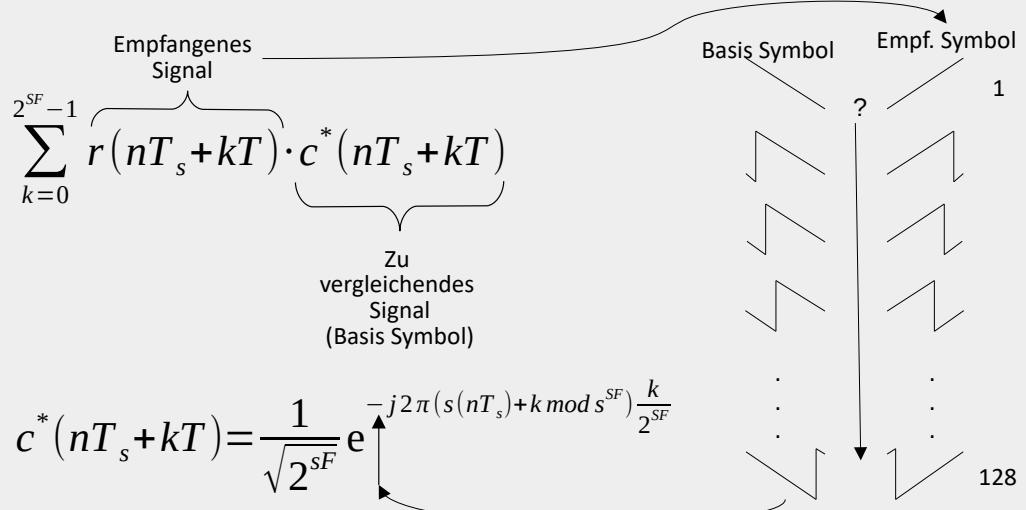
Für die Abarbeitung der Korrelation müsste die folgenden Formel abgehandelt werden. Hier stellt $r(nT_s + kT)$ die Abtastung eines empfangenen Symbols dar. $c^*(nT_s + kT)$ ist das zu vergleichende Basissymbol. Die Bearbeitung erfolgt von $k = 0$ bis $2^{SF} - 1$.

$$\sum_{k=0}^{2^{\text{SF}}-1} r(nT_s+kT) \cdot c^*(nT_s+kT)$$

Da bei einem SF von 7 bei dieser Vorgehensweise $2^7 * 2^7$, also 16384 Abtastwerte, pro Symbol verglichen werden müssten, ist es leicht ersichtlich, dass diese Vorgehensweise sehr rechenintensiv ist und somit keinen realistischen Weg darstellt.

Ein wesentlich einfacherer Weg wurde durch einen mathematischen Trick gefunden und im Folgenden erläutert.

Abarbeitung der Korrelation



Ein wesentlich einfacherer Weg wurde durch einen mathematischen Trick gefunden und im Folgenden erläutert.

Da es sich um ein komplexes Signal handelt, kann als zu vergleichenden Basissignal das konjugierte Symbol angewandt werden.

Der mathematische Trick

$$\begin{aligned}
 c^*(nT_s + kT) &= \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod s^{SF}) \frac{k}{2^{SF}}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod s^{SF} + k - k) \frac{k}{2^{SF}}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \left(e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} \right) e^{-j2\pi(s(nT_s) + k \bmod 2^{SF} - k) \frac{k}{2^{SF}}}
 \end{aligned}$$

Basis Symbol
 Basis Downchirp
 Sinuswelle mit der Frequenz s

Basis Symbol
 Empf. Symbol
 ?
 1
 .
 .
 .
 128

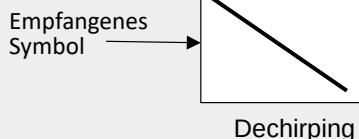
Die Konjugierte Form wird durch das Minus (-) in der Exponentialschreibweise des Basissymbols hergestellt. (-j2...)

Fügt man nun in den Term zur Beschreibung des Basissymbols ein +k und ein -k ein, ändert sich mathematisch nichts. Allerdings kann dann der Term in zwei Exponentialfunktionen aufgeteilt werden. Die linke e-Funktion entspricht einem Basis-Downchirp. Die rechte e-Funktion entspricht einer einfachen Sinuswelle mit der Frequenz s.

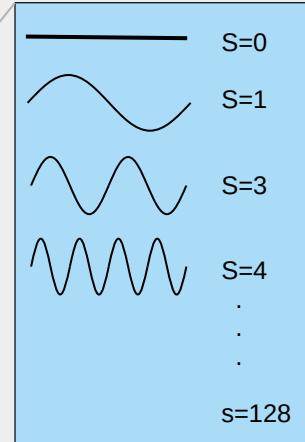
Umsetzung der Dekodierung

$$= \frac{1}{\sqrt{2^{\text{SF}}}} \left(e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{\text{SF}}}} \right) e^{-j2\pi (s(nT_s) + k \bmod 2^{\text{SF}} - k) \frac{k}{2^{\text{SF}}}}$$

Basis Downchirp Sinuswelle mit der Frequenz s



Korrelation

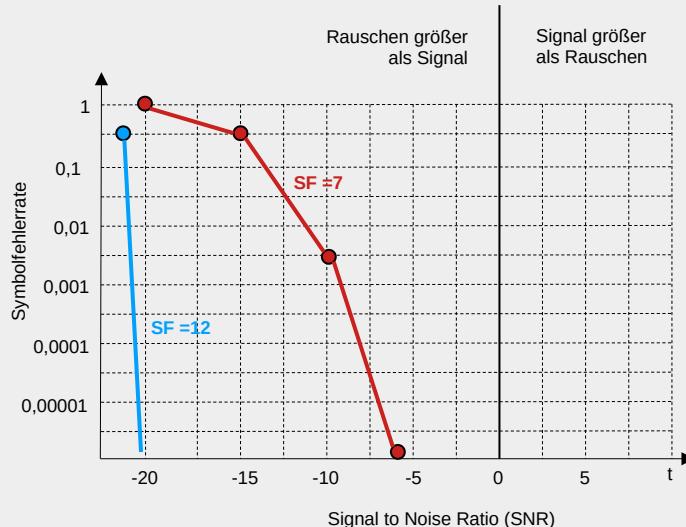


Damit kann die Korrelationsbearbeitung wesentlich vereinfacht werden. Zuerst muss das empfangene Symbol mit einem Basis Downchirp multipliziert werden. Das wird als **Downchirping** Bezeichnet.

Danach kann mit einer **Diskreten Fourier Transformation** (DFT) aus der Sinuswelle mit der Frequenz s, die Frequenz ermittelt werden. Die DFT kann als **Fast Fourier Transformation** (FFT) einfach bearbeitet werden. Das Ergebnis ist die Frequenz der Sinuswelle, was der Dekodierung des Symbols entspricht.

Damit kann die aufwändige Korrelationsbearbeitung in eine Multiplikation mit einem Basis Downchirp und einer FFT zerlegt werden, was einer wesentlichen Vereinfachung der Bearbeitung entspricht. So ist es möglich, einen Empfänger zu bauen der weniger Ressourcenanforderungen hat und wesentlich weniger Energie verbraucht.

Der mathematische Trick

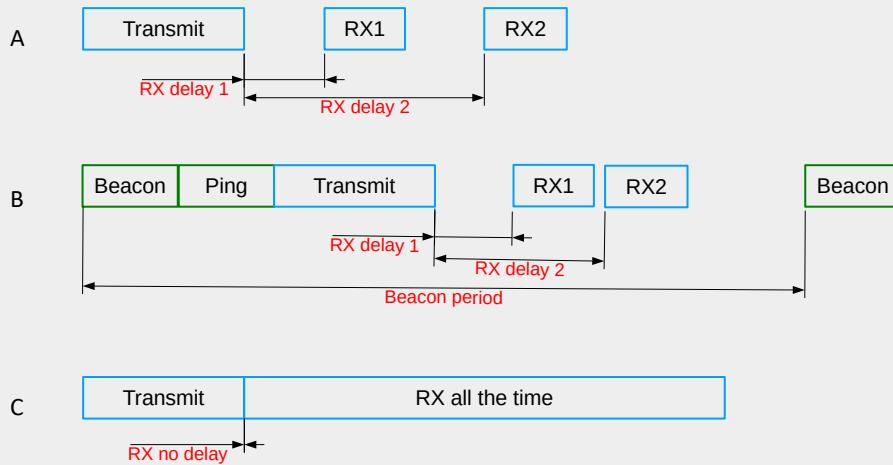


Im Diagramm ist die Symbolfehlerrate (was der Bit Error Rate entspricht) über dem Signal zu Rauschen Verhältnis dargestellt.

Bei einem Wert von 0 auf der x-Achse ist das Signal genauso groß wie das Rauschen. Das bedeutet, dass links vom 0-Wert das Rauschen größer ist als das Signal. Das bedeutet, dass das Signal im Rauschen unter gegangen ist.

Je nach Spreading Faktor (SF) kann auch bei einem winzigen Signal immer noch die Fehlerrate klein gehalten werden (SF=12)

LoRa-Endgeräte-Klassen



Damit die LoRa-Endgeräte möglichst flexibel Daten in beiden Richtungen bearbeiten können, wurden sie in 3 Klassen eingeteilt.

Klasse A

Diese Klasse wird von den meisten LoRa-Endgeräten verwendet, denn sie ist die stromsparendste. Die Endgeräte senden zu bestimmten Zeitpunkten Daten an den Application-Server. Danach öffnen sie zwei Zeitfenster in denen sie Daten empfangen können um eventuelle Quittungen oder Steuerinformationen zu empfangen.

Klasse B

Diese Klasse bietet zusätzlich zur Klasse A eine Zeitgesteuerte Kommunikation. Das Endgerät empfängt zu festgelegten Zeiten (Beacon-Intervall) Daten unabhängig davon ob Daten zu senden sind oder nicht. Damit wird die Erreichbarkeit erhöht, jedoch der Stromverbrauch.

Klasse C

Die Endgeräte der Klasse C sind immer im Empfangsmodus. Da bei dieser Klasse die Batterie-Lebensdauer stark verkürzt ist, werden die Endgeräte mit einer eigenen Stromversorgung ausgestattet. Die Erreichbarkeit und die Zuverlässigkeit sind dafür am größten.

- Einführung
- Netzwerk-Topologie
- Historisches
- Frequenzbereiche
- CSS-Modulation
- Synchronisation
- Dekodierung
- Spreadingfaktor und Symbolfehlerrate
- LoRa-Geräteklassen