

AFU-Kurs SS26

Termin 4

- Analoge Modulatorschaltungen
- Digitale Übertragungsverfahren
- Digitale Signalverarbeitung





Bitte abholen !





Terminvorschlag: BNetzA Prüfung



07.08.2026 um 10 Uhr

- Voraussichtlicher Prüfungsort:

Hörsaal Physik 28D 001 (4284|101)

1. Obergeschoss

Sommerfeldstraße 16

52074 Aachen

- Max. 50 Teilnehmende!



Prüfungsmodus für 4 ECTS

Leistungsnachweis

Testierte Praktika

Ausbildungs-
funkbetrieb
„erstes QSO“

Entwurf und
Aufbau einer
diskreten
Filterschaltung

Messen einer
Filterschaltung

&

Theorieprüfung

BNetzA Prüfung Klasse A

- Bestätigung durch HAREC
- Bescheinigung Klasse A

oder

Schriftliche RWTH Prüfung

- 90 min
- Multiple Choice



Ankündigung Praxisversuche

Zur Erlangung von 4 ECTS ist u.a. die Teilnahme an drei Praxisversuchen erforderlich. Die Gruppe wird geteilt!

Termin	Fensterseite	Wandseite
18.05.	<ul style="list-style-type: none">Entwurf und Aufbau einer diskreten FilterschaltungMessen einer Filterschaltung	<ul style="list-style-type: none">Ausbildungs-Funkbetrieb
01.06.	<ul style="list-style-type: none">Ausbildungs-Funkbetrieb	<ul style="list-style-type: none">Entwurf und Aufbau einer diskreten FilterschaltungMessen einer Filterschaltung
08.06.	Falls noch nicht abgeschlossen: <ul style="list-style-type: none">Messen einer Filterschaltung	

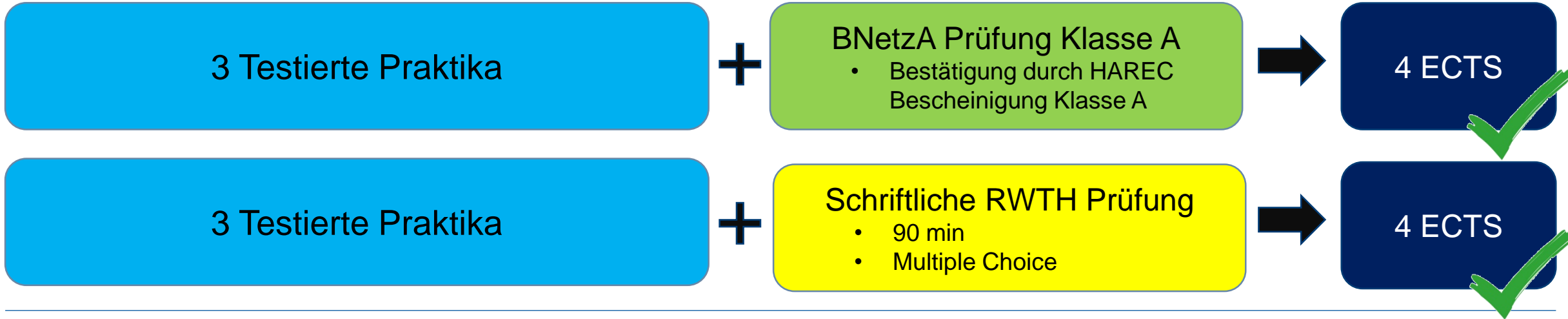
Skript zu Filtern rechtzeitig lesen!

Die erfolgreiche Teilnahme wird **TESTIERT!**



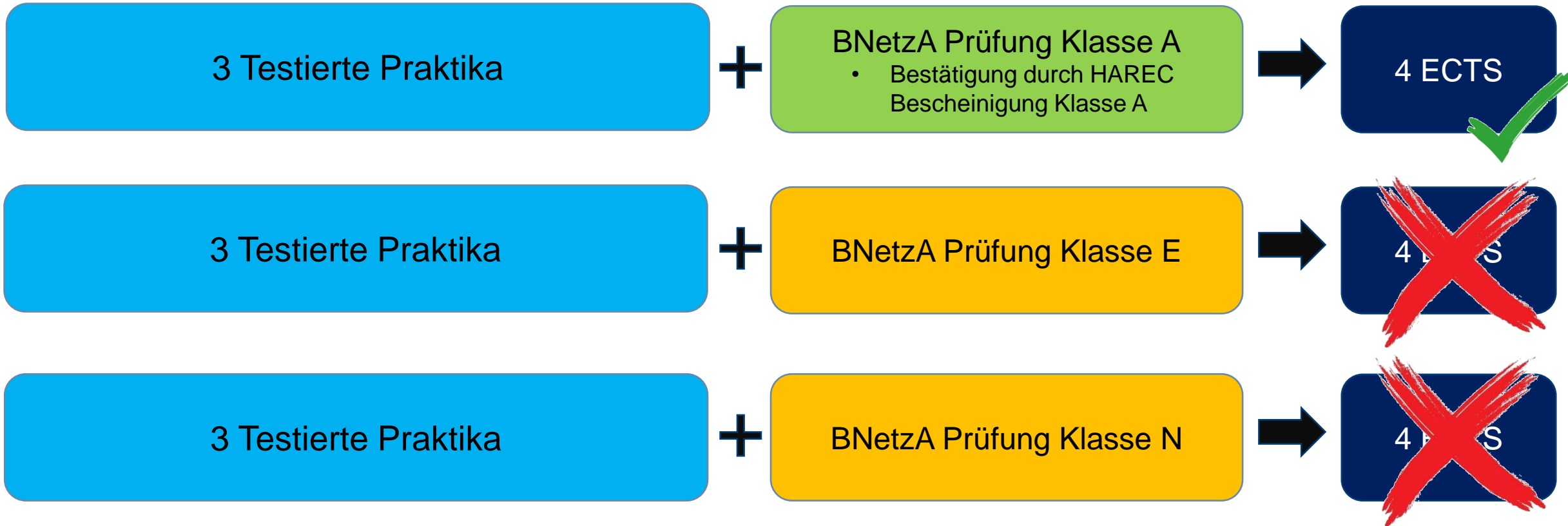


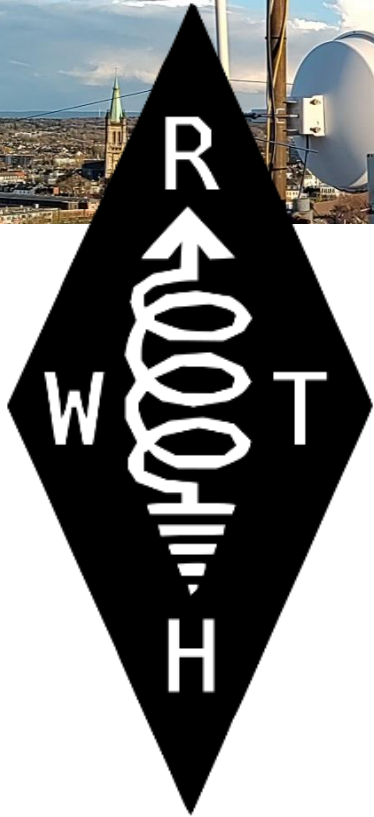
Prüfungsmodus für 4 ECTS





Leistungsnachweis Funkamateure Klasse A





AFU-Kurs WS25/26

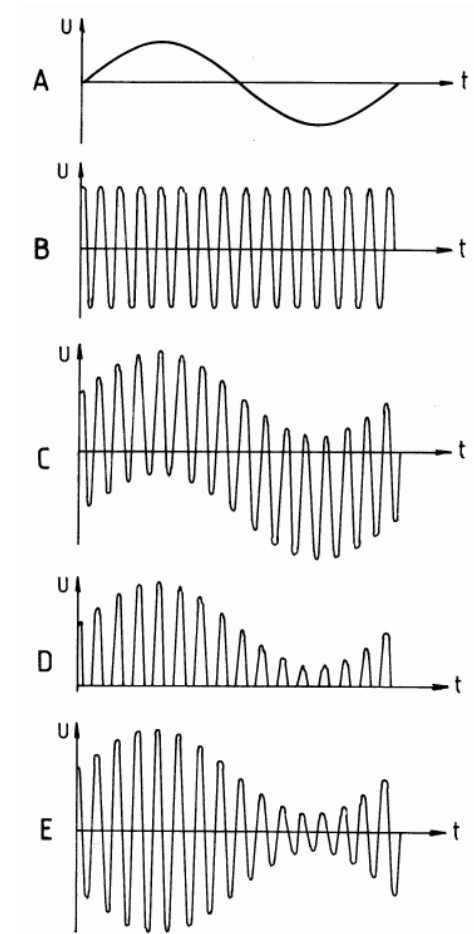
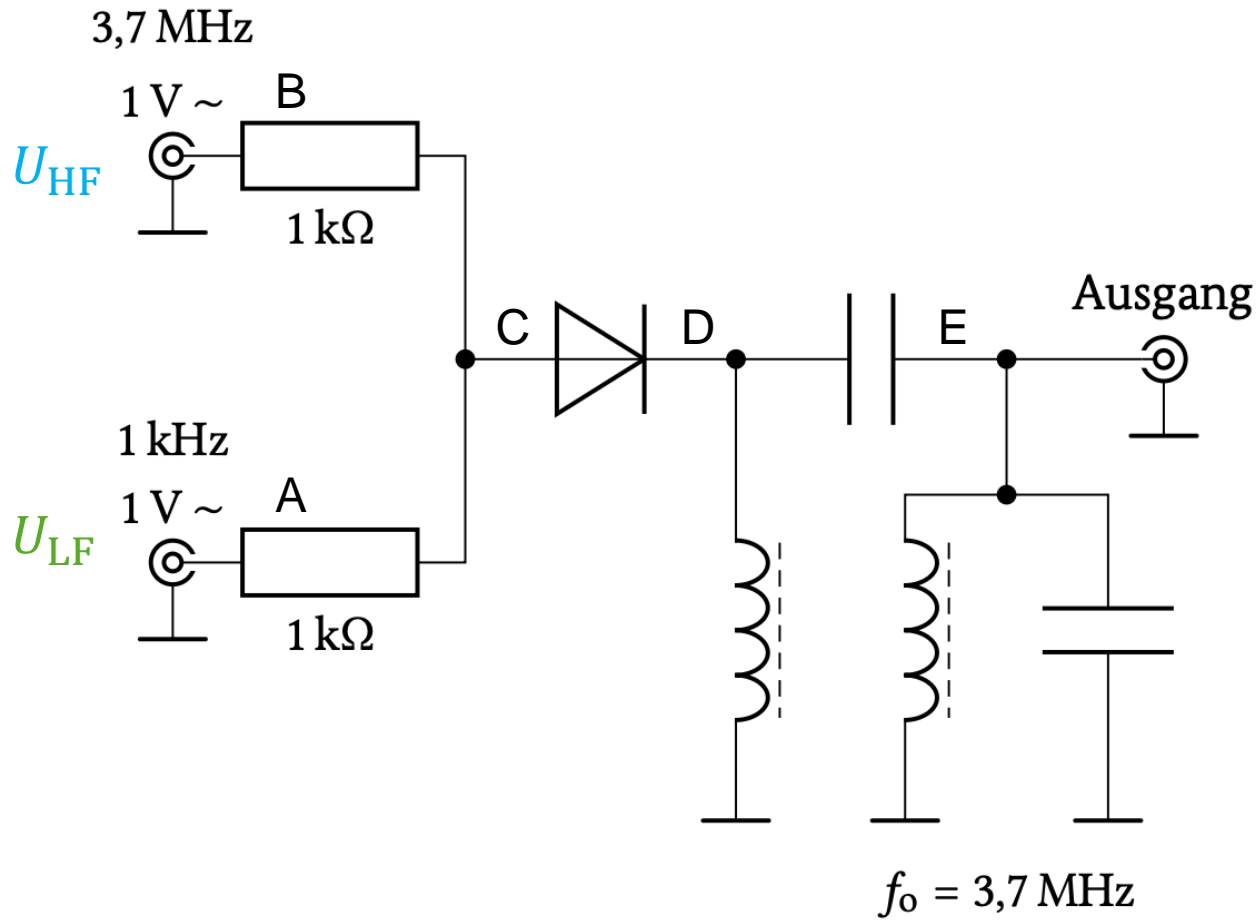
Termin 4

- **Analoge Modulatorschaltungen**
- Digitale Übertragungsverfahren
- Digitale Signalverarbeitung



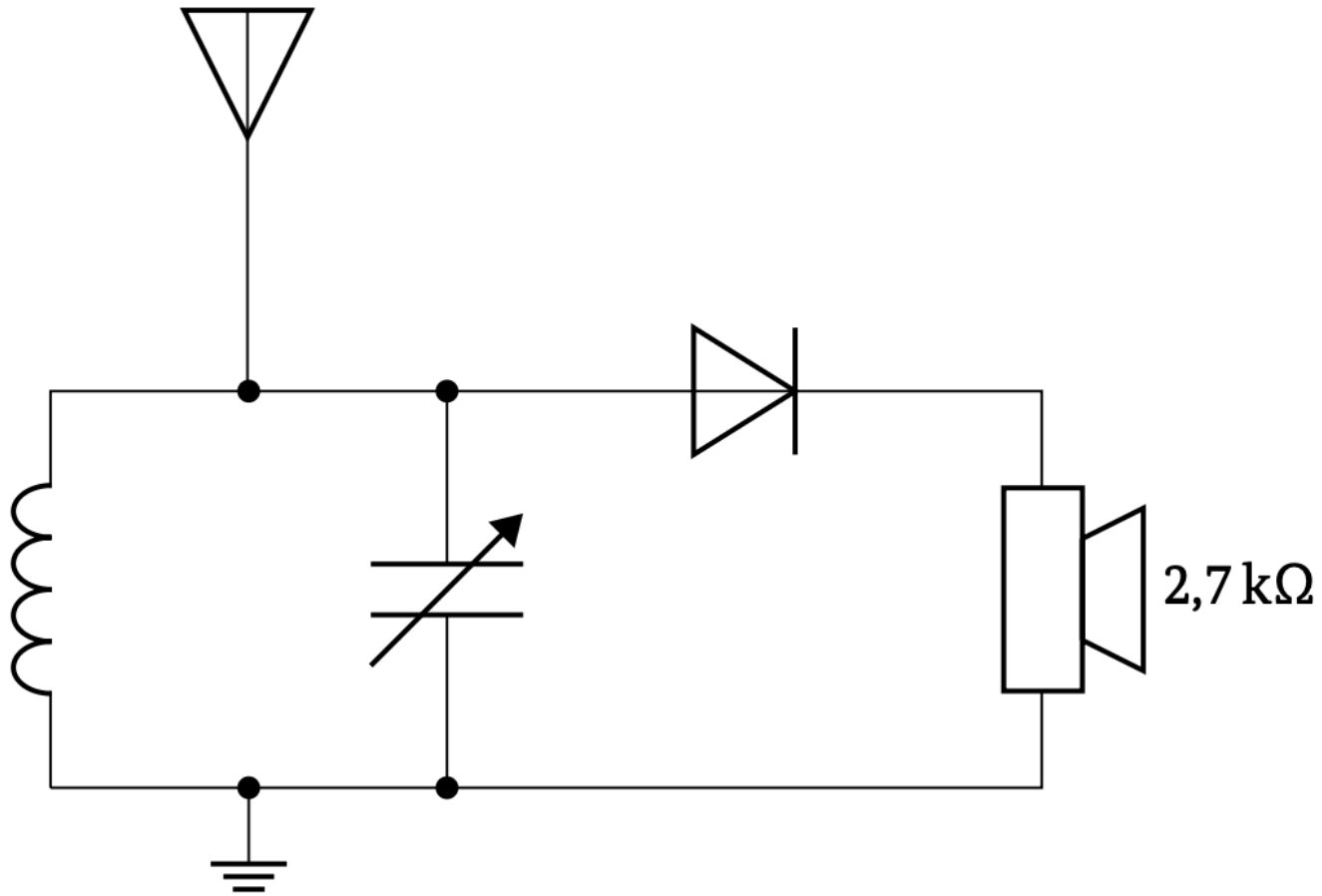


Modulatorschaltung AM





Detektorempfänger



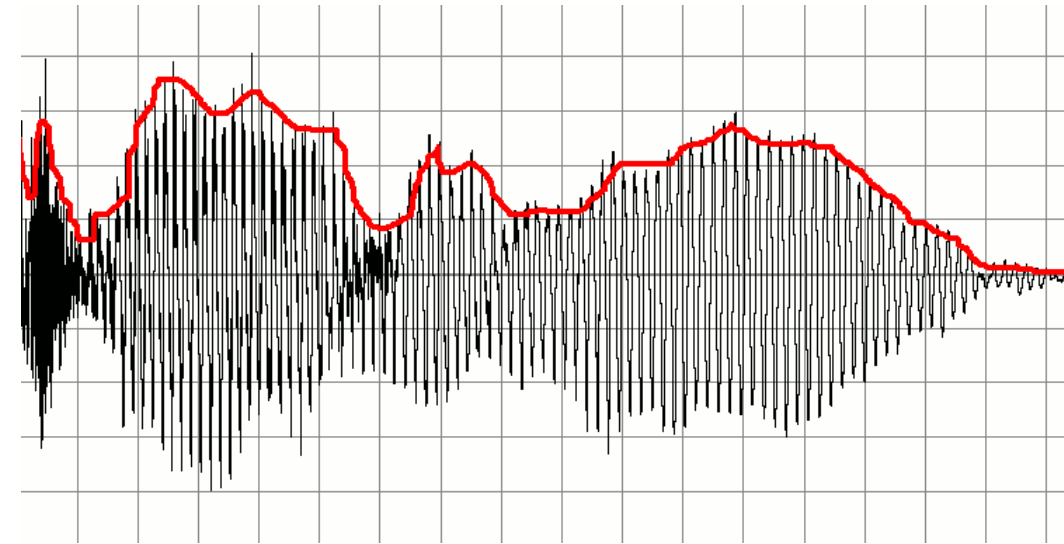
Wikipedia (Joe Haupt)

- Vollkommen passiv
- Bandpass und Gleichrichtung

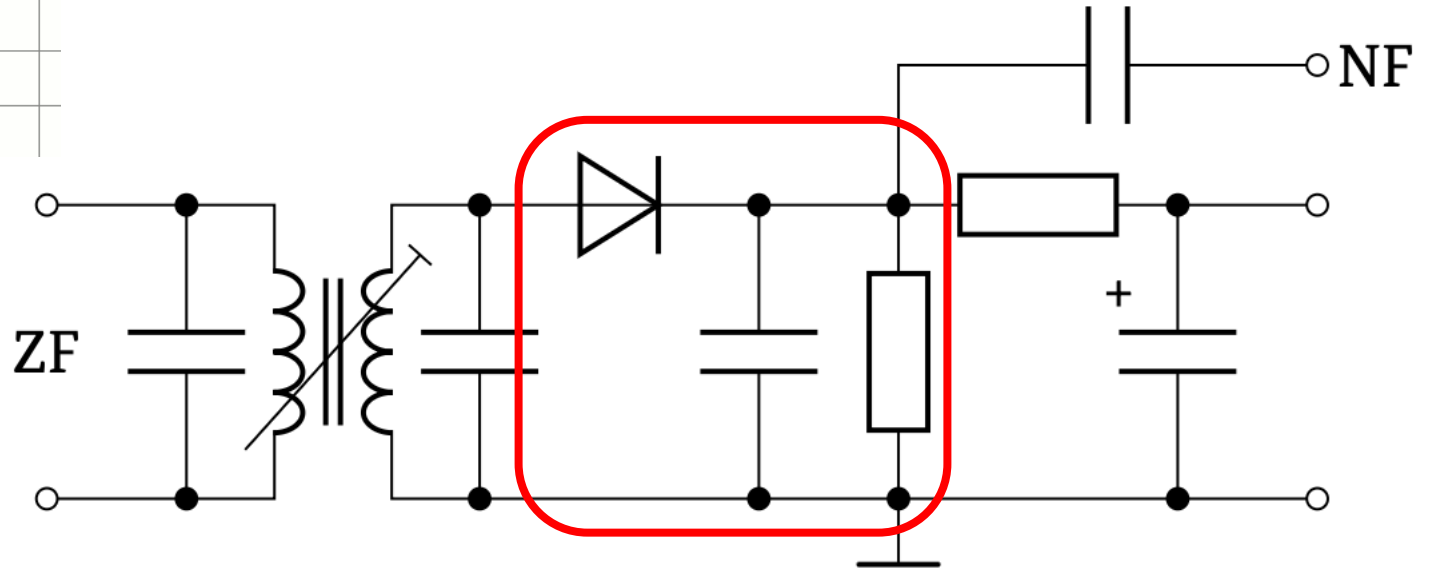




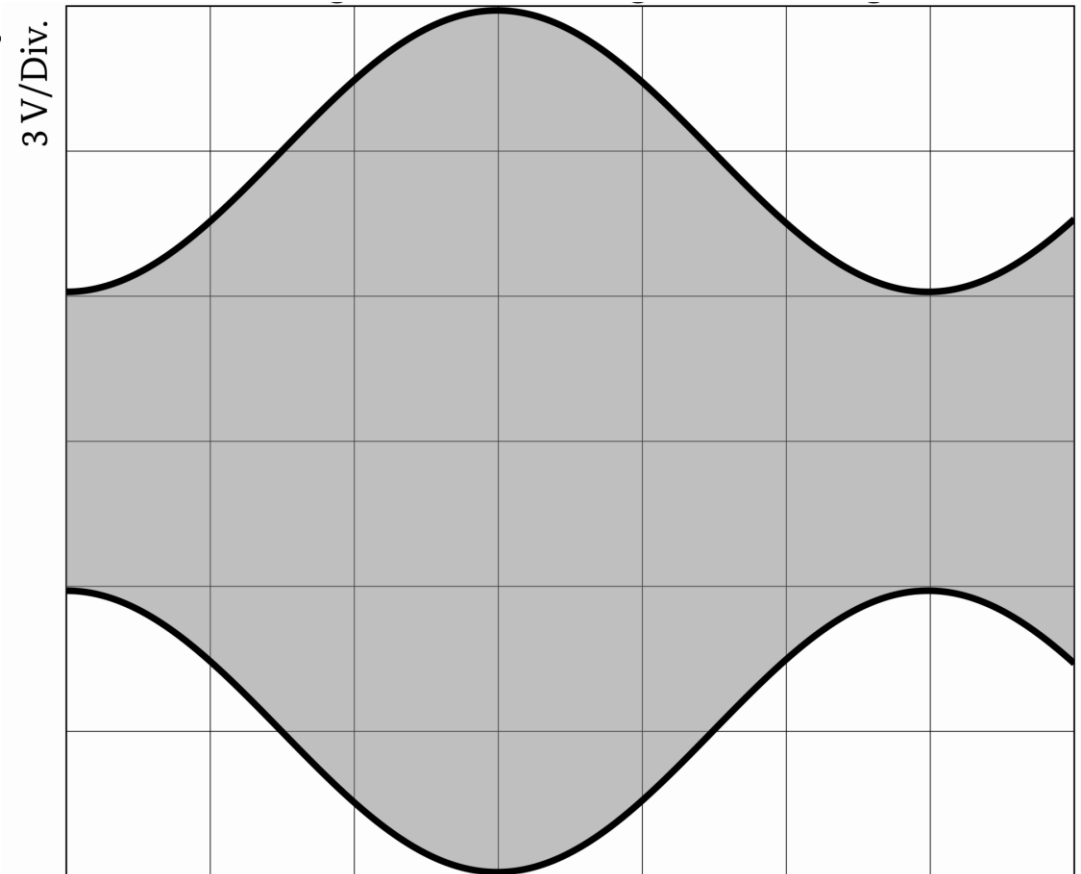
Hüllkurvendemodulator AM



Nutzen der Gleichrichtung durch eine Diode



AE202 Das folgende Oszillogramm zeigt ein AM-Signal. Der Modulationsgrad beträgt hier ca.





Quizfragen von letzter Woche: AE202



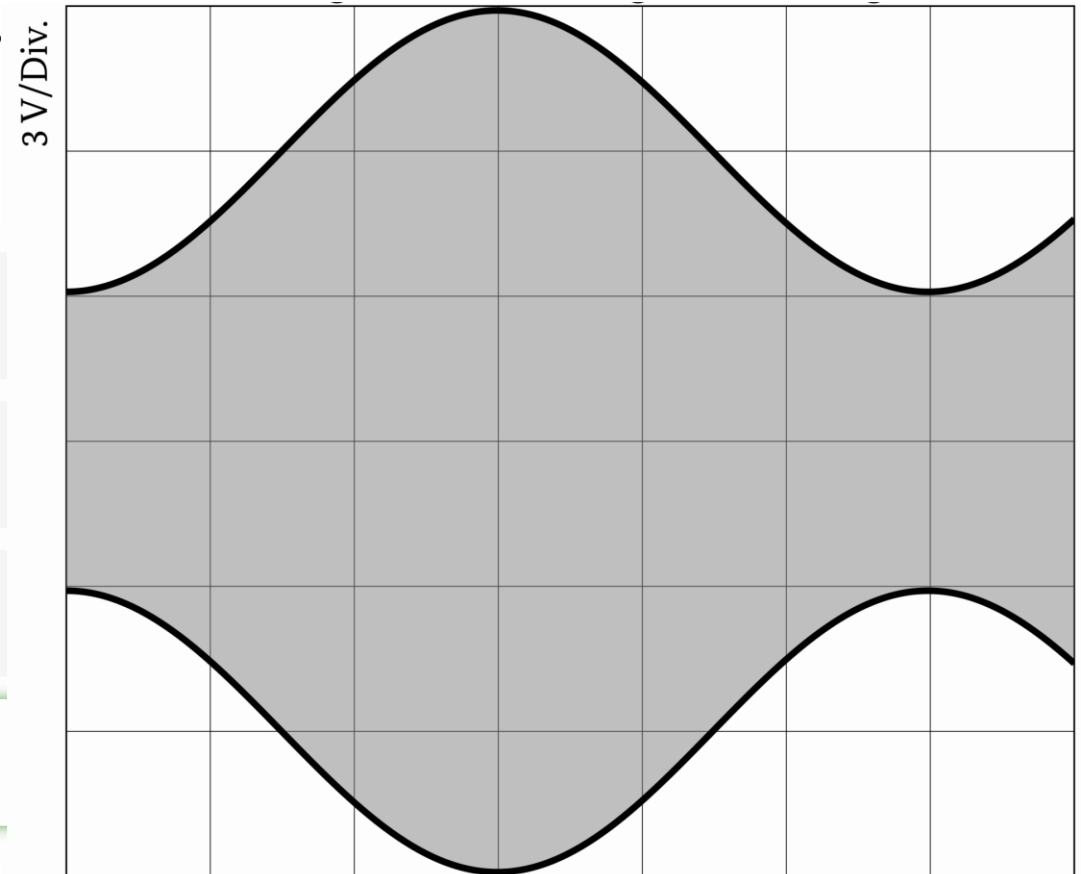
AE202 Das folgende Oszillogramm zeigt ein AM-Signal. Der Modulationsgrad beträgt hier ca.

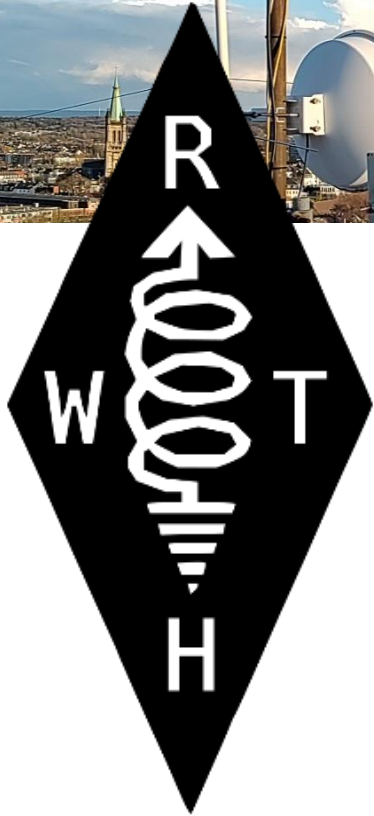
A 33%

B 67%

C 75%

D 50%





AFU-Kurs WS25/26

Termin 2

- Analoge Modulation
- **Digitale Übertragungsverfahren**
- Digitale Signalverarbeitung



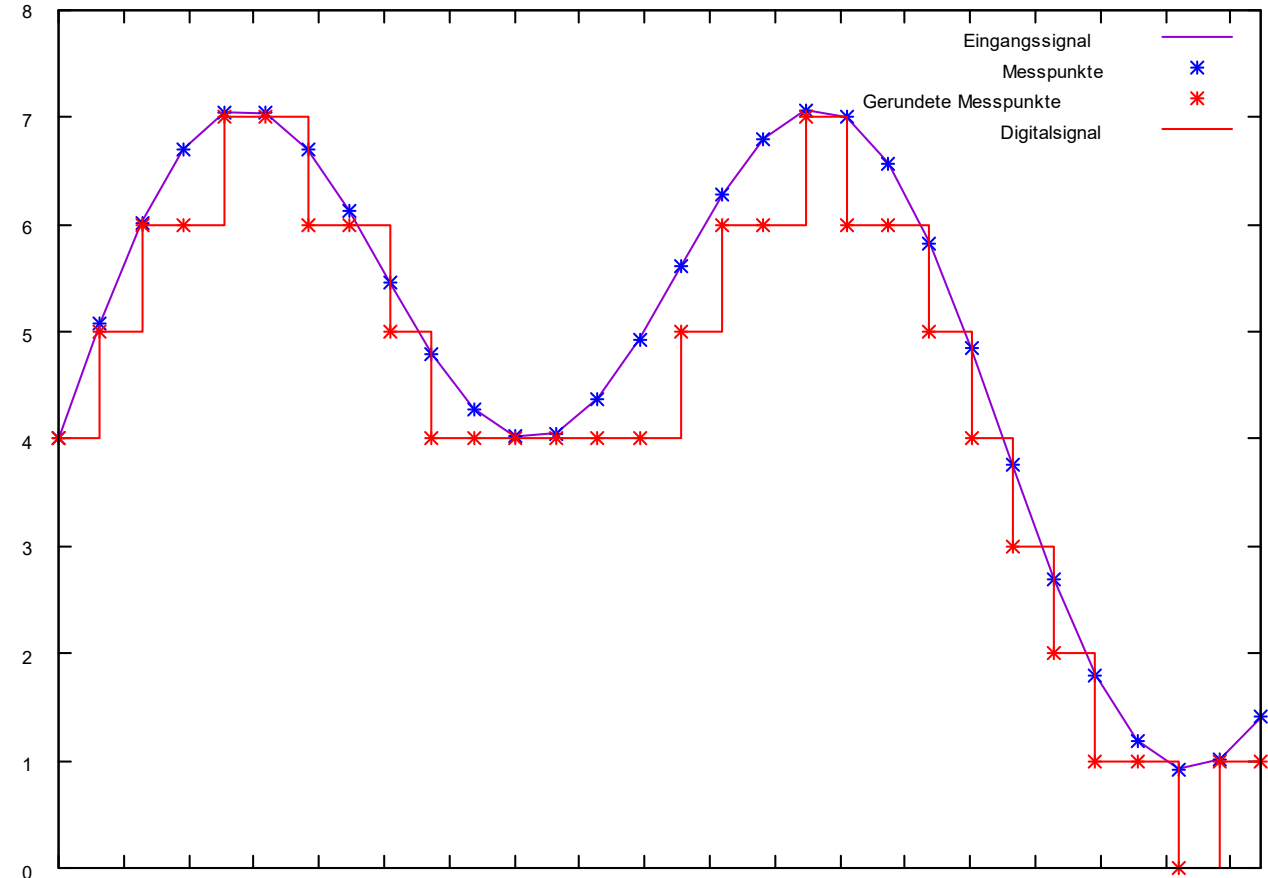
Analogsignal

- Zu jeder Zeit bestimmt
 - Amplitude unendlich genau festgelegt
- Datenmenge unendlich

Digitalsignal

- Zu festen Zeitpunkten bestimmt
 - Abtastung
 - Amplitudenwerte gerundet
 - Quantisierung
- Datenmenge begrenzt

Abtastung und Quantisierung





Dualsystem



- Darstellung von Zahlen mit zwei Zuständen
 - 1 – Strom an
 - 0 – Strom aus
- Abbildung von Zahlen als Summe von Zweier-Potenzen

Dez.	$2^3 = 8$	$2^2 = 4$	$2^1 = 2$	$2^0 = 1$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1





CAT-Betrieb



Spezialausbildung für Katzen in:

- Konfiguration von Funkgeräten
- Erzeugung von Modulationssignalen
- Bedienen der Sprechtaaste
- Auswerten von Empfangssignalen

Keine kompetente Fachkatze zur Hand?

Wir brauchen Alternativen!

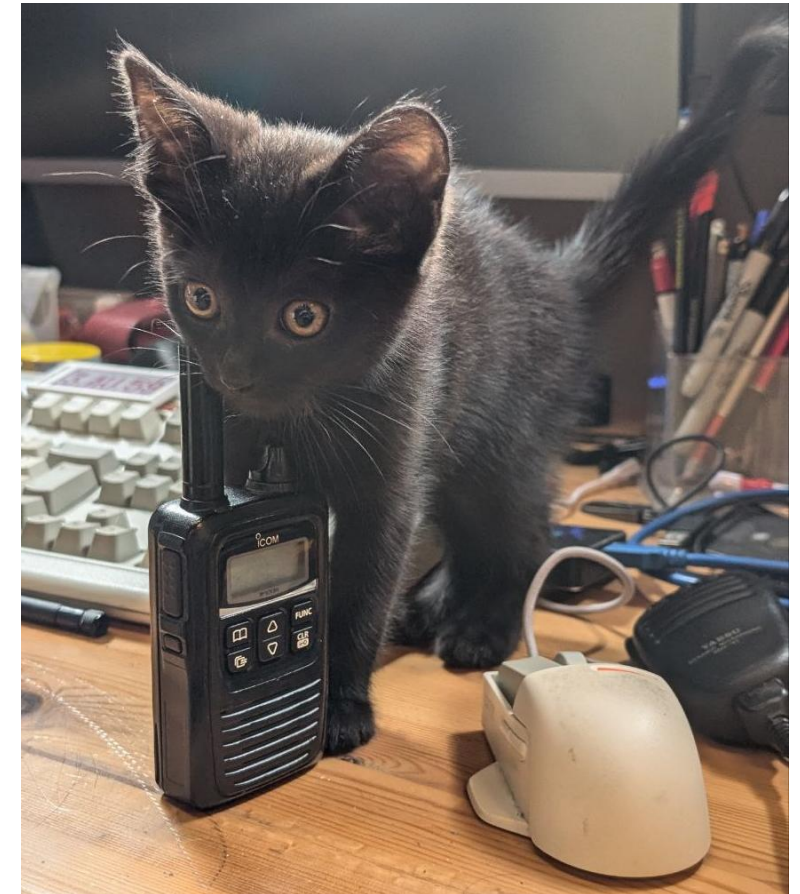


Bild: Manoel ON6RF - „Dante“ alias „le petit chat“





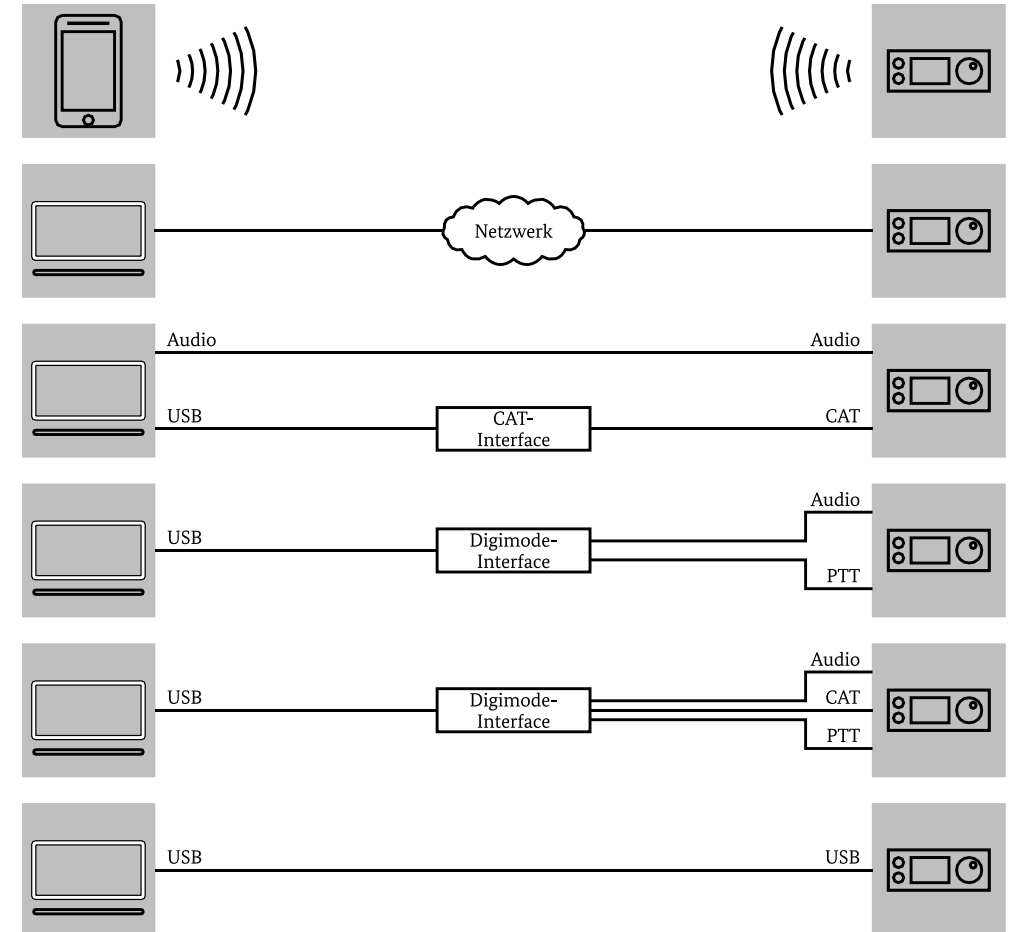
Computer Aided Transceiver (CAT)



Sender und Empfänger mit Computer ansteuern

Grundbegriffe

- Audio: Niederfrequentes Signal (NF)
- USB: Universal Serial Bus
- PTT: Push To Talk (Sprechtaste, Sender einschalten)
- Interface: Kombination aus Soundkarte und Wandlung von komplexer in einfacher Schnittstelle (USB zu RS232)





Computer Aided Transciever (CAT)



Anwendungen Funkfernreiben (digital):
Text in Töne codieren

CQ CQ CQ DE DL2AB DL2AB DL2AB PSE K

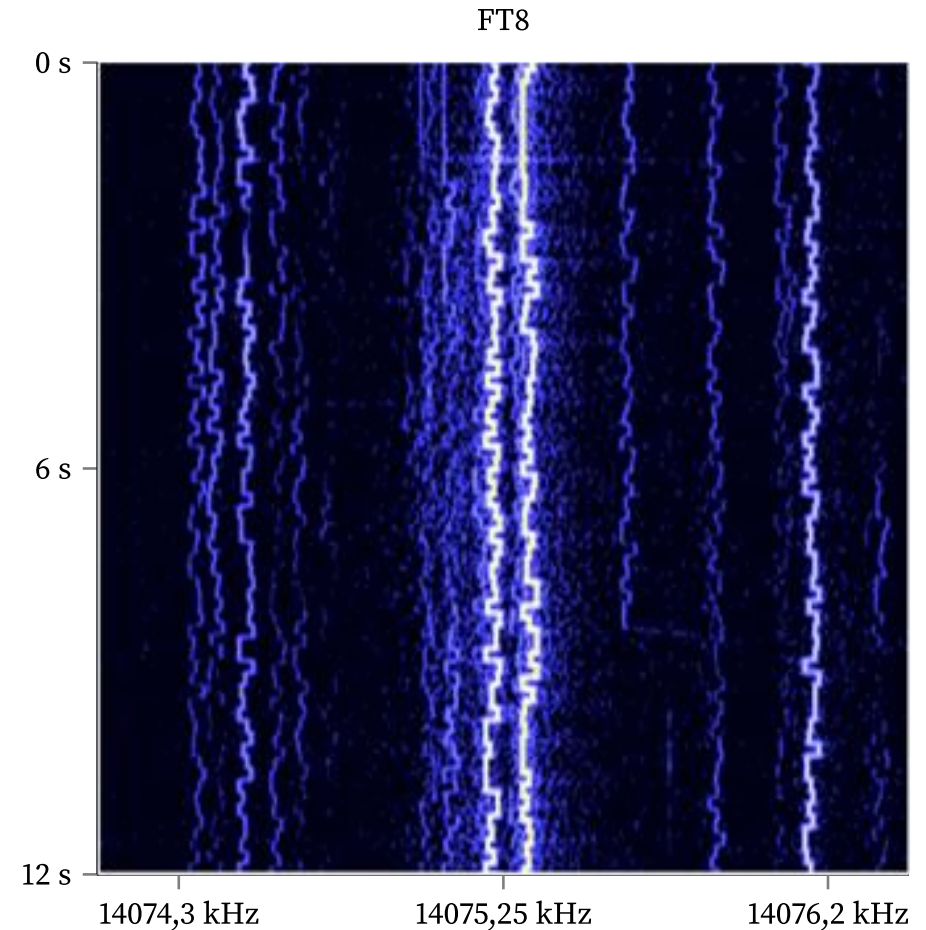
DL2AB DE DL1PZ K

DL1PZ DE DL2AB = UR RST 599 599 = DL1PZ DE DL2AB K

DL2AB DE DL1PZ = TNX RPRT, UR 479 479 BK

BK QSL = VY 73 DE DL2AB SK

R 73 DE DL1PZ SK





Computer Aided Transciever (CAT)



Anwendung Slow Scan Television (analog):
Bild in Töne codieren



Bild: DARC e.V., empfangen von der ISS





Data-Port, 9600-Port

⚠ ANALOGER ANSCHLUSS ⚠

- Historisch gewachsene, irreführende Benennung
- Nicht verwechseln mit „Recommended Standard 232“ alias „RS232“
- Für Audio-Signale
- Direkter Durchgriff auf Modulator und Demodulator
- engl. auch „Flat Audio“ oder „Discriminator“
- Anschlussmöglichkeit für Modems
- Teilweise mit „hardware hacks“ nachrüstbar

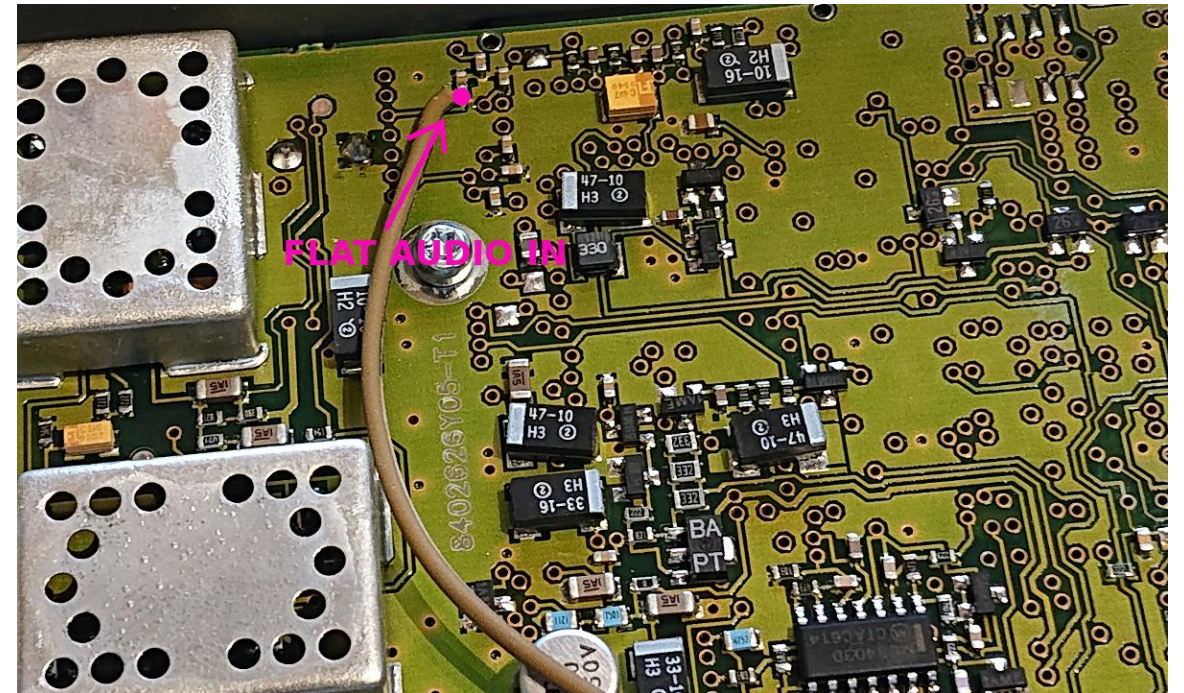
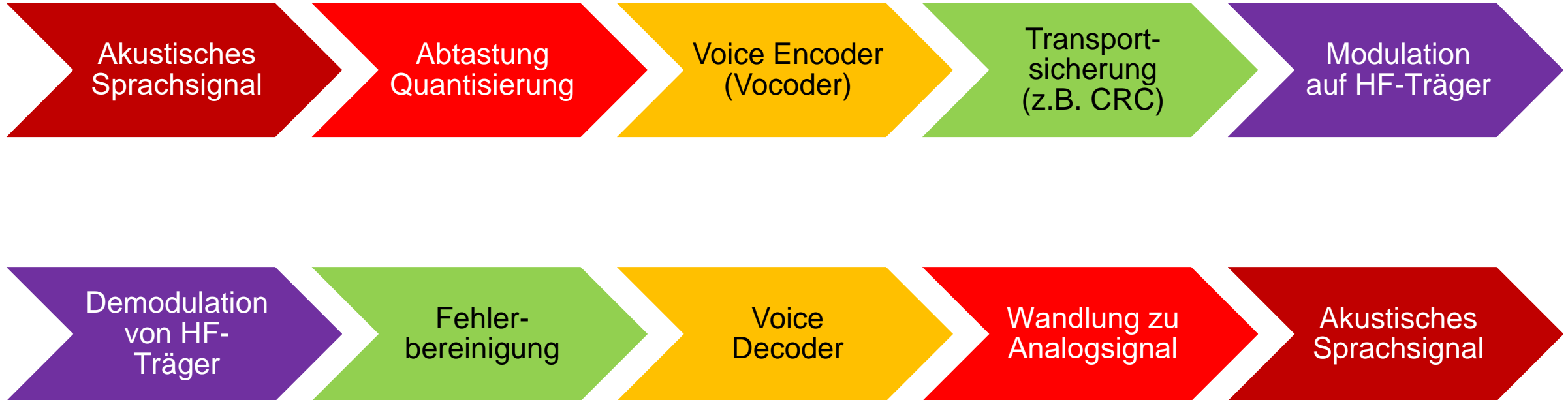


Bild: Florian DF2ET, Nachrüstung GM600 Flat Audio





Digital Voice



Wesentliche Vorteile

- Signalregeneration
 - Perfekt möglich bei hinreichend guter Übertragungsqualität
- Routing-Intelligenz
 - Geografische Zielwahl
 - Persönliche Zielwahl

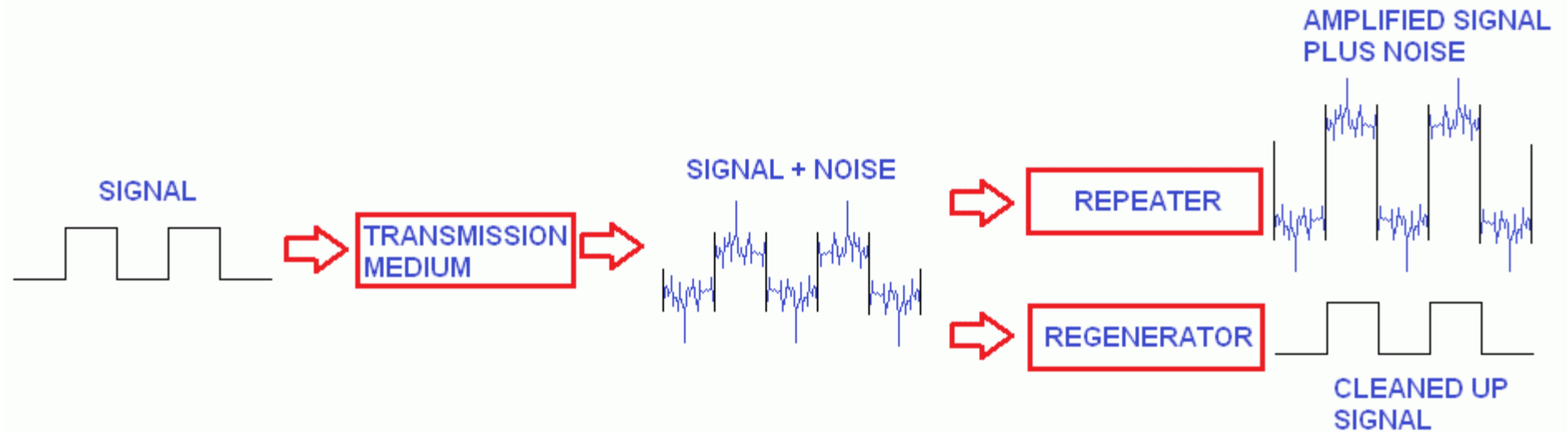
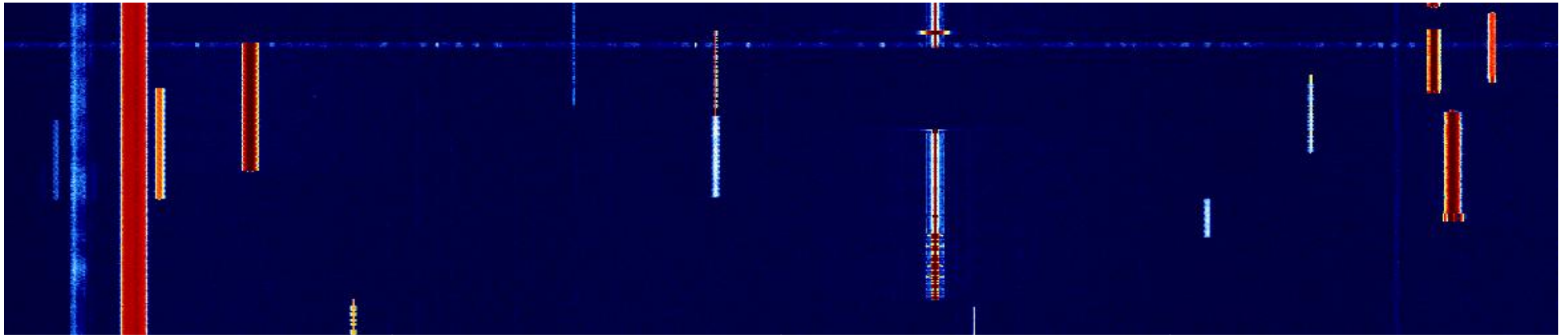


Bild: Repeaters and Regenerators, reviseomatic.org



Digitaler Sprechfunk im Amateurfunk



Digital Mobile Radio (DMR)

- 12.5 kHz Bandbreite
- TDMA
- 4-Frequency Shift Keying

System Fusion

- 12.5 kHz Bandbreite
- 4-Frequency Shift Keying

Digital Smart Technologies for Amateur Radio (DStar)

- 6.25 kHz Bandbreite
- Gaussian Minimum Shift Keying

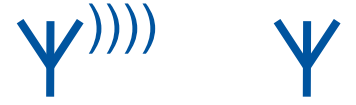
Terrestrial Trunked Radio (TETRA)

- 25 kHz Bandbreite
- TDMA
- $\frac{\pi}{4}$ - Differential Quadrature Phase Shift Keying

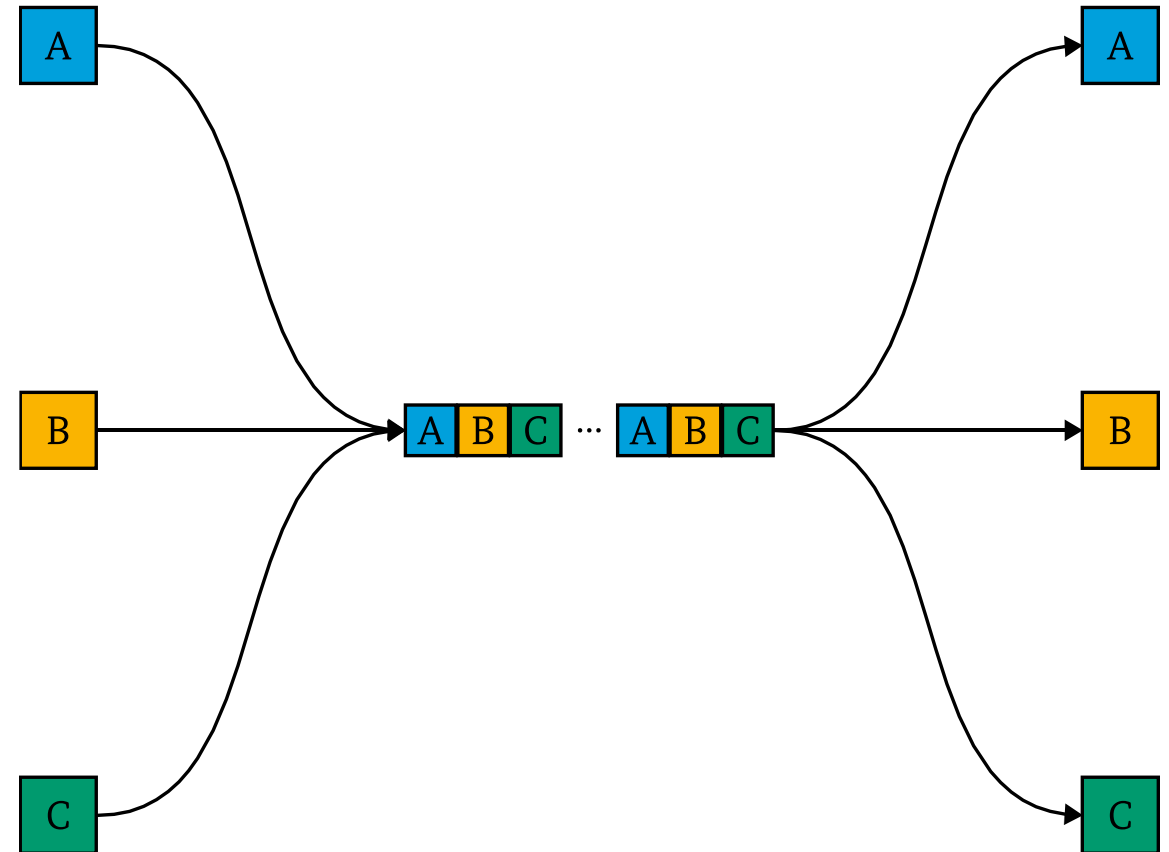




Mehrfachzugriff: TDMA



- **Time Division Multiple Access**
 - Zeitverteilter Mehrfachzugriff
 - Auch als „Time Division Multiplex“ bezeichnet
- Mehrere Teilnehmer auf einem Kanal
- Quellen senden der Reihe nach abwechselnd
- Praxisbeispiel: Diskussionsrunde
 - Mehrere Personen sprechen in einem Raum
 - Wenn zwei gleichzeitig sprechen, funktioniert es nicht

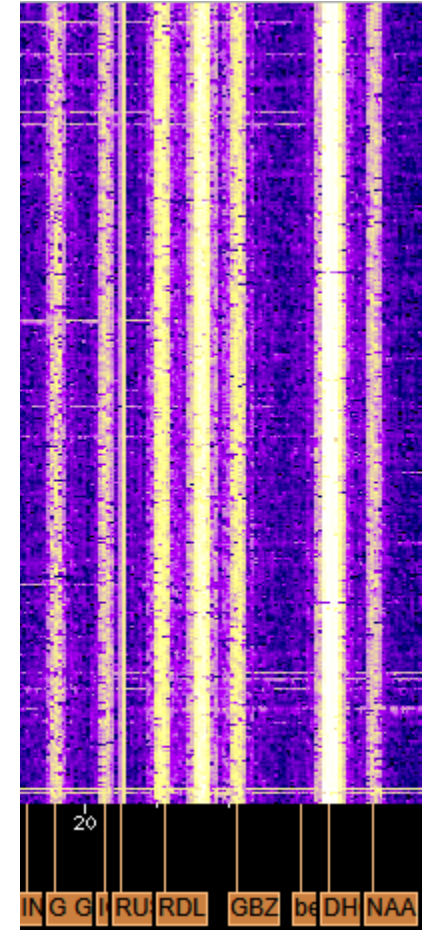




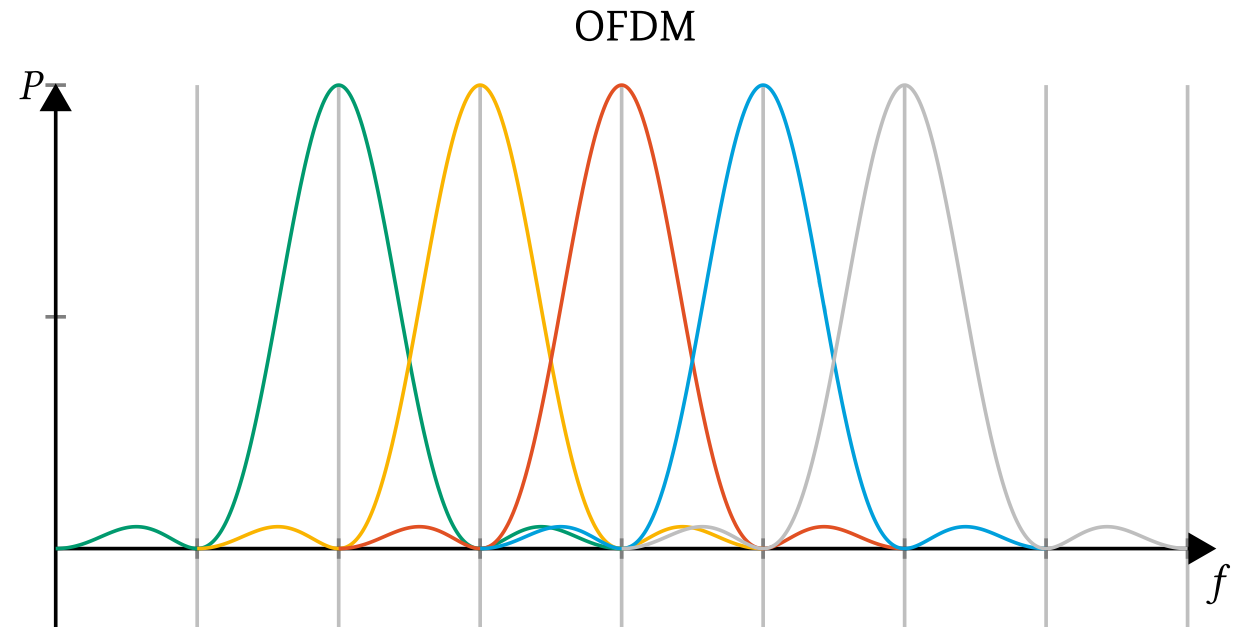
Mehrfachzugriff: FDMA



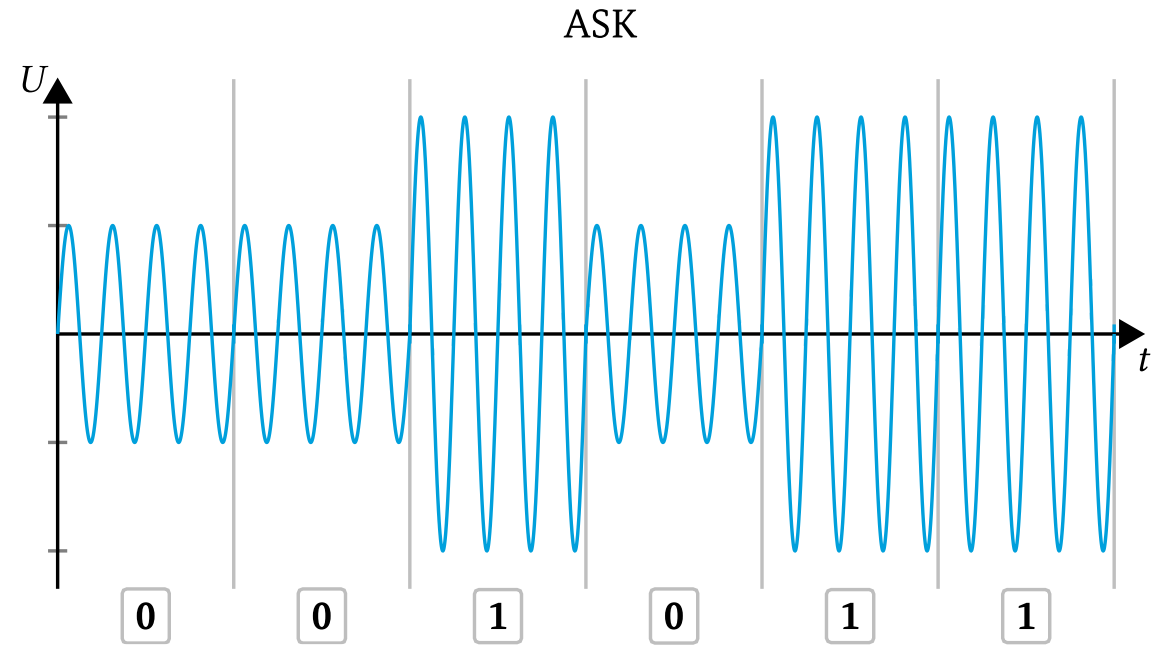
- **Frequency Division Multiple Access**
 - Frequenzverteilter Mehrfachzugriff
 - Auch als „Frequency Division Multiplex“ bezeichnet
- Quellen senden gleichzeitig auf verschiedenen Frequenzen
- Praxisbeispiel: Übung Web-SDR
 - Mehrere Stationen mit verschiedenen Tonhöhen nebeneinander



- Mehrere intelligent koordinierte Träger nebeneinander
- Benachbarte Signale sind sich maximal unähnlich
 - Orthogonale Vektoren
- Sender verteilt Informationen über alle Träger
- Einzelträger haben vergleichsweise geringe Symbolrate
 - Minimierung der Inter-Symbol-Interferenz



- Digitale Modulation
- Umschalten der Sendeleistung
- Morsen ist ein Spezialfall der ASK
 - Umschalten zwischen 0% und 100% Leistung





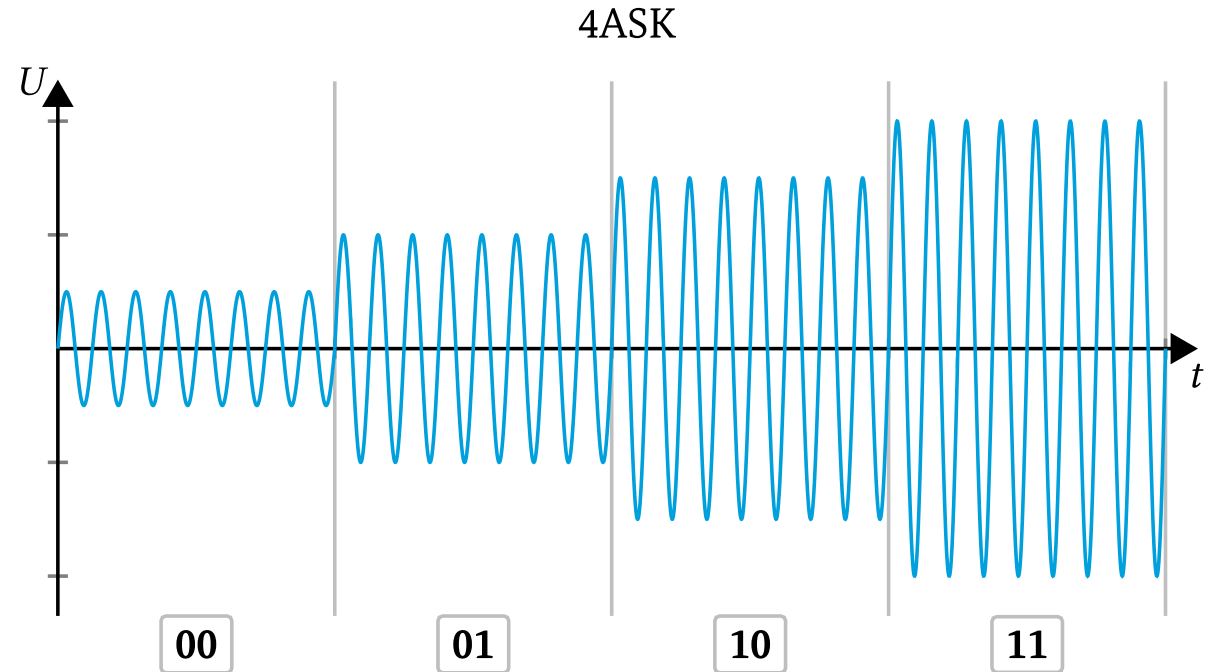
Variante: Mehrstufige ASK



- Mehr als nur 2 mögliche Amplituden
- Mehrere Bits in jedem Zustand codiert
- Mehrstufigkeit reduziert Robustheit

Konzept der Symbol- und Bitrate:

- n Bits in einem Symbol zusammengefasst
 - Hier n=2 Bits pro Symbol

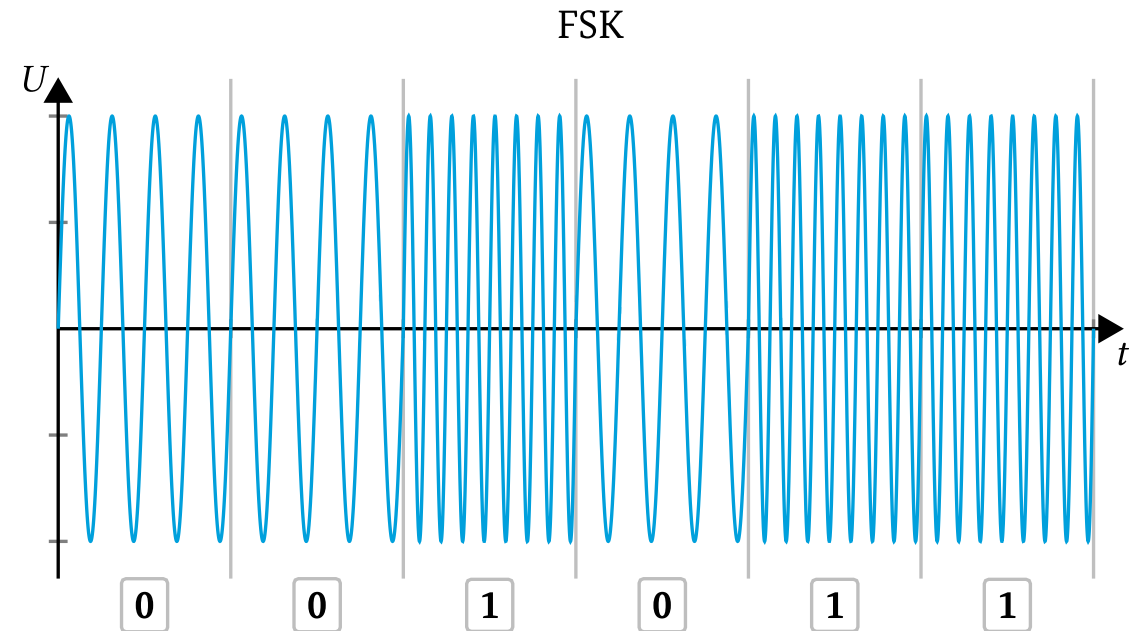




Frequency Shift Keying (FSK)



- Digitale Modulation
- Umschalten zwischen Frequenzen





Erinnerung: Schwingung aus Kreis erzeugen



- Die „Funkwelle“ wird aus einer Kreisbewegung entwickelt
- Projektion eines rotierenden Phasors

Was passiert, wenn wir schnell am Phasor drehen?

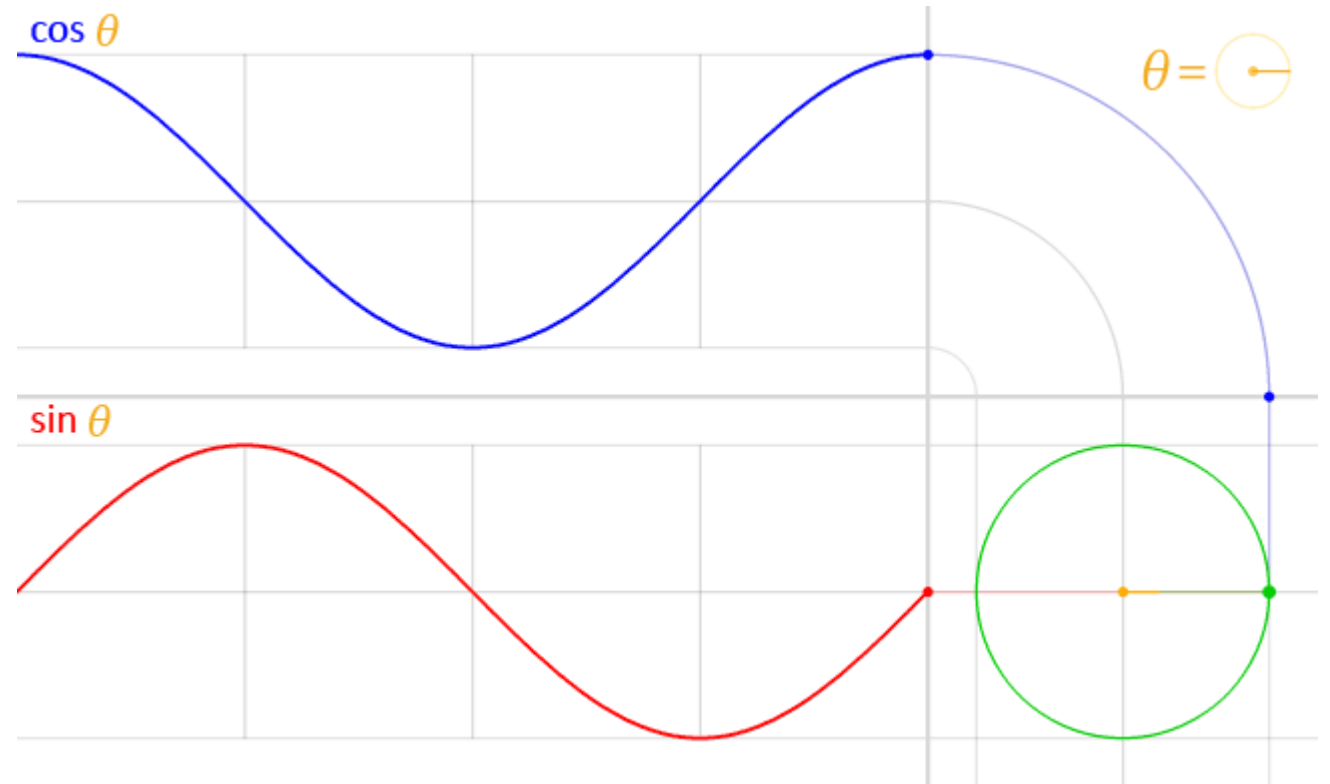


Bild: Wikimedia public domain „Circle cos sin“

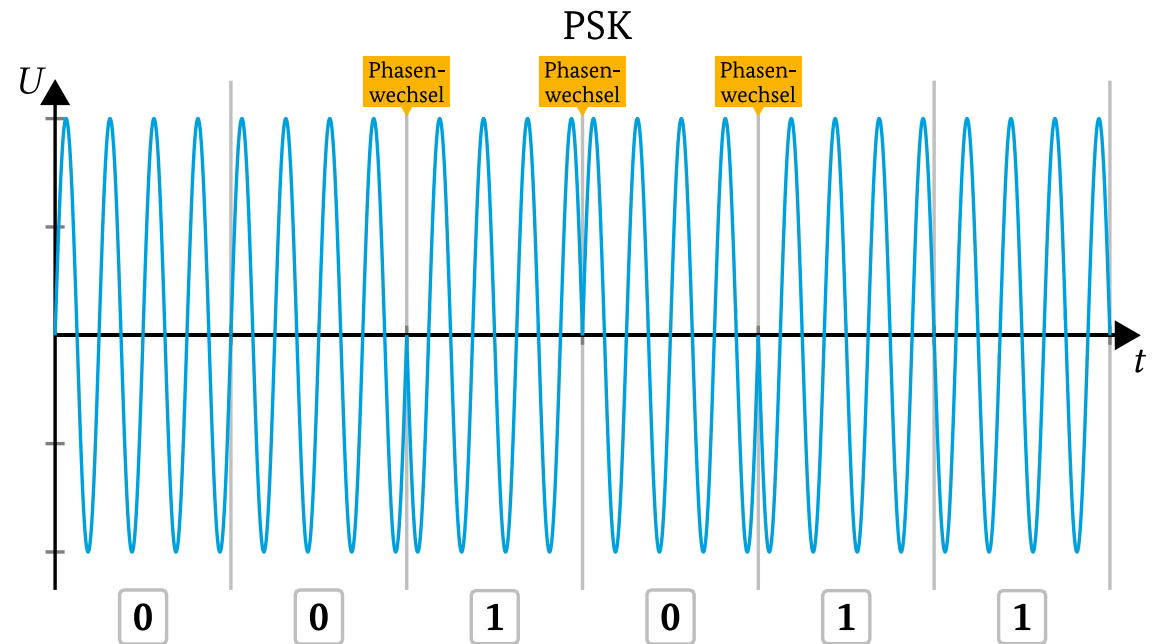




Phase Shift Keying (PSK)



- Digitale Modulation
- Phasor schnell vor- oder zurückdrehen
- Erzeugt Phasensprünge in Projektion
- Bild rechts: Binary Phase Shift Keying BPSK mit zwei Zuständen





Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)



- 4 Sprungmöglichkeiten für den Phasor
- 2 Bit pro Sprung codiert
 - 2 Bit pro Symbol
- **Sprungziel** definiert Bits
- Mehr Datendurchsatz als BPSK gleicher Symbolrate
- Störungsanfälliger als BPSK gleicher Symbolrate
- Fun Fact: Je größer die Hamming-Distanz, desto weiter sind Symbole auseinander!

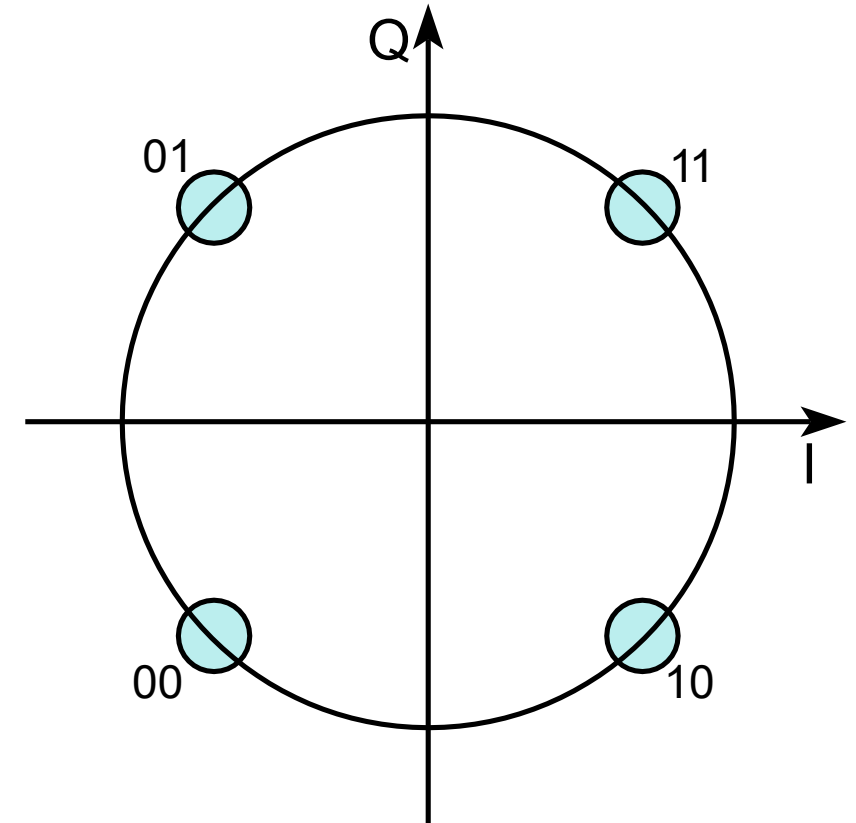


Bild: Wikimedia CC BY-SA 3.0 „Konstellationsdiagramm QPSK“



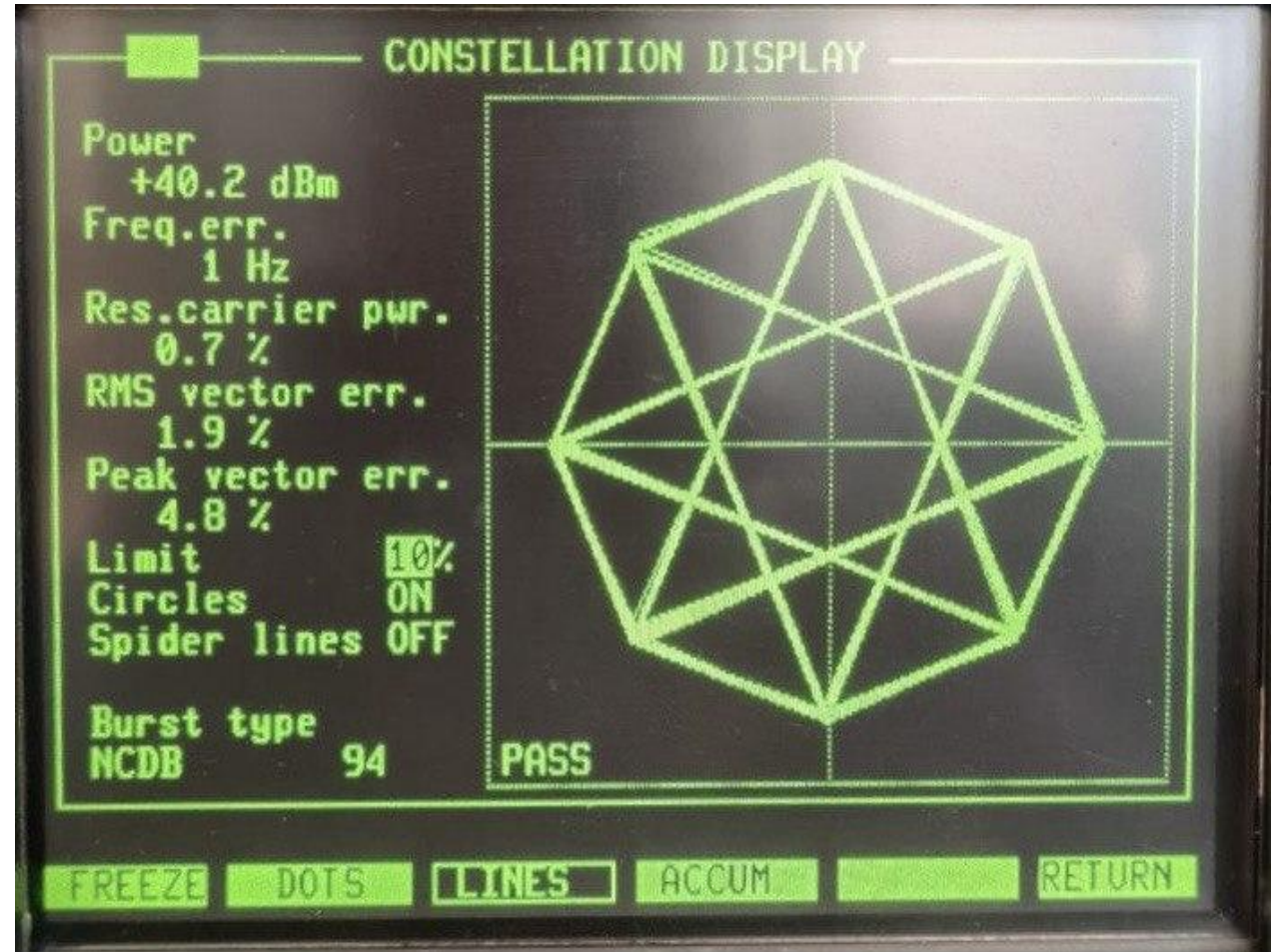


Variante: Differential QPSK



- 4 Sprungmöglichkeiten für den Phasor
- 2 Bit pro Sprung codiert
 - 2 Bit pro Symbol
- **Sprungdistanz** definiert Bits

Sprungdistanz	Bits
$-\frac{3}{4}\pi$	11
$-\frac{1}{4}\pi$	10
$+\frac{1}{4}\pi$	00
$+\frac{3}{4}\pi$	01

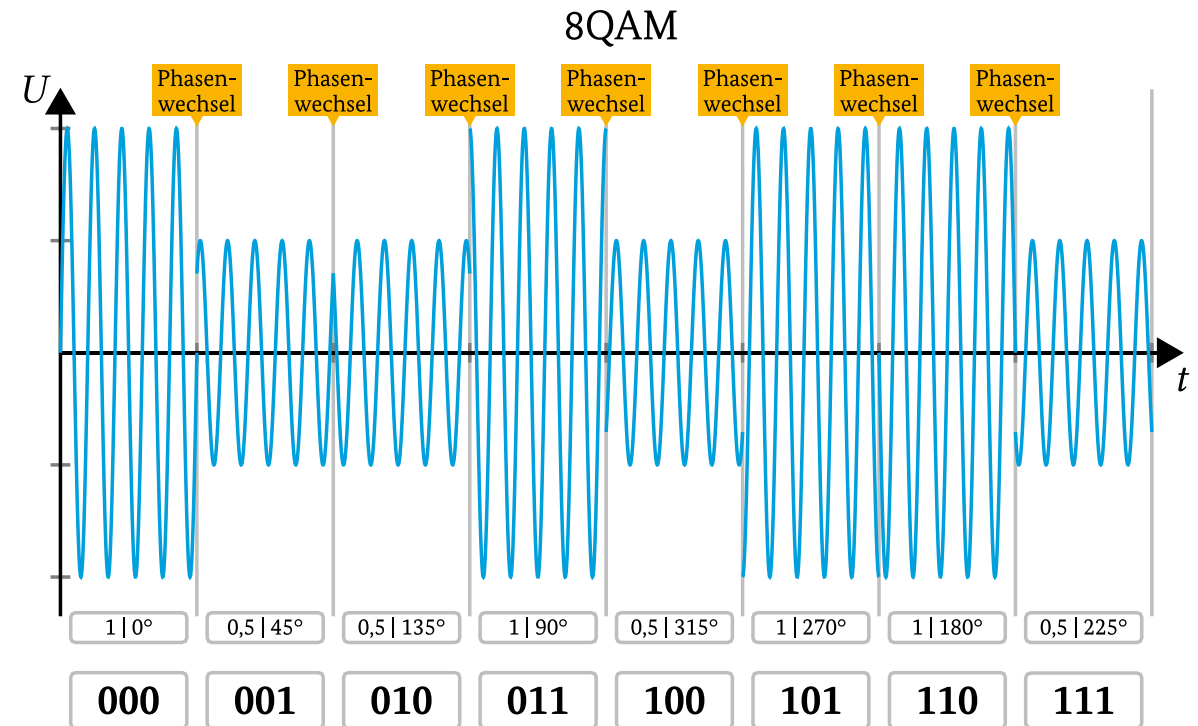




Variante: 8-QAM



- 8 Sprungmöglichkeiten für den Phasor
- 3 Bit pro Sprung codiert
 - 3 Bit pro Symbol
- **Sprungziel** definiert Bits
- Mehr Datendurchsatz als BPSK und QPSK gleicher Symbolrate
- Störungsanfälliger als BPSK und QPSK gleicher Symbolrate





Variante: 8-QAM



- 8 Sprungmöglichkeiten für den Phasor
- 3 Bit pro Sprung codiert
 - 3 Bit pro Symbol
- **Sprungziel** definiert Bits
- Mehr Datendurchsatz als BPSK und QPSK gleicher Symbolrate
- Störungsanfälliger als BPSK und QPSK gleicher Symbolrate

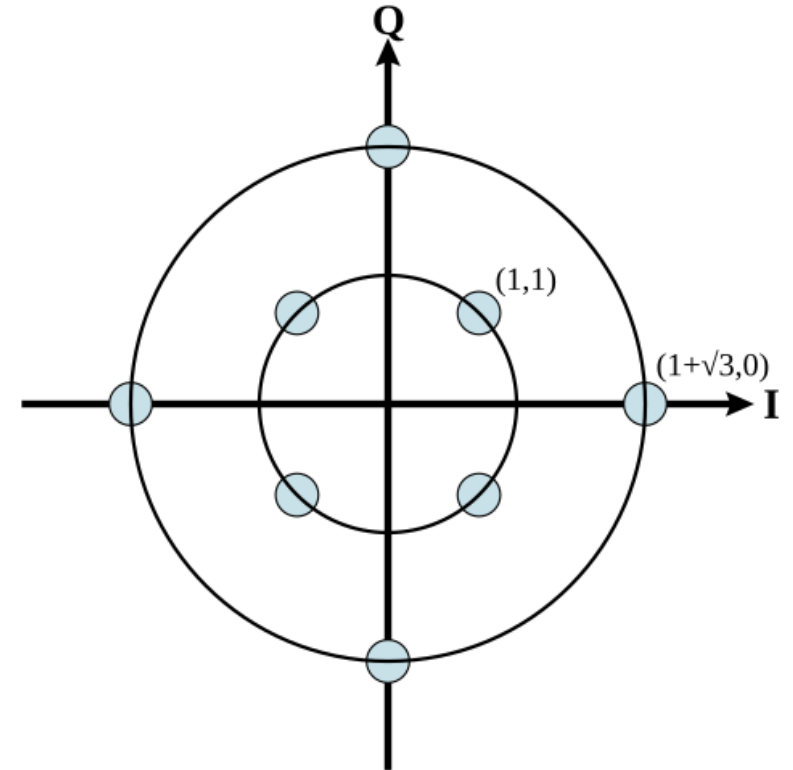


Bild: Wikimedia public domain „Circular 8QAM“



Circuit Switched Network

Statische Verbindung zwischen Start und Ziel

Kontinuierlicher Datenstrom

Konstante und vorhersehbare Geschwindigkeit

Kontinuität eintreffender Daten gewährleistet

Packet Switched Network

Variable Verbindung zwischen Start und Ziel

Aufteilung in Pakete

Geschwindigkeit kann schwanken

Paketverluste und falsche Reihenfolge möglich

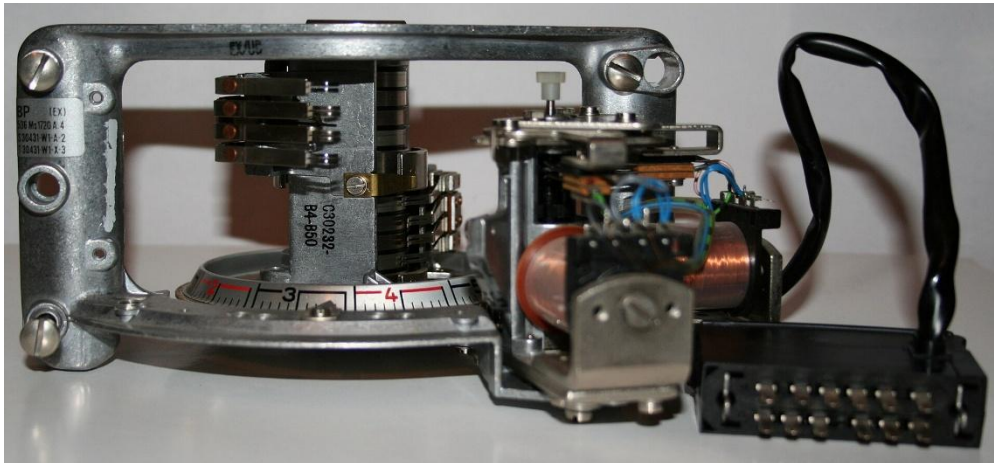


Bild: Wikimedia CC BY 2.5 „Edelmetall Drehkontakt Wähler“



Bild: Wikimedia CC BY 3.0 „Luftbild des Güterbahnhofs Köln Eifelort“



Netzwerke: Internet Protocol (IP)

- Definition zur Anordnung von Bits in Netzwerk-Daten
- Für uns besonders relevant:
 - Total length
 - Time To Live
 - Protocol (TCP, UDP, ICMP, etc.)
 - Source address
 - Destination address
- Kernbaustein des modernen Internets...
...und des modernen Amateurfunks!

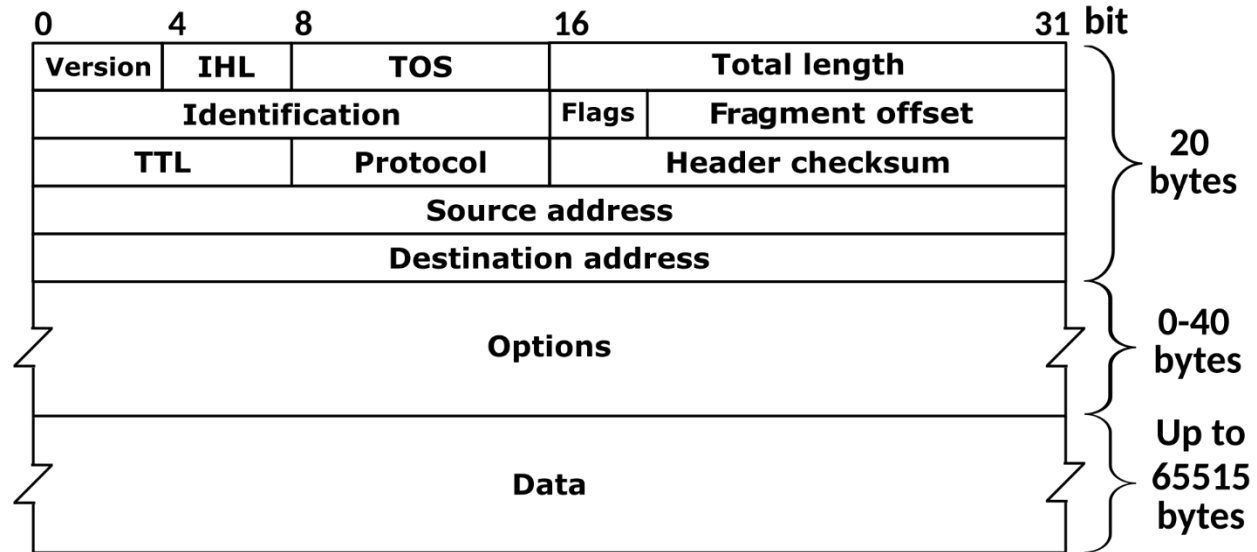


Bild: Wikimedia CC BY-SA 4.0 „Data Packet of IPv4“





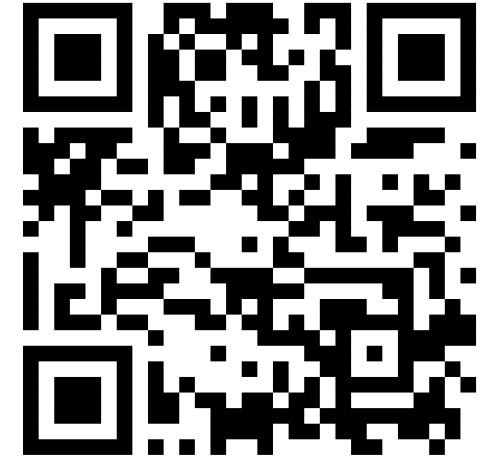
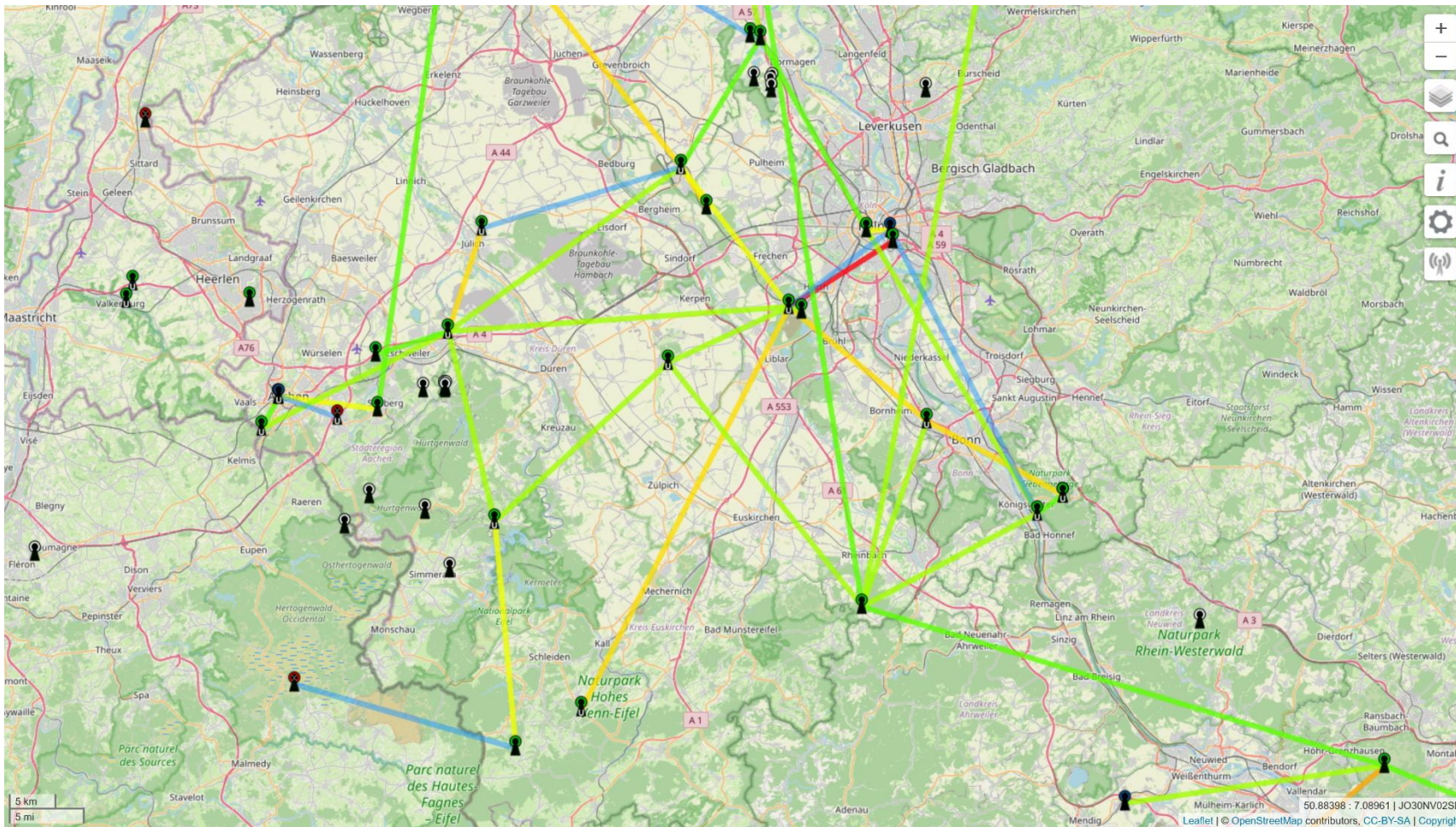
Highspeed Amateur Multimedia Network

- Daten-Richtfunkverbindungen
- Betriebs-Frequenzen 2.4, 5.8 und 60 GHz
- Basiert auf umgebauter WLAN-Hardware
- Routing mit Border Gateway Protocol
- Transportnetz für diverse aufgesetzte Dienste



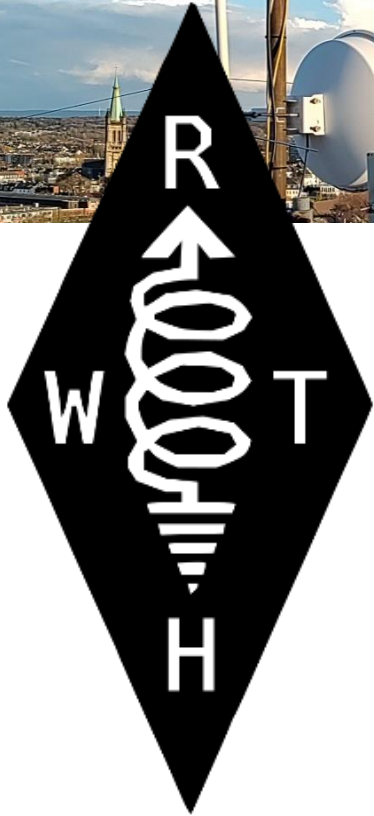


HAMNET



<https://hamnetdb.net/map.cgi>





AFU-Kurs SS26

Termin 4

- Analoge Modulatorschaltungen
- Digitale Übertragungsverfahren
- **Digitale Signalverarbeitung**

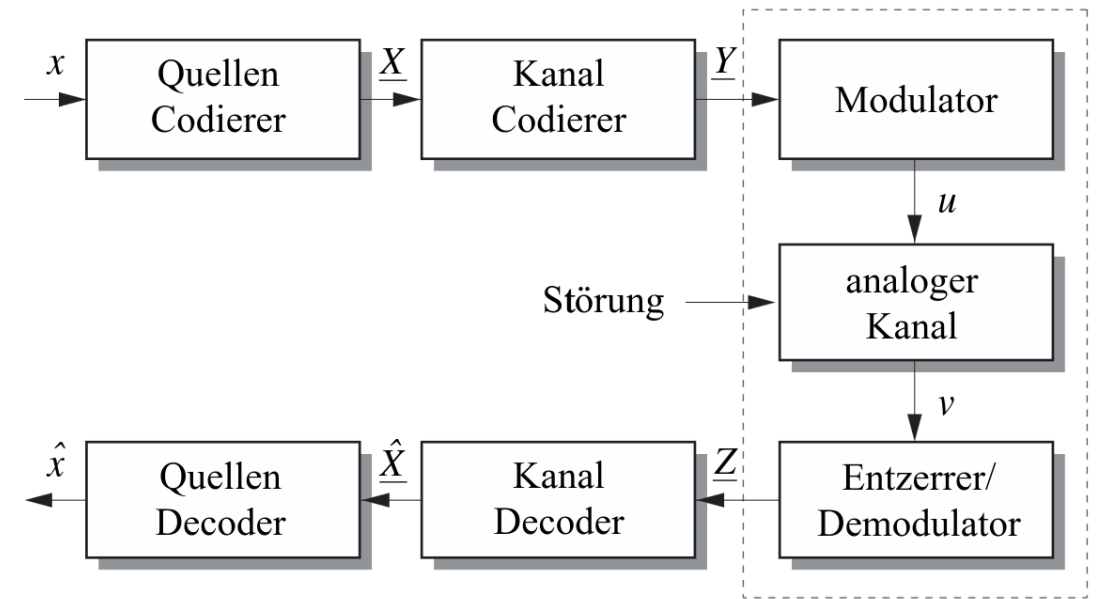




Datenübertragung



- Wir wollen nun genauer untersuchen, wie wir unsere codierte Information von A nach B erfolgreich übertragen
- Hierbei ist es hilfreich, die Implementierungsdetails der Übertragung zu abstrahieren und stattdessen abstrakte Modelle einzuführen
- Im Abstrahierten können nun für die einzelnen Stufen Annahmen getroffen werden, die beim Auslegen nützlich sind.





Datenübertragungsrate



- Drei wichtige Grundbegriffe bei der Betrachtung von Übertragungsketten sind die Daten(übertragungs)rate, Symbolrate und Bandbreite
- Die Datenübertragungsrate misst den Informationsgehalt, der in gewisser Zeit über den Kanal fließt. Eine übliche Einheit sind bit/s
- Die Symbolrate unterscheidet sich insoweit von der Datenübertragungsrate, dass sie sich nur an den über den Kanal gesendeten Symbolen orientiert. Diese können abhängig von der Modulation aber auch mehr (oder sogar weniger) Informations-bits enthalten
- Die Bandbreite beschreibt die "Größe" des Kanals, über den die Information gesendet wird. Oftmals wird dies anhand des fouriertransformierten Spektrums in Hz bemessen.

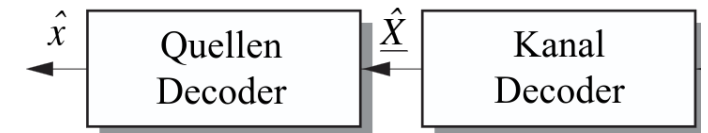
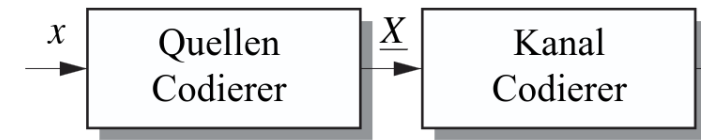




Quellen- und Kanalcodierung



- In unserem Kanalmodell Codieren wir die Information, welche wir übertragen, in zwei getrennten Phasen: Der Quellencodierung und der Kanalcodierung
- Bei der Quellencodierung nehmen wir unsere Eingangsdaten, wie wir sie übertragen wollen, und optimieren diese. Im Optimalfall soll hierbei nicht auf den Kanal geachtet werden. Sie soll nur die Datenrate des Eingangssignals größtmöglich reduzieren.
- Bei der Kanalcodierung soll nur darauf geachtet werden, wie die Information vor Verlust bei der Übertragung geschützt werden kann. Im Optimalfall passiert dies ohne Kenntnisse über die Quelle



© Institut für Kommunikationssysteme



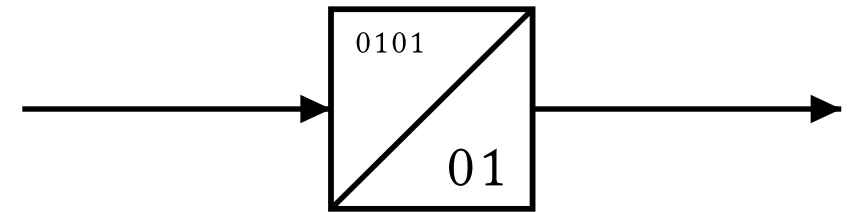


Quellen- und Kanalcodierung II

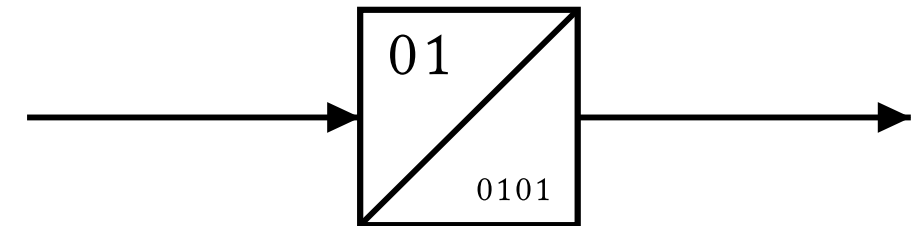


- Die Aufgabe des Quellencodierers ist es, redundante Information aus dem zu übertragenden Signal zu entfernen, damit das Frequenzspektrum schonend genutzt werden kann
- Dies kann Verlustfrei – bspw. durch Huffman-Codierung – oder Verlustbehaftet – bspw. MPEG, Codec2 – geschehen.
- Der Kanalcodierer sichert den Informationsstrom des Quellencodierers gegen Informationsverlust durch den analogen Kanal ab.
- Hierzu fügt der Codierer redundante Informationen – häufig im Sinne von Prüfbits – dem Signal hinzu, anhand derer Fehler erkannt und korrigiert werden können.

Quellencodierer



Kanalcodierer

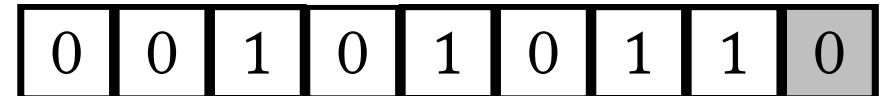
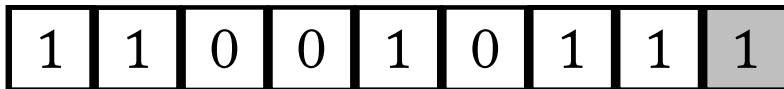




Fehlererkennung



- Die Kanalcodierung und –decodierung soll nach Möglichkeit das Signal vor Fehlerhafter Übertragung schützen.
- Hierzu wird Information zur Integritätsprüfung dem Quellcodierten Signal hinzugefügt, dessen Wert beiden Seiten bekannt ist.
- Sollte diese Zusatzinformation nicht dem entsprechen, was vorvereinbart wurde, weiß der Empfänger, dass Fehler in dem Signal enthalten sind
- Ein einfaches Beispiel sind Paritätsbits:
 - Es ist vorvereinbart, dass der Sender an das Ende einer Menge an Bits eine 0 anhängt, wenn die Anzahl an Einsen in dem vorangehenden Paket gerade ist. Sonst eine 1.
 - Der Empfänger kann überprüfen, ob diese Bedingung erfüllt ist. Ist dem nicht der Fall, weiß der Empfänger, dass mindestens eines der Bits beim Senden umgeschlagen ist (inkl. des Prüfbits)
 - Solche Bits werden als Paritätsbits bezeichnet





Fehlerkorrektur



- Die Frage ist nun, ob man fehlerhafte Übertragung wieder korrigieren kann.
- Ja, das funktioniert solange man mindestens n Paritätsbits für n^2 Informationsbits einführt
- Jedes Paar von Paritätsbits indiziert nun ein bestimmtes Bit
- Sollten nun ein Bitfehler auftreten, kann man über die Paritätsbits indizieren, um welches Bit es sich handelt und dessen Wert entsprechend korrigieren

	p_1	p_2	a
p_3	b	c	d
p_4	e	f	g
h	i	j	k

	p_1	p_2	a
p_3	b	c	d
p_4	e	f	g
h	i	j	k

	p_1	p_2	a
p_3	b	c	d
p_4	e	f	g
h	i	j	k

	p_1	p_2	a
p_3	b	c	d
p_4	e	f	g
h	i	j	k

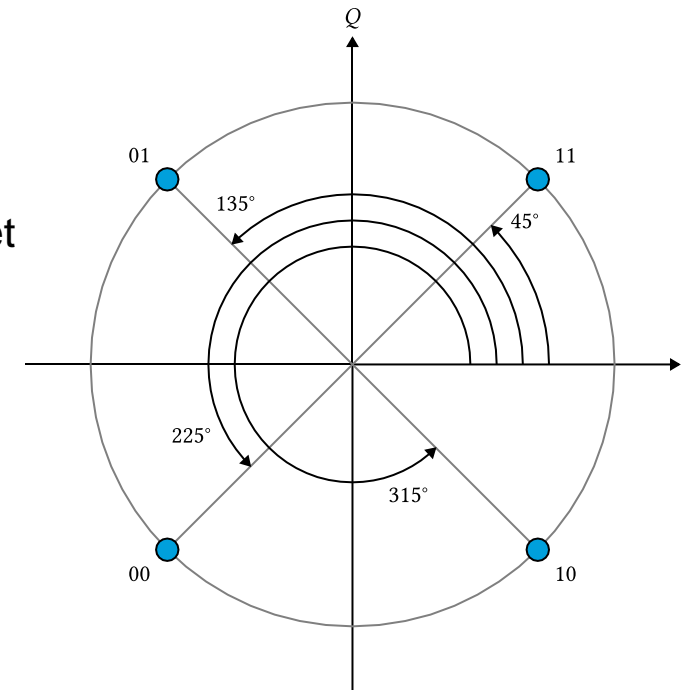




Mapping



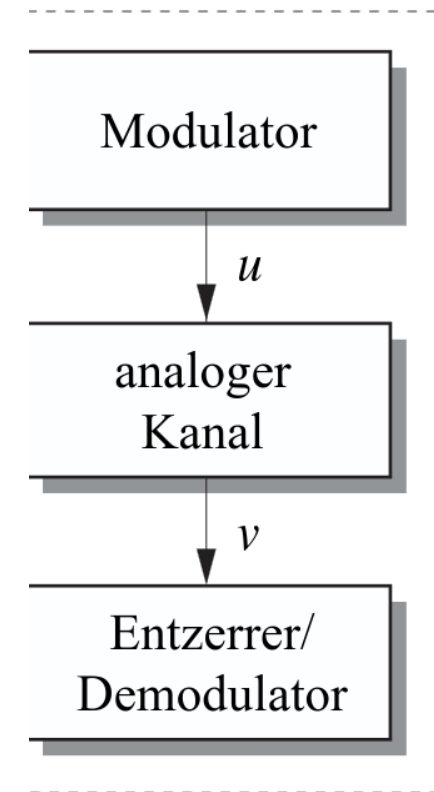
- Beim Mapping nehmen wir unsere modulierte Information und bilden sie auf I/Q-Punkte ab, die übertragen werden sollen.
- Dieser Schritt beschreibt die Umwandlung von Bits in Symbole
- Das Mapping beschreibt noch nicht, wie die Symbole moduliert werden!
- Hier findet beispielsweise die Abbildung des digitalen Signals auf BPSK, QPSK oder QAM Punkte statt.
 - Noch ist die Information nicht so moduliert, aber die Bits werden den Punkten zugeordnet
 - Beispiel: 00 entspricht 225°, 11 entspricht 45°





Bandbegrenzter Gauss-Kanal

- Der Bandbegrenzte Gauss-Kanal modelliert die Übertragung über ein beliebiges Medium mit idealisierten Annahmen.
- Die mögliche Datenrate des Kanals wird für die Bandbreite als Maximal angenommen
- Für die Störeinflüsse des Kanals wird ein Weißes Gauss-Rauschen angenommen, welches additiv auf das Signal überlagert
 - Die Leistung des Rauschens ist konstant bei P_N
 - Das Rauschen ist gleichermaßen auf alle Frequenzen verteilt
 - Das Spektrum des Rauschens ist konstant
- Wird als Additive White Gaussian Noise (AWGN) bezeichnet



© Institut für Kommunikationssysteme





Shannon-Hartley Gesetz



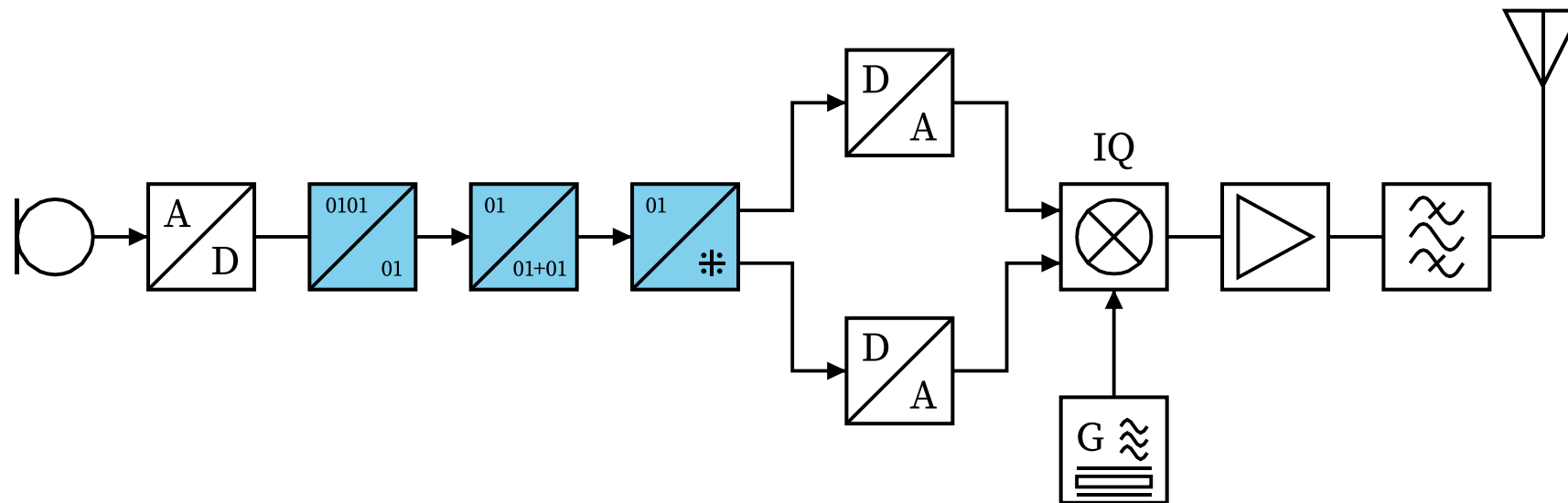
- Das Shannon-Hartley Gesetz gibt uns an, was die maximale Datenrate ist, die über einen Kanal gesendet werden kann. Es lautet:

$$C = B * \ln \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

- Sie stellt die physikalische Obergrenze der Datenrate auf einem Gauss-Kanal dar.
- Die Datenrate ist somit physikalisch begrenzt durch zwei Faktoren: der Bandbreite und dem Signal-Rausch-Abstand.
- Dies kann genutzt werden, wenn ein gutes SNR nicht erreichbar ist. Eine Erhöhung der Bandbreite kann in diesem Fall zur Kompensation genutzt werden.
- Dies wird sich bei Anwendungen wie LoRa zu Nutze gemacht, um unterhalb der Rauschens unerkannt Signale zu senden.



- Wir tun nun all unsere Bausteine zusammen um somit vollständige Sende- und Empfangsketten zu erhalten.
- Im Allgemeinen solltet ihr für die Prüfung komfortabel solche Sende- und Empfangsketten nachvollziehen und angeben können, welche Funktion bestimmte Blöcke übernehmen.





Multiplexing



- Da wir häufig nicht alleine auf den Bändern im Amateurfunk unterwegs sind, ist es notwendig, Methoden zur parallelen Übertragung zu nutzen. Hier gibt es drei sehr prävalente Vertreter:
- Beim Time Division Multiple Access übertragen die Teilnehmer*innen abwechselnd nacheinander. Der Datenraum wird praktisch entlang der Zeitdimension in Abschnitte unterteilt. Die Implementierung hiervon ist oft trivial, weshalb es im Digitalen gern genutzt wird. Vertreter dieser Technik sind I2C, CAN oder LAN
- Beim Frequency Division Multiple Access wird das Band in mehrere Abschnitte unterteilt, auf denen parallel übertragen werden kann. Teilnehmende suchen sich hier eine unbesetzte Frequenz und starten auf dieser ihre Übertragung. Dies ist beim Sprechfunk im Amateurfunkbereich üblich.
- Code-Division Multiple-Access kombiniert beide Methoden und unterteilt das Spektrum in Zellen, die genutzt werden können. Dies wird oft bei den Mobilfunkstandards eingesetzt um höchstgradige Parallelität zu erzielen. Technisch ist dieses Verfahren sehr komplex.





Synchronisation



- Als Empfänger erhalten wir im Zweifelsfall konstant aus dem Kanal Signale
- Es ist für den Kanal-Decodierer notwendig zu Wissen, wann das tatsächlich übertragene Signal anfängt bzw. aufhört.
- Es ist also notwendig, dem Empfänger zu signalisieren, an welchen Stellen er die Decodierung starten soll.
- Diesen Prozess bezeichnet man als Synchronisation und kann durch mehrere Methoden stattfinden
- Im Analogen ist das Synchronisationssignal eine häufige Art, dem Empfänger den Beginn der Übertragung zu signalisieren. Hierbei wird ein vereinbarter Ton für gewisse Zeit auf den Träger gelegt, bis die tatsächliche Übertragung startet
- Im Digitalen sind Synchronisationssequenzen am häufigsten aufzutreffen. Hier wird eine vorher vereinbarte Bitsequenz gesendet, um den Start der Übertragung zu signalisieren.



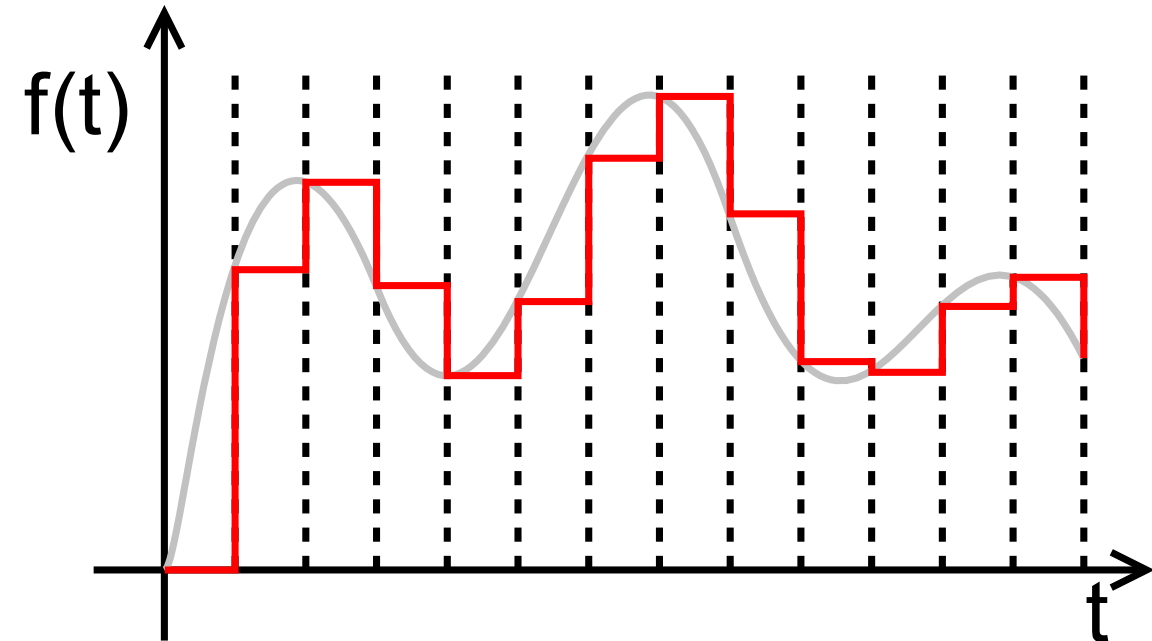
- Um am Computer ein Signal zu verarbeiten muss dieses erst in einen diskreten Datenstrom umgewandelt werden
- Zuerst muss das zeitkontinuierliche Signal durch Abtastung in diskrete Werte umgewandelt werden

$$u(t) \rightarrow u[k]$$

- Anschließend, da pro Abtastwert nur eine begrenzte Menge an Bits zur Verfügung steht, muss jeder Wert noch quantisiert werden.

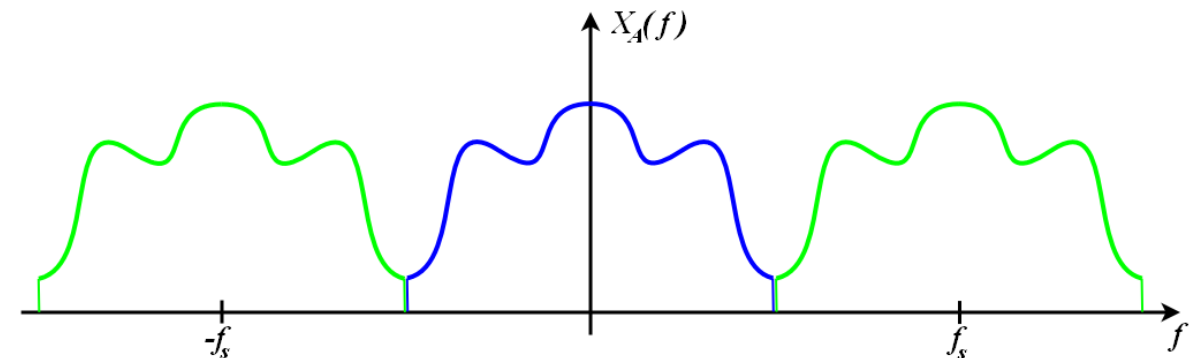
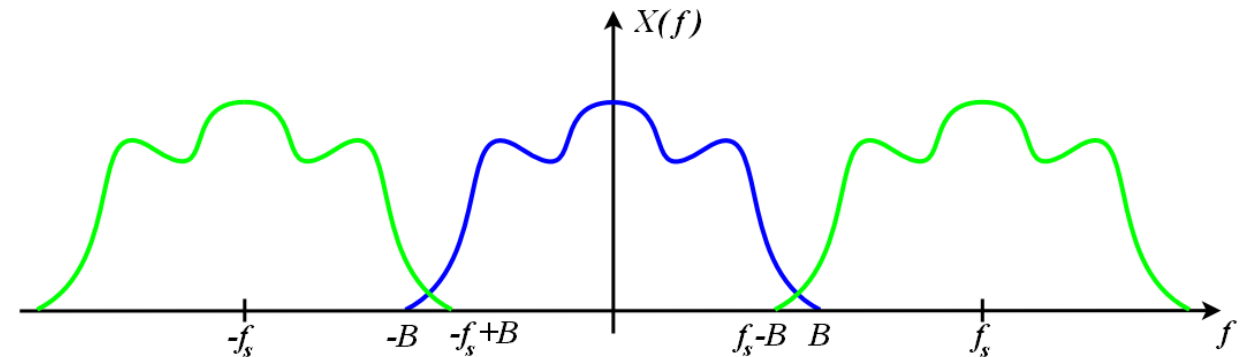
$$u[k] \rightarrow \hat{u}[k] + \dot{u}[k]$$

- Die Information $\dot{u}[k]$ geht als Quantisierungsfehler verloren



Von image source obtained from en:User:Petr.adamek (with permission) and previously saved as PD in PNG format. touched up a little and converted to SVG by en:User:Rbj - en:Zeroorderhold.signal.svg, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=870310>

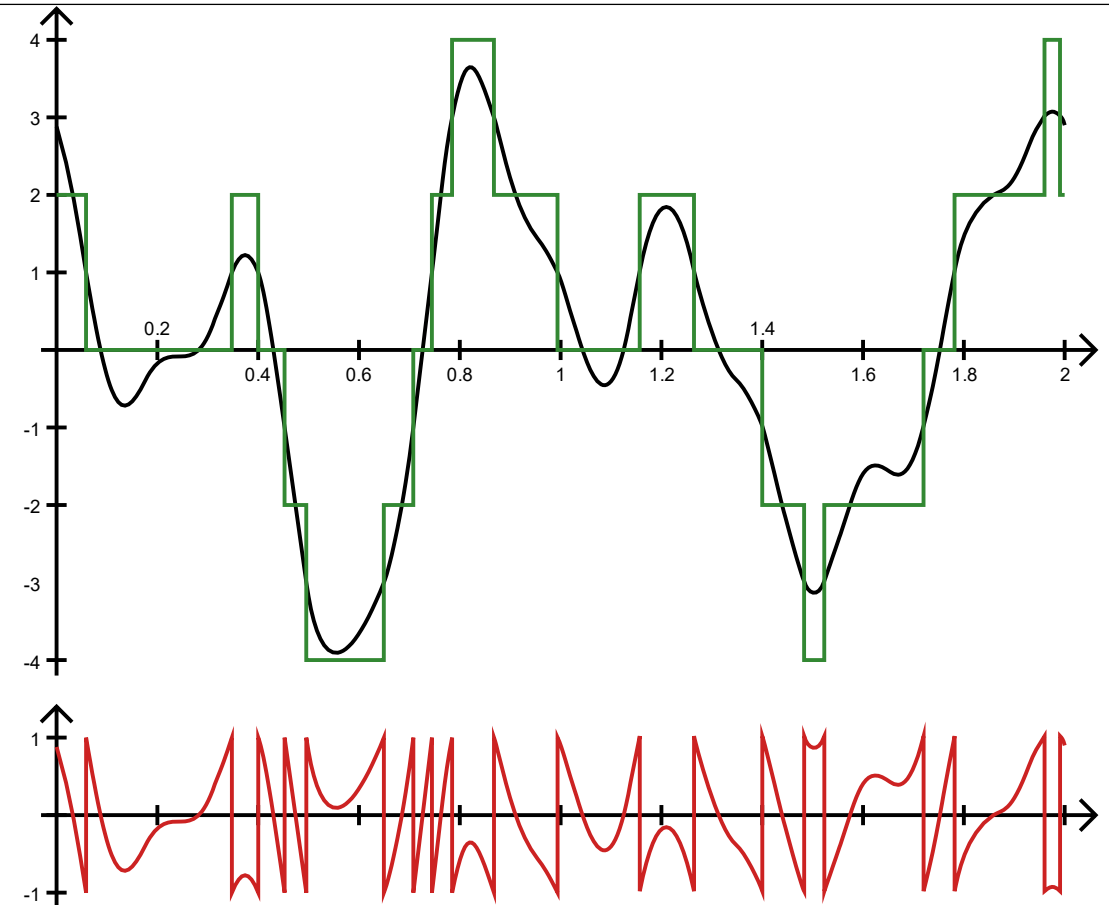
- Nyquist und Shannons Abtasttheorem besagt, das jedes periodische, bandbegrenzte Signal verlustfrei abgetastet werden kann
- Hierfür ist eine Abtastfrequenz von mindesten $f_s \geq 2 * f_{max}$ notwendig
- Solange dies der Fall ist verlieren wir durch die Abtastung des Signals keine Information
- Bei geringerer Abtastfrequenz wird unser Spektrum von Spiegelfrequenzen überlappt (später mehr)
- Den Effekt kennt ihr aus Videos: Räder von Autos, die vorwärts fahren, drehen sich scheinbar rückwärts.



Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1062676>

Quantisierungsfehler und -Rauschen

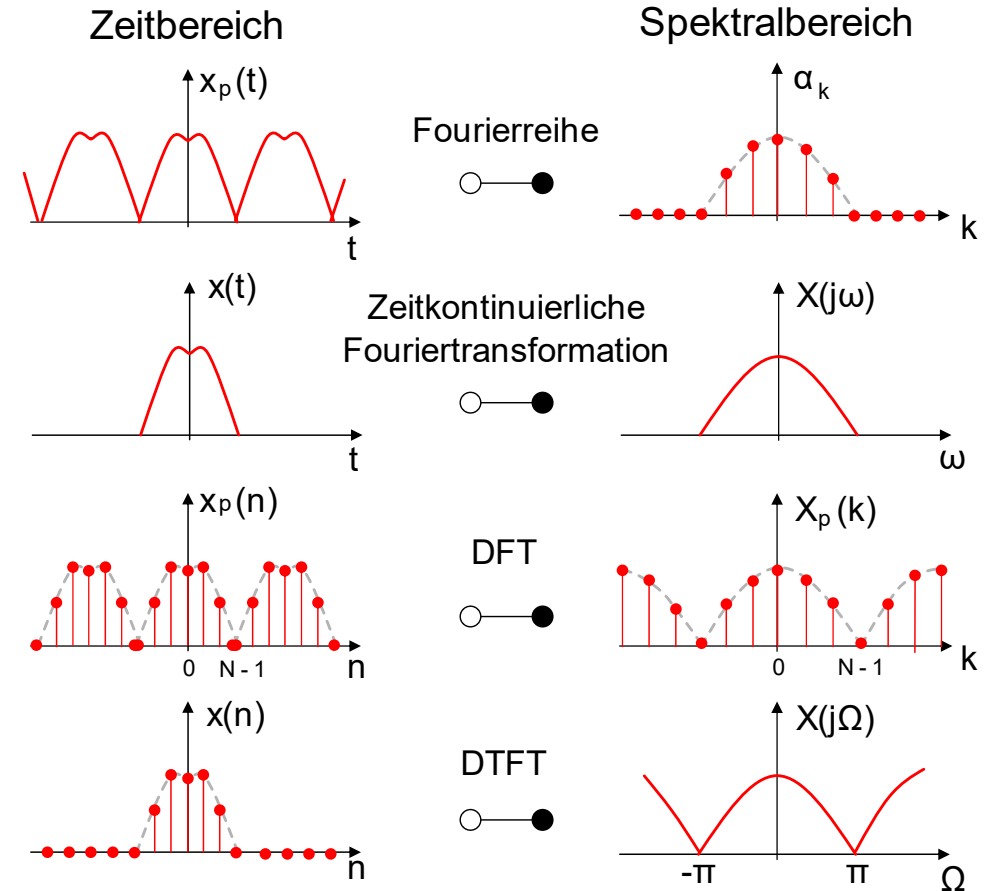
- Die Abtastwerte sind nur exakt in einen Datenstrom umwandelbar, wenn unendlich viele Bits pro Sample aufgewendet werden
- In realen ADC (Analog-Digital-Wandler) existieren eine begrenzte Bitanzahl (bspw. 16 (CD), 24 (Audio), oder 32 (High Fidelity und Scientific))
- Der unterschied, zwischen dem Samplewert und dem Abtastwert wird als Quantisierungsfehler bezeichnet.
- Der Quantisierungsfehler über ein Signal wird als Quantisierungsrauschen bezeichnet und kann auf verschiedene Arten (z.B. als weißes Rauschen) abgeschätzt werden.



Von Vollbracht - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=121475974>

- Die Fourier-Analyse zerlegt ein beliebiges Signal in Frequenzkomponenten des Signals
- Bei der Fourier-Analyse eines Signals wird dieses mittels folgender Formel aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert:

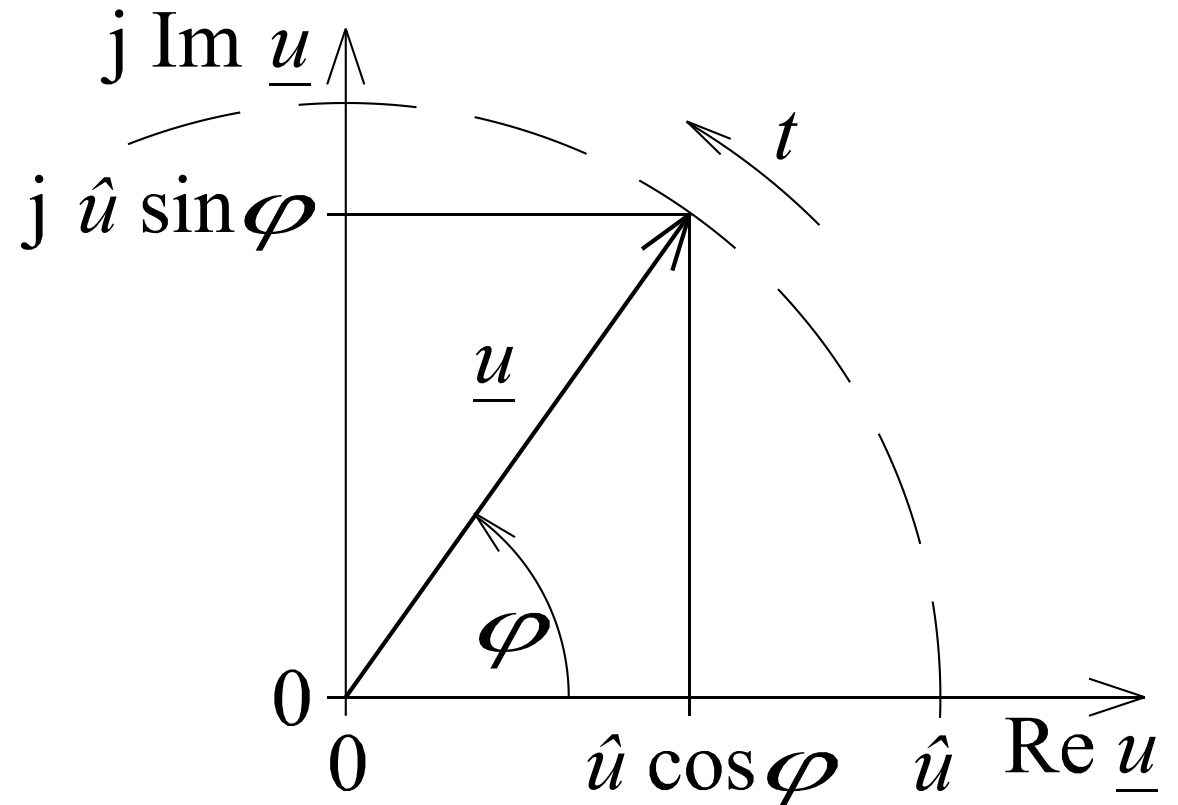
$$f(\omega) = \int_{-inf}^{inf} u(t) * e^{-i\omega t} dt$$
- Hier wird für jede Frequenz ω der Anteil des Signals berechnet, der mit dieser Frequenz schwingt.
- Im diskreten Fall entspricht jeder Fourier-Koeffizient $f(\omega_k)$ der Amplitude eines Phasors, der sich mit der Frequenz ω_k rotiert. Hier stoßen wir nun auf folgendes Problem



Von wdwd - Eigenes Werk, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16906525>

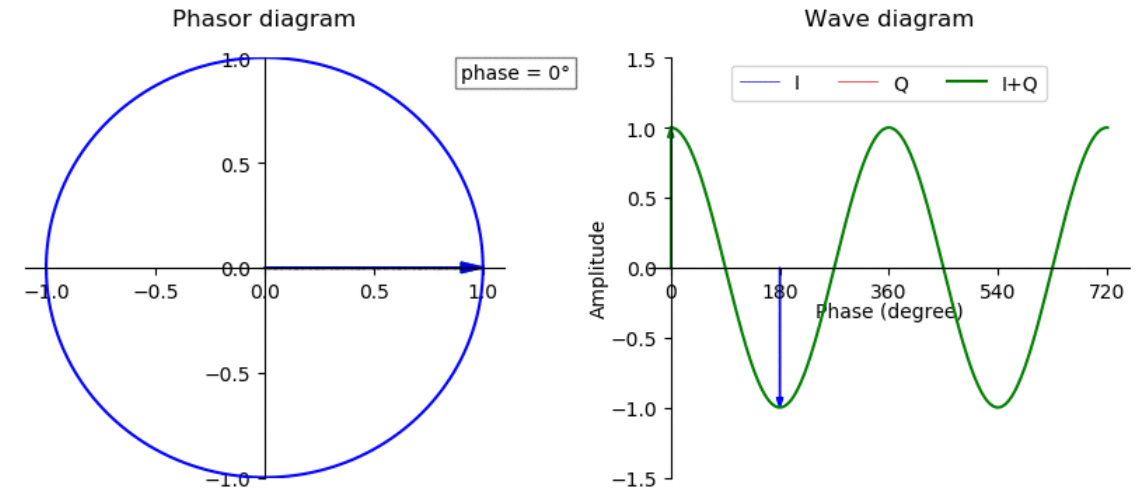
Symmetrie des Frequenzspektrums reeler Signale

- Da wir nur den Realteil des Phasors sampeln können mit einem einzigen Samplewert dargestellt werden, die oBdA dem Cosinus des rotierenden Phasors entsprechen
- Da dieses Signal symmetrisch bezüglich der Drehrichtung ist, kann nicht zwischen Signalen mit Frequenzen $\pm f$ unterschieden werden
- Per Konvention (und aus mathematischen Gründen) wird daher für ein reelles pures Sinussignal im Frequenzspektrum zwei Punkte bei $\pm f$ mit halber Amplitude angesetzt.

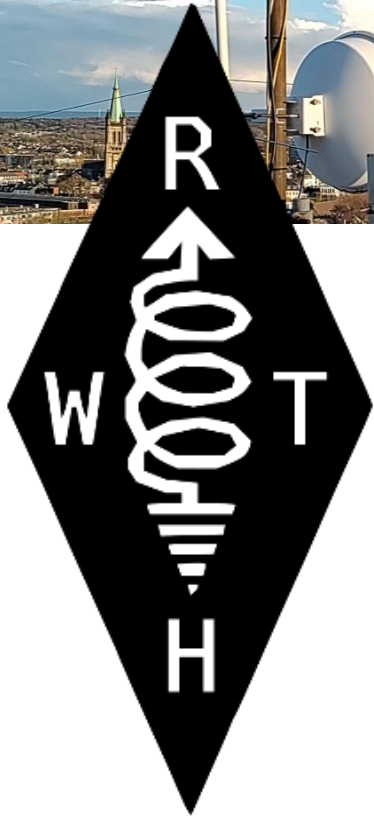


Von Saure, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15472756>

- Die Lösung des Problems finden wir im I/Q-Sampling
- Der rotierende Phasor wird nun nicht mehr mit einem einzelnen Wert abgetastet, sondern mit einem Koordinaten-Paar (I,Q)
- Ein wert entspricht dem Realteil des Phasors (In-Phase), der andere dem komplexen Anteil (Quadratur)
- Hierdurch kann eindeutig die Frequenz ω von $-\omega$ unterschieden werden.



By Vigneshdm1990 - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=86540231>



GNURADIO PRAXISVERSUCH

