I/Q-Signale / Vortrag Workshop

(Zusammengestellt von DL6OAA)

Basics of I/Q-Signals

SDR-Empfänger bzw. Sender verwenden I/Q-Daten für die Signalauswertung

Grundlegende Konzepte

- Komponenten einer Sinuswelle
- Einfache Amplitudenmodulation
- Quadratursignale
- Eigenschaften summierter Quadratursignale (IQ)
- Modulation/Demodulation von IQ-Signalen

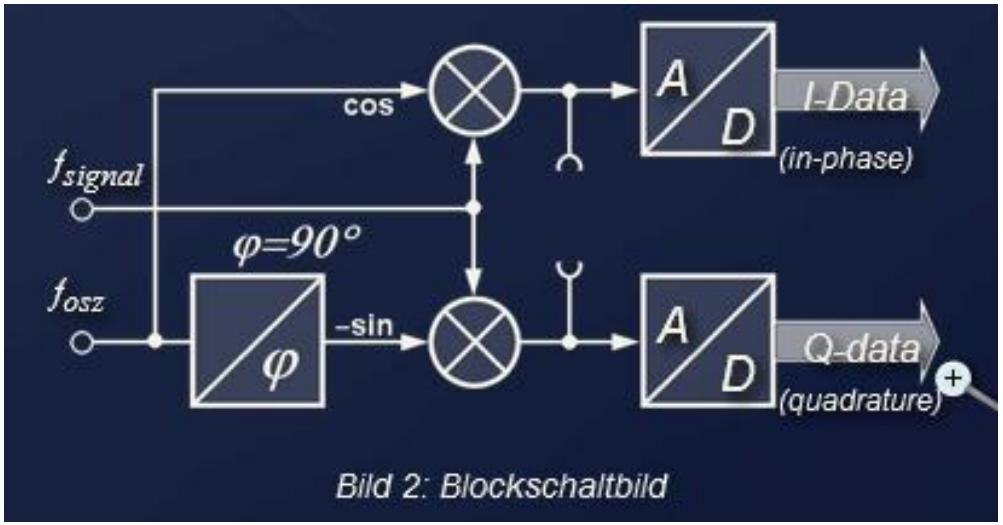
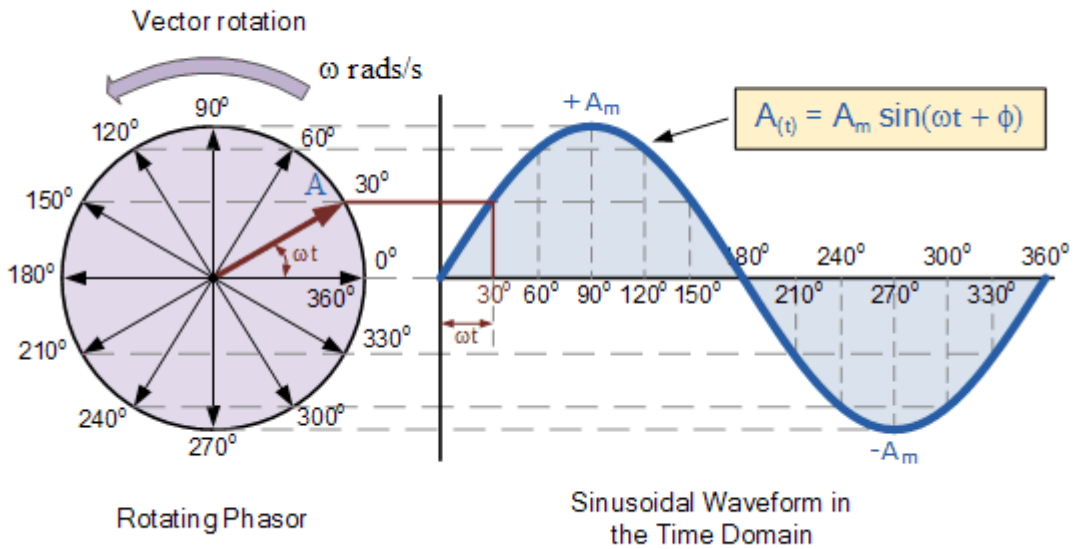


Bild 2: Blockschaltbild

Komponenten einer Sinuswelle

$$V(t) = A * \sin(2 * \pi * f * t + \phi)$$

Phasordiagramm einer sinusförmigen Wellenform



Komponenten einer Sinuswelle

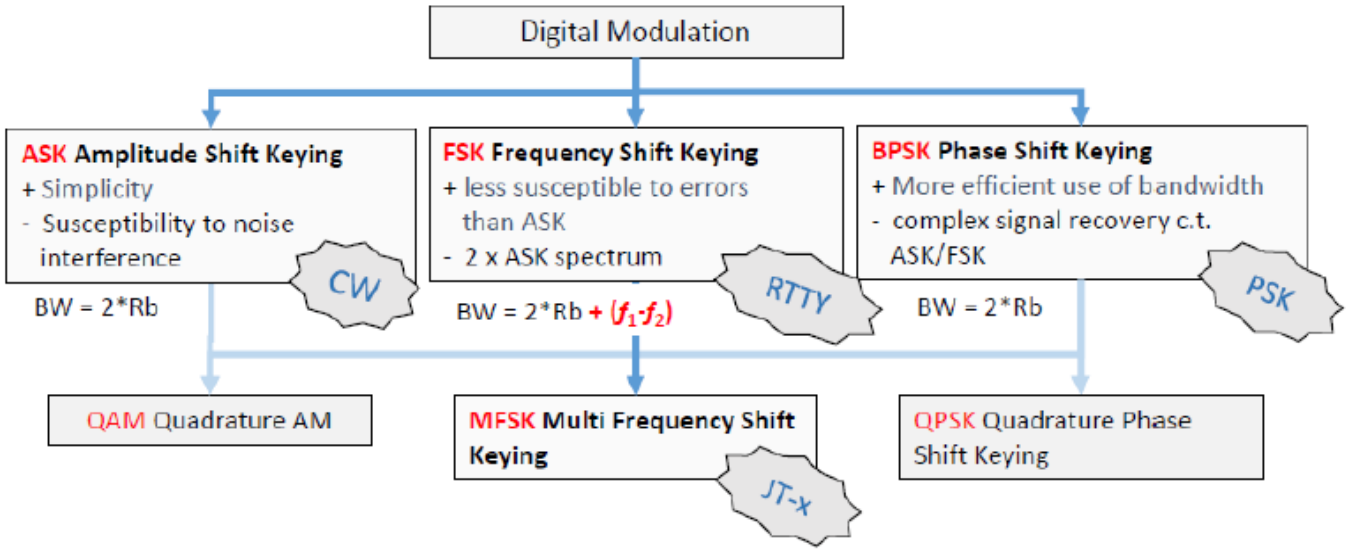
$$V(t) = A * \sin(2 * \pi * f * t + \phi)$$

Modulationsmöglichkeiten:

Amplitudenmodulation (AM) Frequenzmodulation (FM) Phasenmodulation (PM)

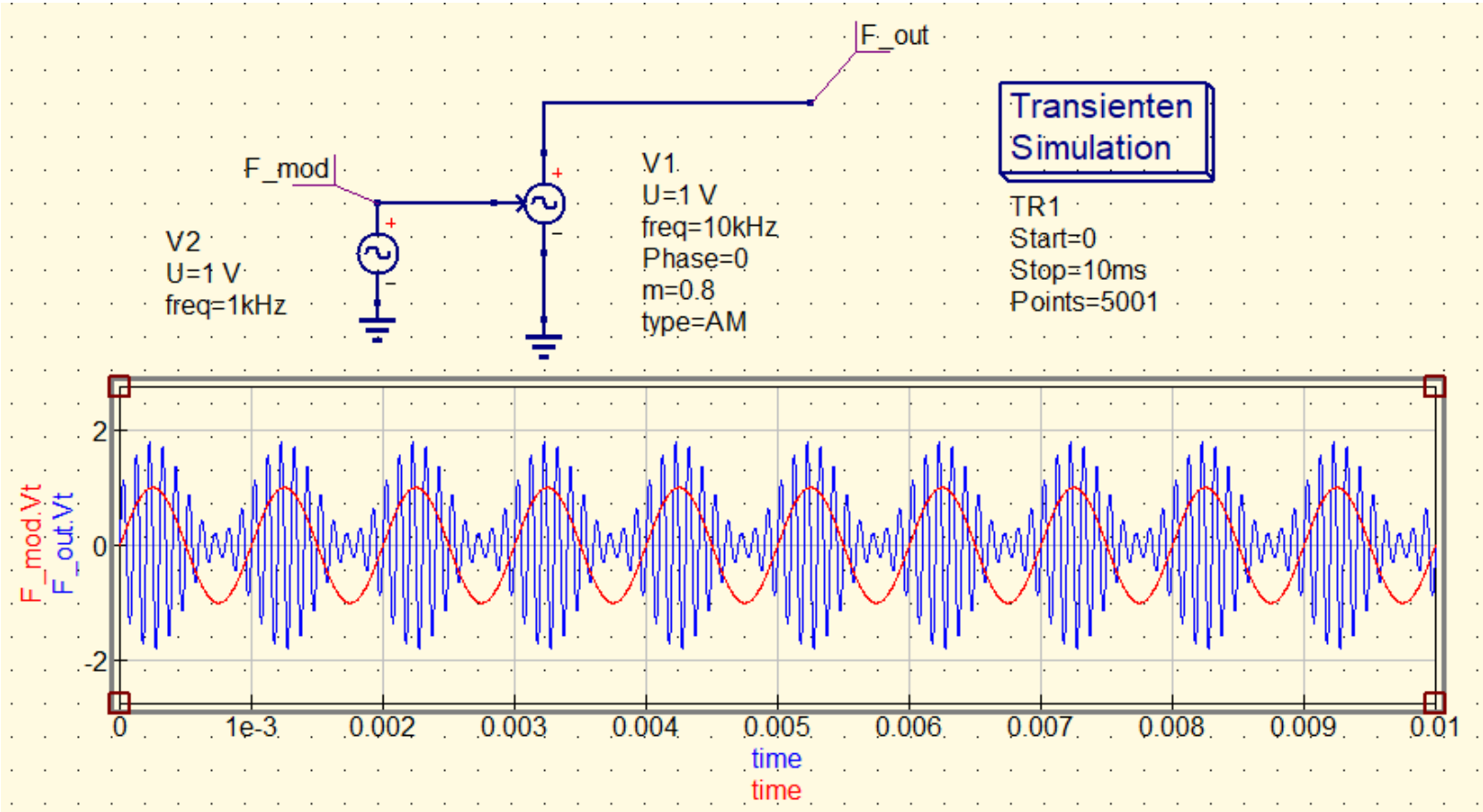
Alle Modulationsarten sind Kombinationen aus diesen drei Modulationen

Beispiele (digital);



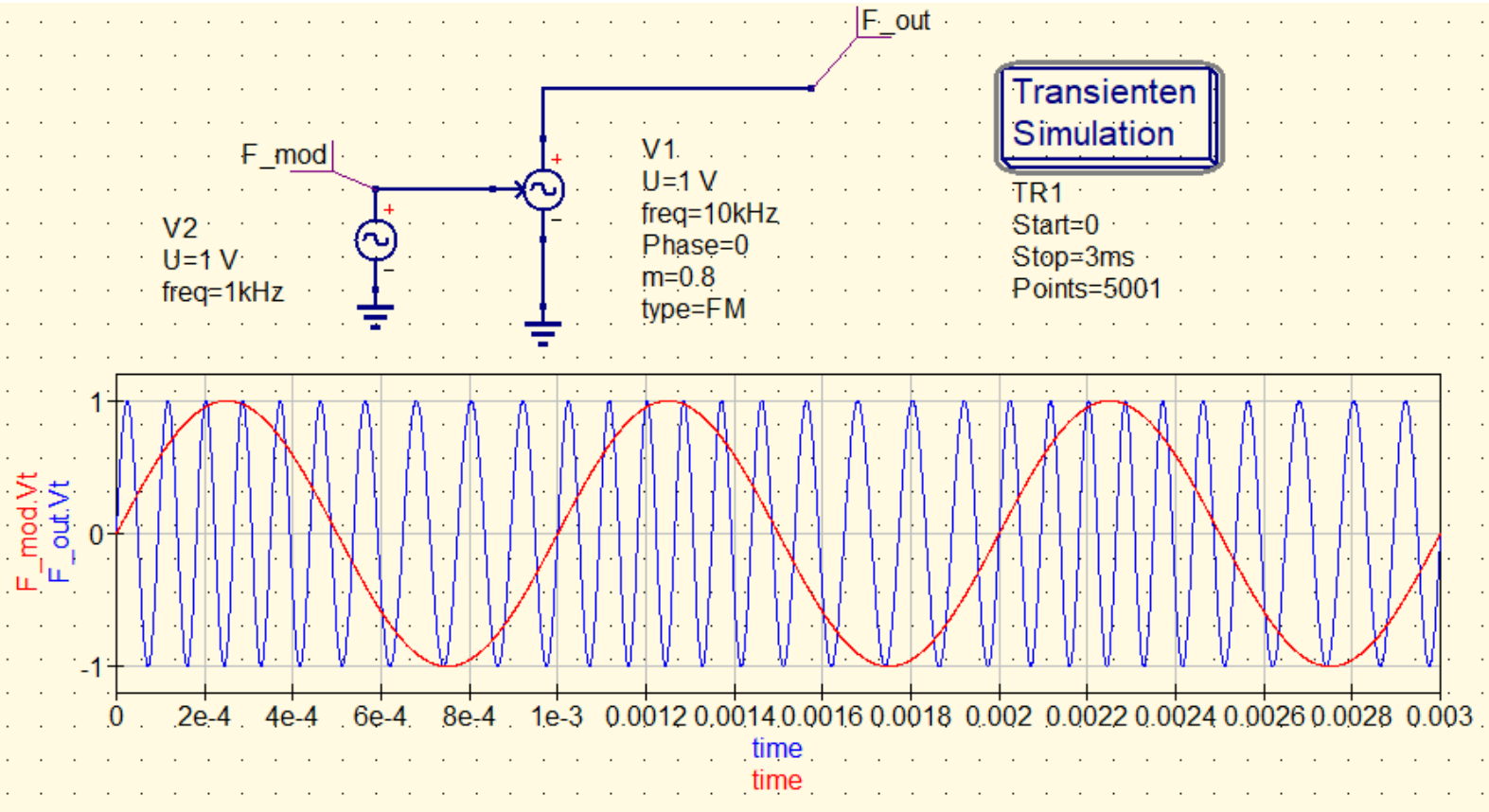
Einfache Amplitudenmodulation→ Amplitude als Funktion der Zeit

$$V(t) = A(t) * \sin(2 * \pi * f * t + \phi)$$



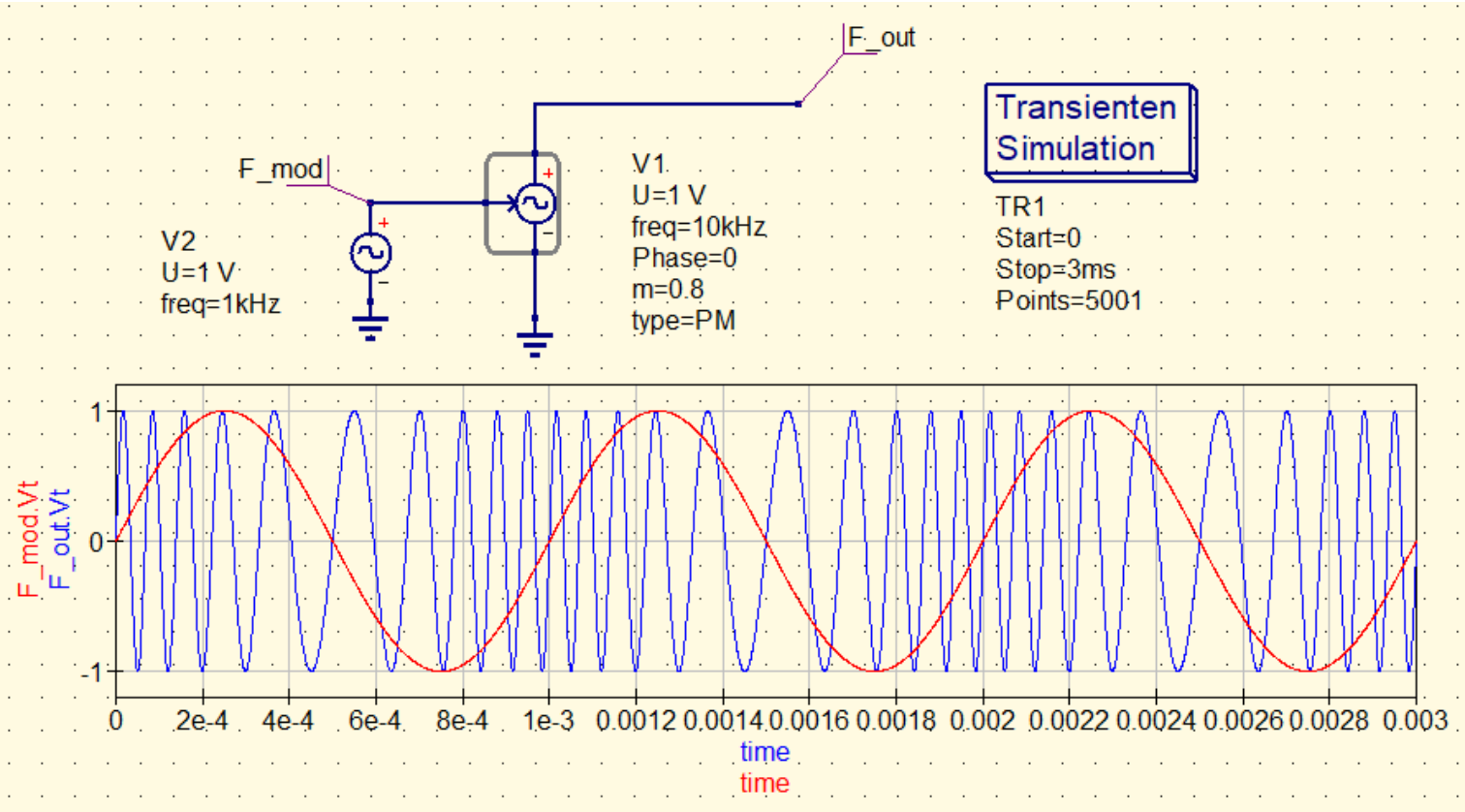
Frequenzmodulation → Frequenz als Funktion der Zeit:

$$V(t) = A * \sin\left(2 * \pi * f(t) * t + \phi\right)$$



Phasenmodulation → Phase als Funktion der Zeit:

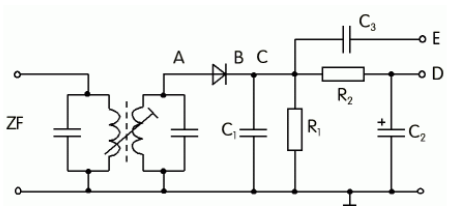
$$V(t) = A * \sin\left(2 * \pi * f * t + \phi(t)\right)$$



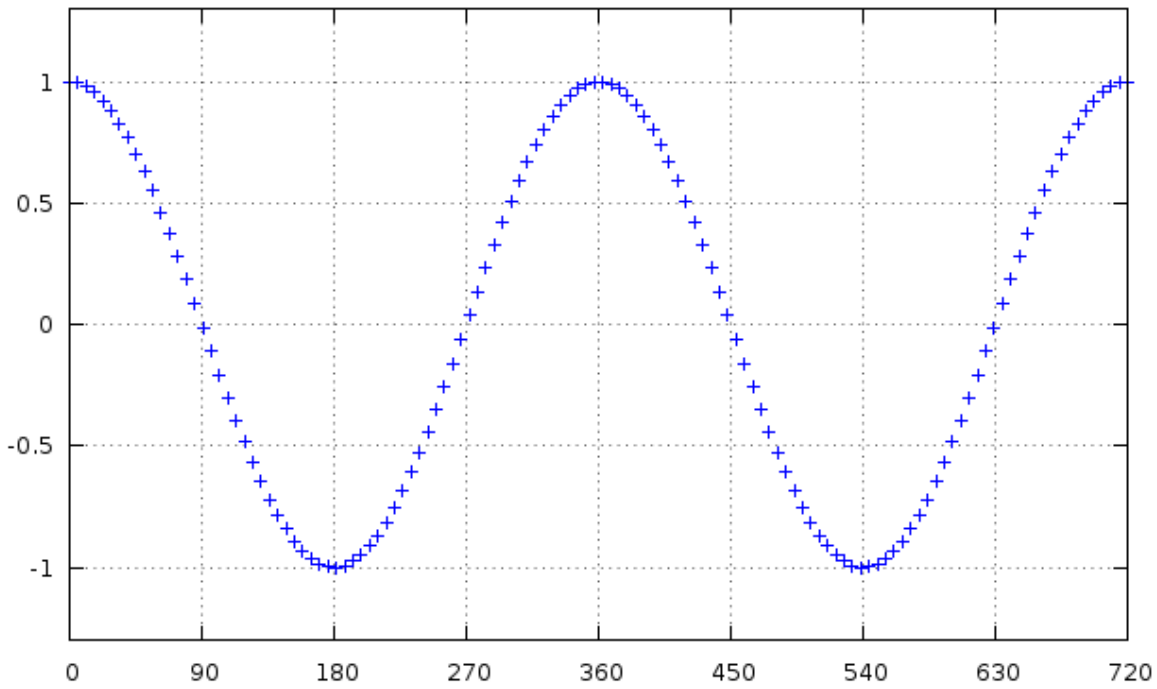
Warum I/Q-Signale?

Bei einer einfachen Demodulation wird nur der Realteil eines komplexen Signals ermittelt, also von einem Signal, welches am Eingang des Demodulators eine Amplitudengröße und eine Phasenlage hat, liegt am Ausgang der Demodulatorschaltung nur noch die Amplitudengröße an, die Phaseninformation ist verlorengegangen.

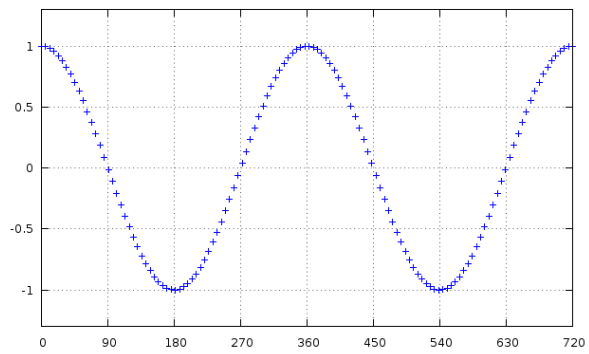
Verwendung einer Reihe von Abtastwerten der momentanen Amplitude des Signals



Es gibt hier ein paar Probleme.



Erstens ist es unmöglich, die Frequenz dieses Signals zu bestimmen. Die Periodendauer ist ablesbar, aber man hat keine Ahnung, ob es sich um eine positive oder eine negative Frequenz handelt, da beide die gleiche Kurve erzeugen, d.h. cos(x) = cos(-x).

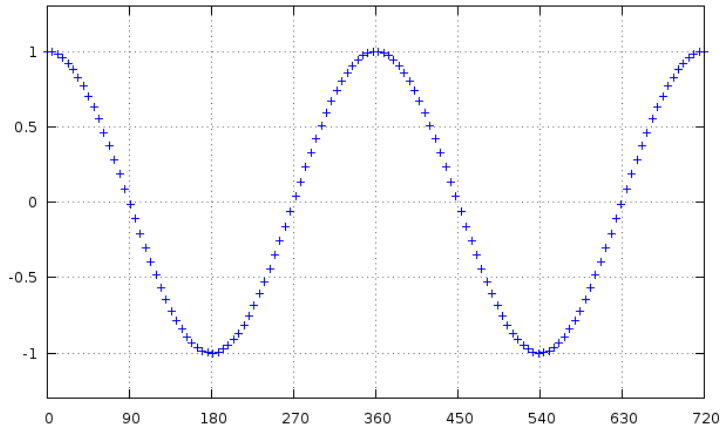


Animation cos(x)=cos(-x)

Hinwies: Damit die beiden Kurven (negative und positive Frequenz) unterscheidbar sind, wurde eine kleine Phasenverschiebung in der Animations-Graphik vorgenommen.

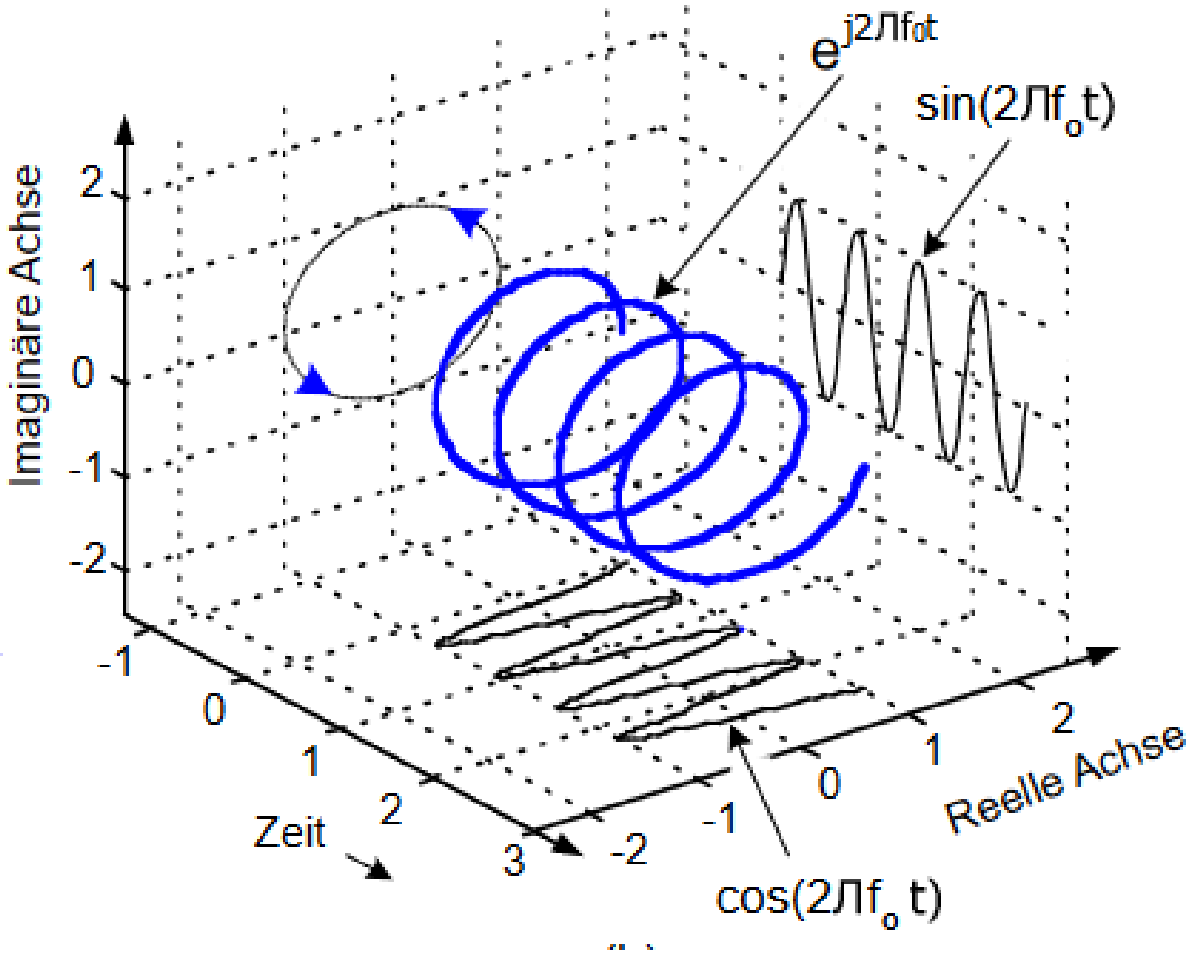
Dies wird zu einem Problem bei der Arbeit mit dem Signal. Das Mischen (Multiplizieren) zweier Signale führt aufgrund der Unsicherheit des Vorzeichens zu mehreren Lösungen: **f1 mal f2 ist gleich f1 + f2 sowie f1 - f2.**

Zweitens ist es schwierig, die Leistung (Spitzenamplitude, Hüllkurve) des Signals zu bestimmen.
Im Grunde sieht man hier nur die Spitzenamplitude bei 0°, 180°, 360° usw., und woher weiß man, dass die Leistung auch überall gleich ist?
Und wurde das Signal genau auf seinem Höhepunkt abgetastet? Man weiß es wirklich nicht.



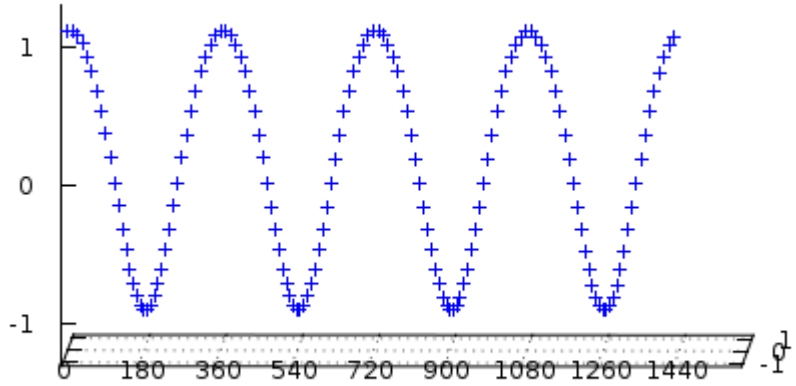
I/Q-Daten lösen dieses Problem. Wir betrachten das Signal nicht wie oben als flache Kurve, sondern als Spirale (Helix, Schraubenfeder) in drei Dimensionen.

Komplexes Signal

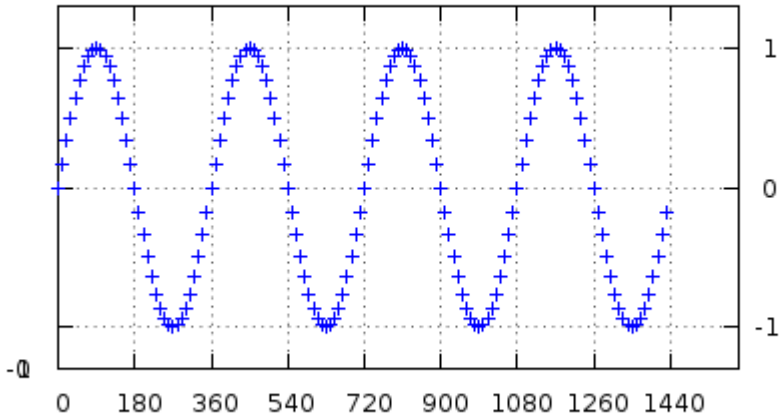


Wenn man diese Kurve nun von oben betrachtet, erhält tatsächlich die gleiche Grafik wie die erste oben. Das „echte“ Signal ist tatsächlich diese 2D-Projektion dieses Korkenziehersignals. Dies ist das „**I**“ in den I/Q-Daten (in-phase).

Seitenansicht der Helix



Helix-Ansicht von oben

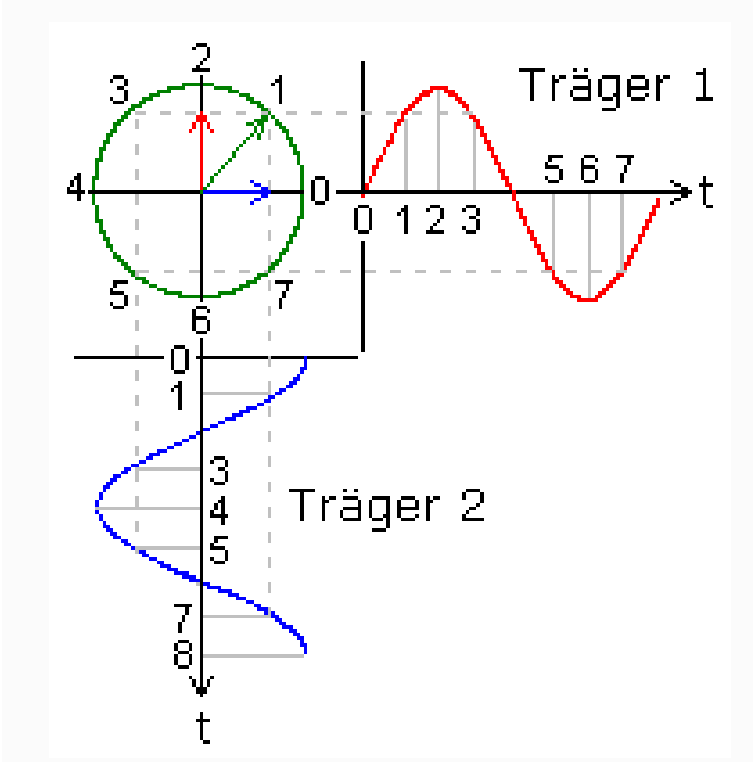


Wenn man die Helix von der Seite betrachtet sieht sie im Vergleich zur Ansicht von oben ziemlich ähnlich aus, aber die Kurve beginnt bei **null** um 90° phasenverschoben. Dies ist der **Q-Teil** der I/Q-Daten (quadrature).

Wenn man nun die Helix entlang der Zeitachse betrachtet, sieht man, dass sie sich gegen den Uhrzeigersinn dreht. Das bedeutet, dass wir wissen, dass die Häufigkeit positiv ist. Die Helix hätte sich auch im Uhrzeigersinn drehen können und immer noch das gleiche I-Signal (Projektion), aber ein anderes Q-Signal erzeugt, was eine **negative Frequenz** darstellt.

Man erkennt, dass der Radius der Spirale bei jeder Stichprobe konstant ist, wenn klein in I, groß in Q und umgekehrt. Der Radius ist die Spitzenamplitude des Signals.

Amplitude und Phase; Generierung von I und Q



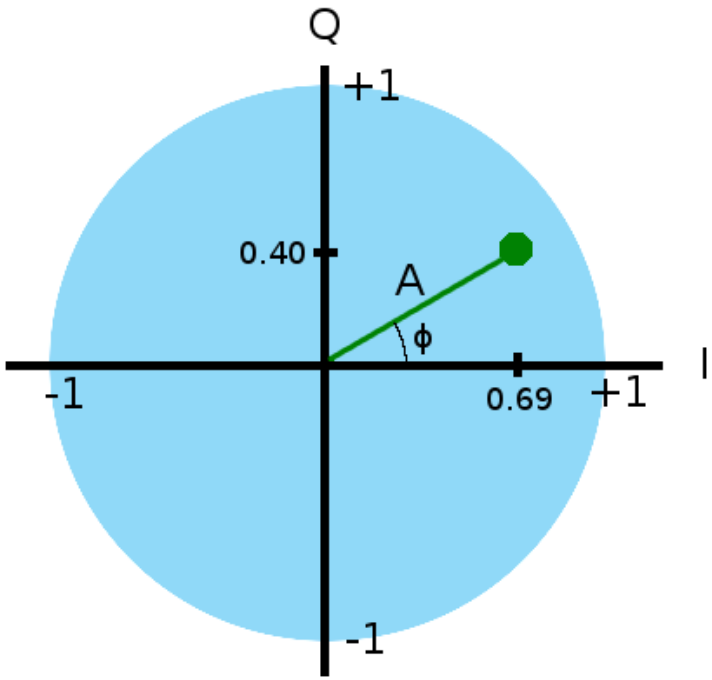
Darstellung im Phasendiagramm:

Ein Beispiel für I/Q-Daten

Beispiel einer Probe der I/Q-Daten:

I = 0,69
Q = 0,40

Zeichnen wir dies in der komplexen Ebene.



Der Phasenvektor A ergibt sich aus:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

Also $(0{,}69^2 + 0{,}4^2)^{1/2} = 0{,}8$

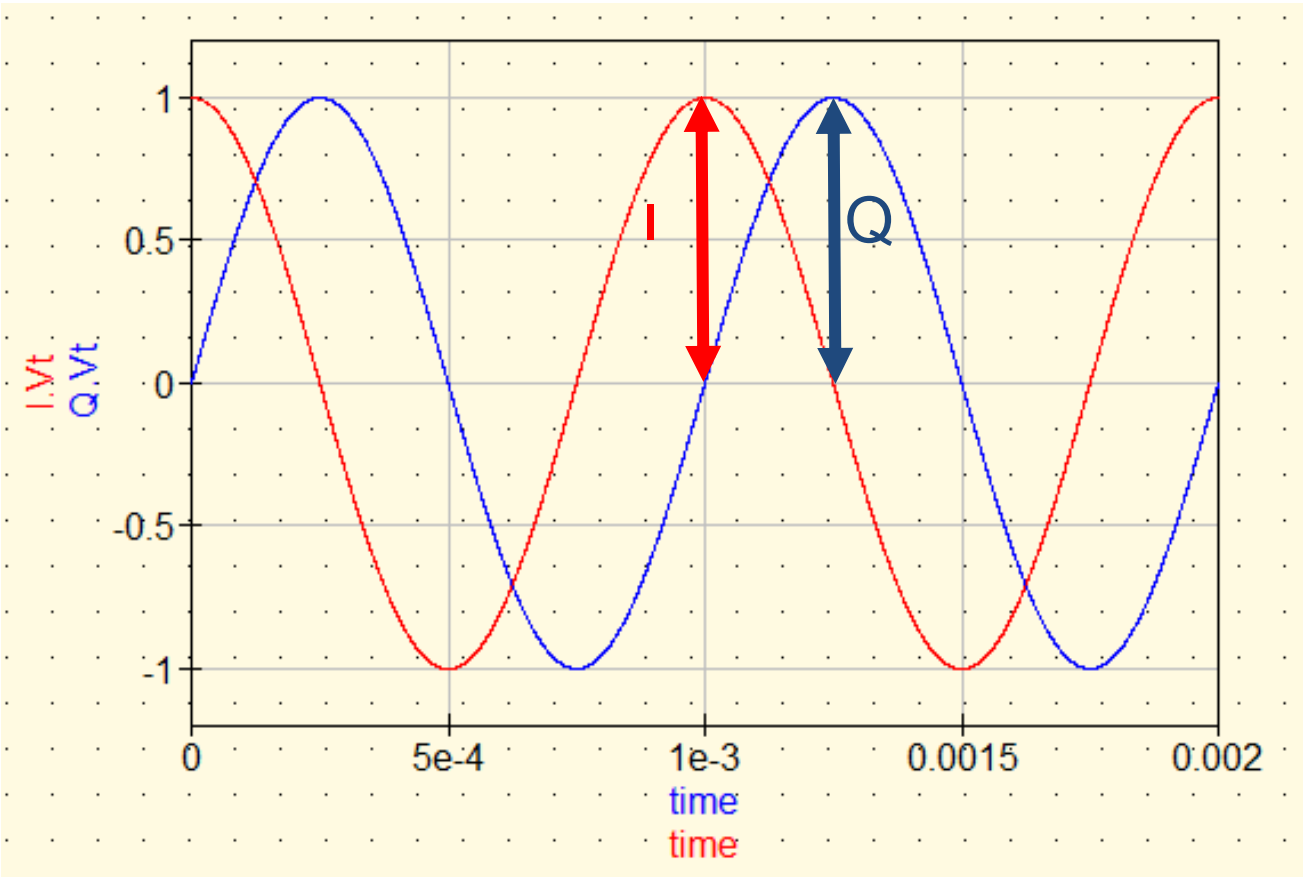
Berechnung von ϕ

A=0,8; I=0,69; cos=0,69/0,8= 0,866025 (→ cos = AK/H)

$\Phi = \arccos(0{,}866025) = 30{,}4^\circ$

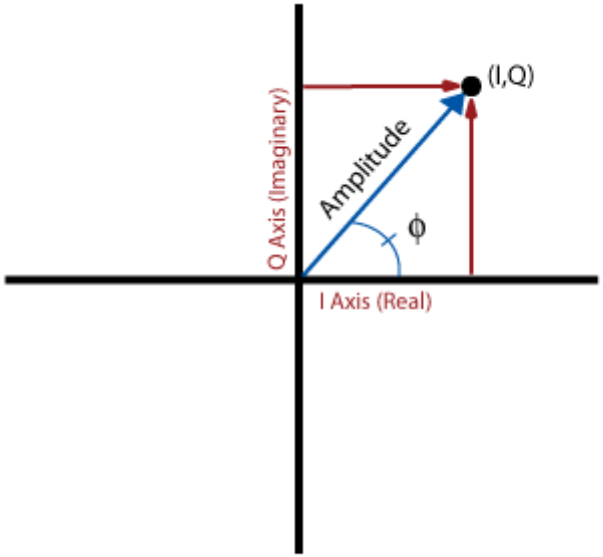
Quadratur Signale

Definition: Unter I/Q-Signalisierung versteht man die Verwendung zweier Sinuskurven mit **gleicher Frequenz** und einer relativen **Phasenverschiebung** von 90°.



Der Wert des In-Phase Signals I ist: $I = A * cos\,(2 * \pi * f * t)$

Und der Wert des Quadratur-Signals Q ist: $Q = A * \sin(2 * \pi * f * t)$



Note that the Amplitude above is the waves peak

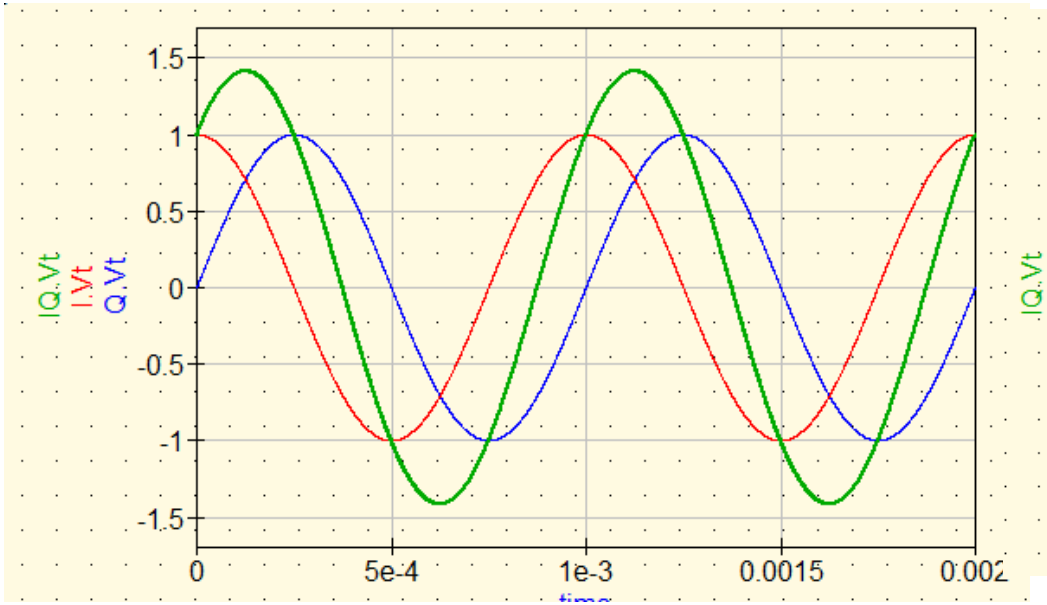
Summieren von I und Q

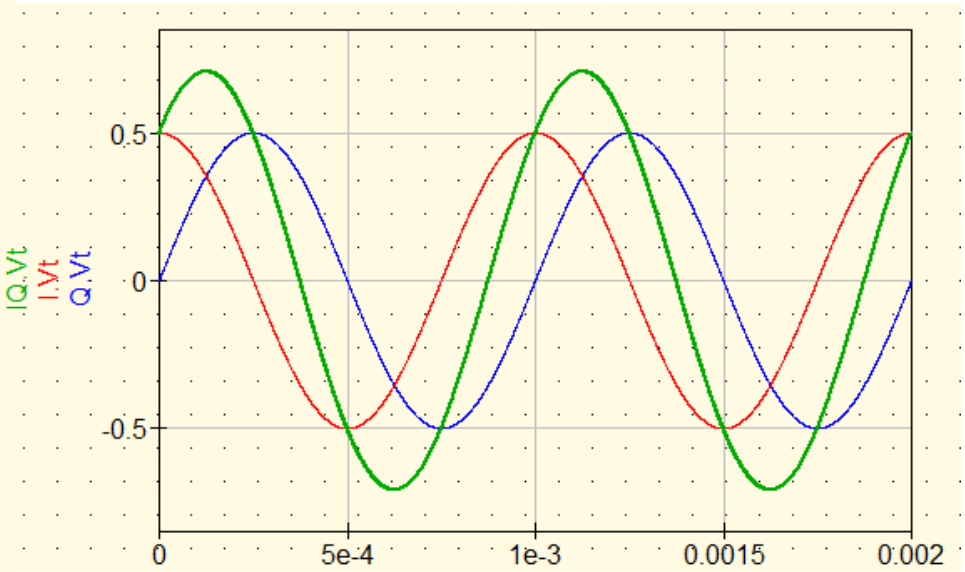
I- und Q-Signale allein sind nicht sehr interessant. Das Interessante passiert, wenn I- und Q-Wellenformen hinzugefügt werden.

Es stellt sich heraus, dass **jede Form der Modulation** einfach durch Variation der Amplitude der I- und Q-Signale (nur der Amplitude!) und deren anschließende Addition durchgeführt werden kann.

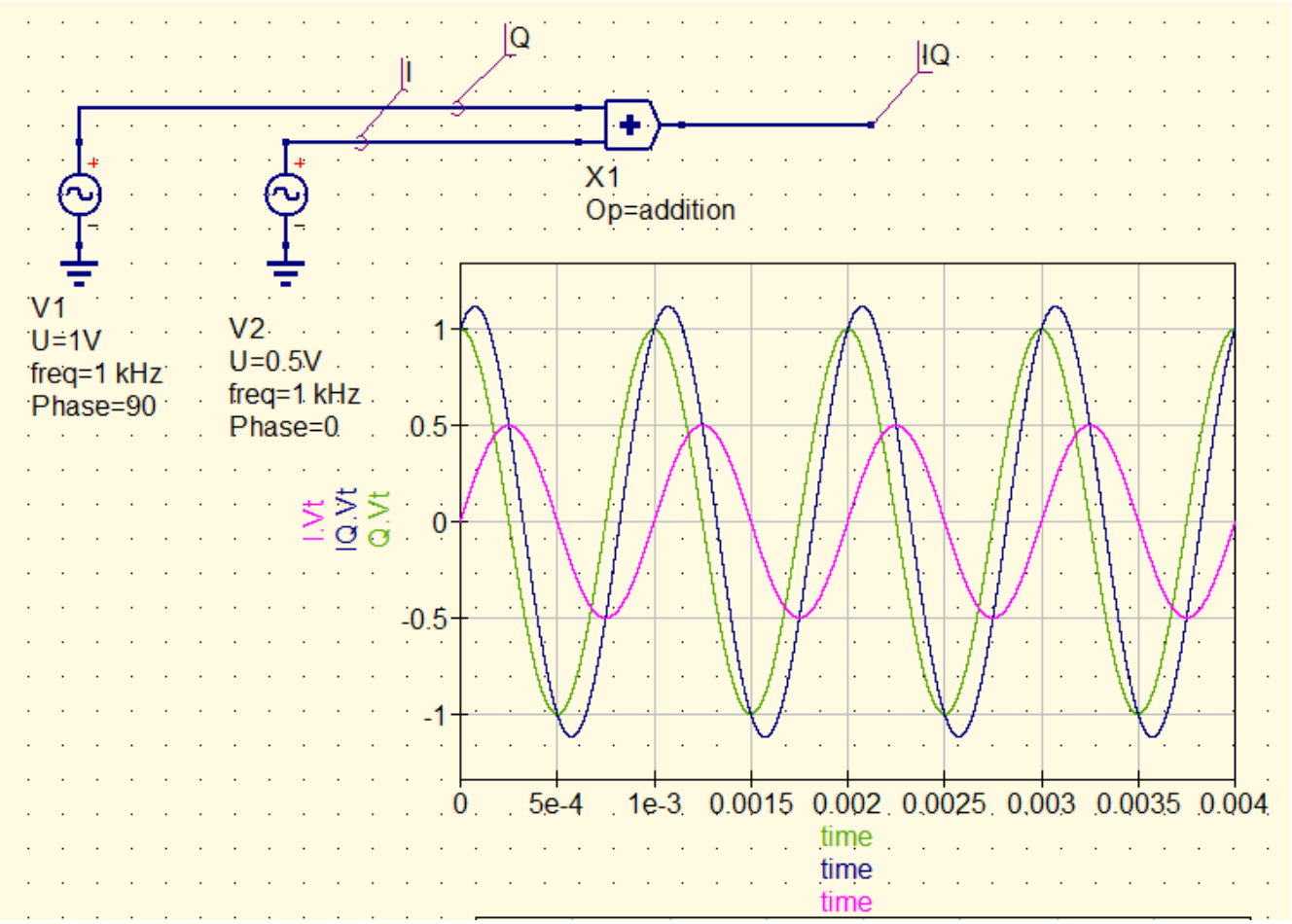
Addition von Quadratur-Signalen:

Werden I und Q in der Amplitude **gleichermaßen** erhöht oder reduziert, so ändert sich das Summensignal entsprechend in der Amplitude (keine Phasenverschiebung)



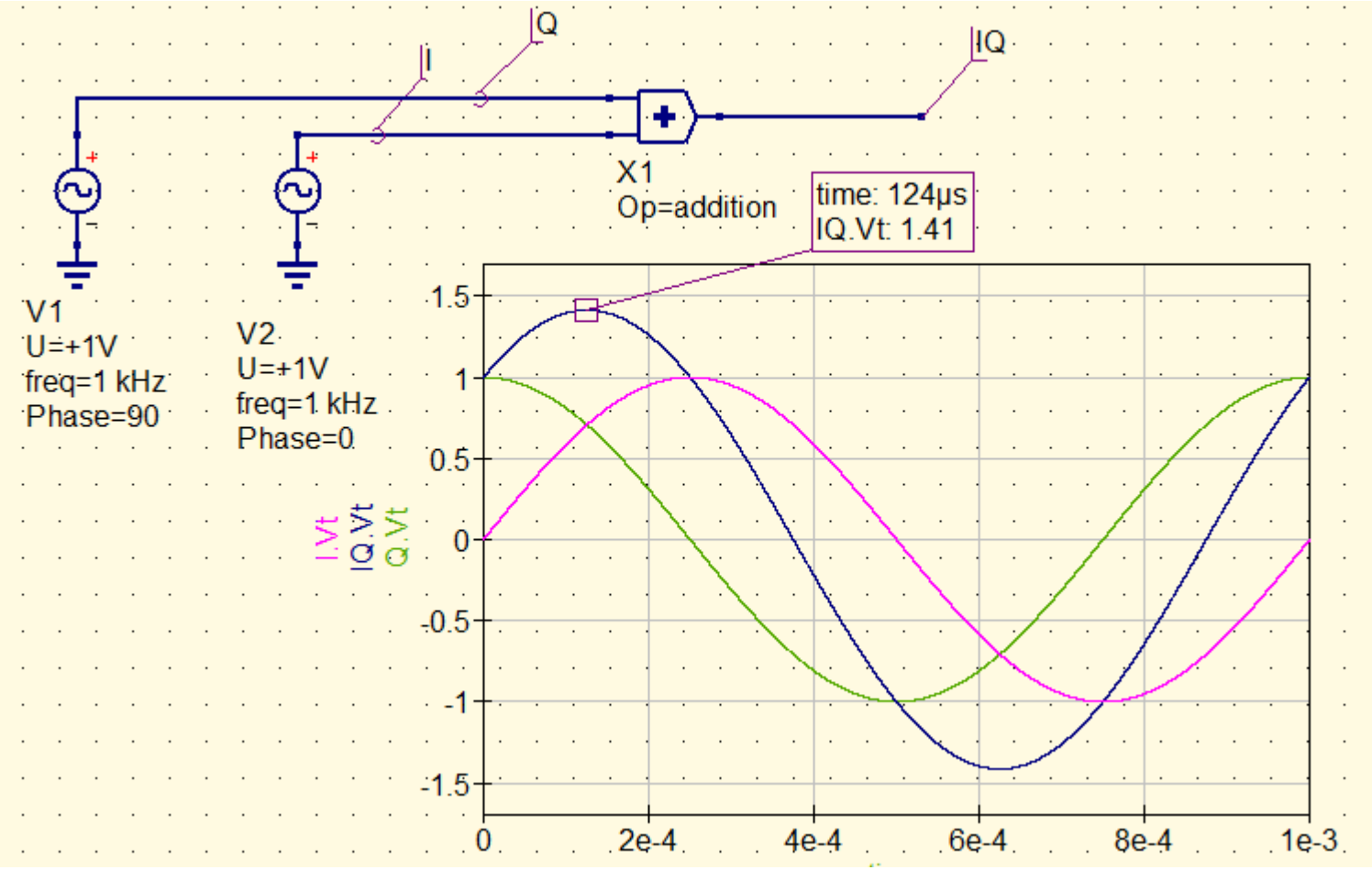


Wenn I und Q in der Amplitude unterschiedliche Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wird das Summensignal in der Phase verschoben (Phasenmodulation). Aber man erkennt, dass die I/Q-Signalisierung nur dazu verwendet werden kann, ein Signal um 90° (d. h. 45° in jede Richtung) zu verschieben:
Wenn die Q-Amplitude auf Null reduziert wird, geht die Summierung bis zum I Phase;
Wenn die I-Amplitude auf Null reduziert wird, geht die Summierung bis zur Q-Phase.

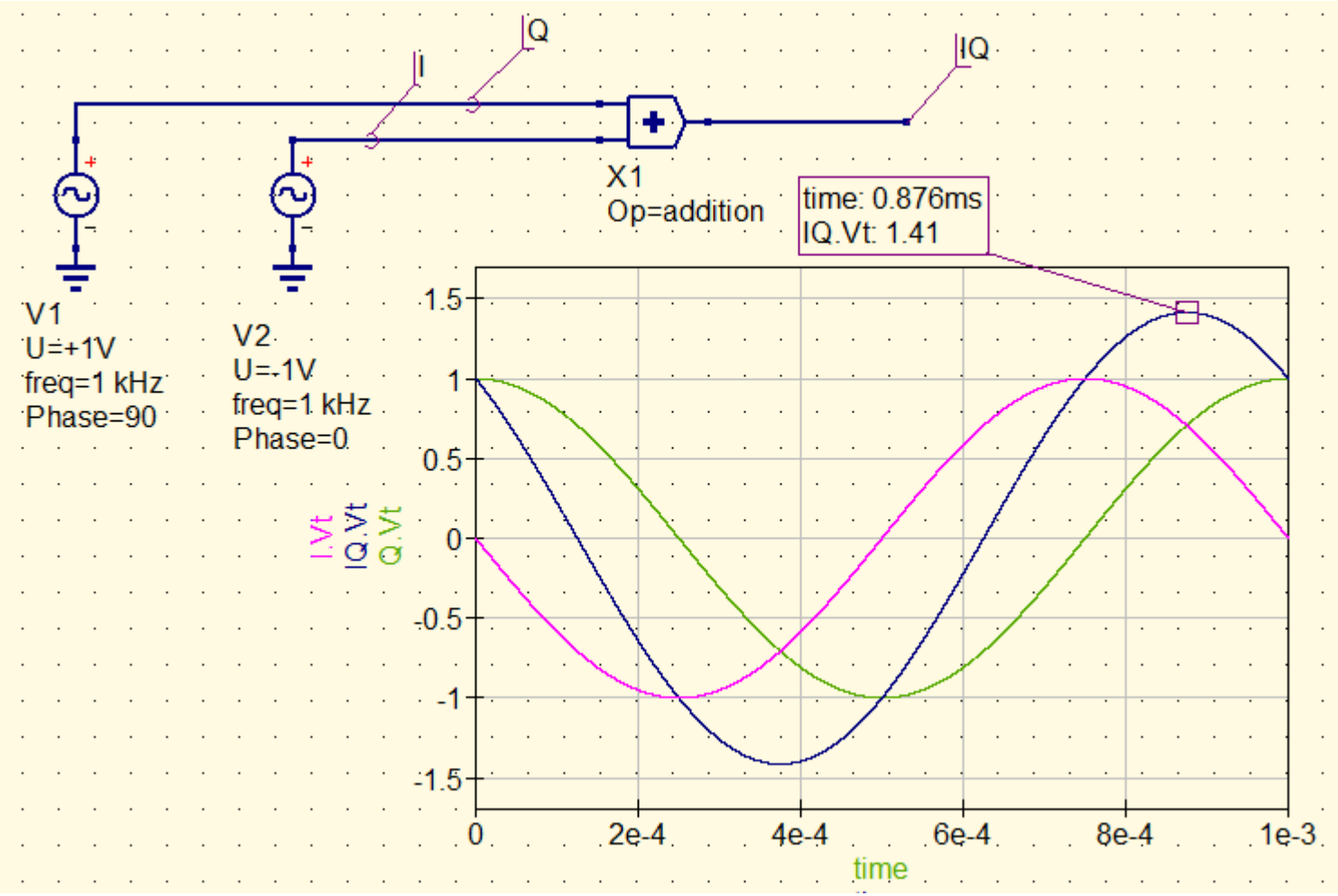


Wird I=0 ist das Summensignal = Q und wenn Q=0 wird das Summensignal = I

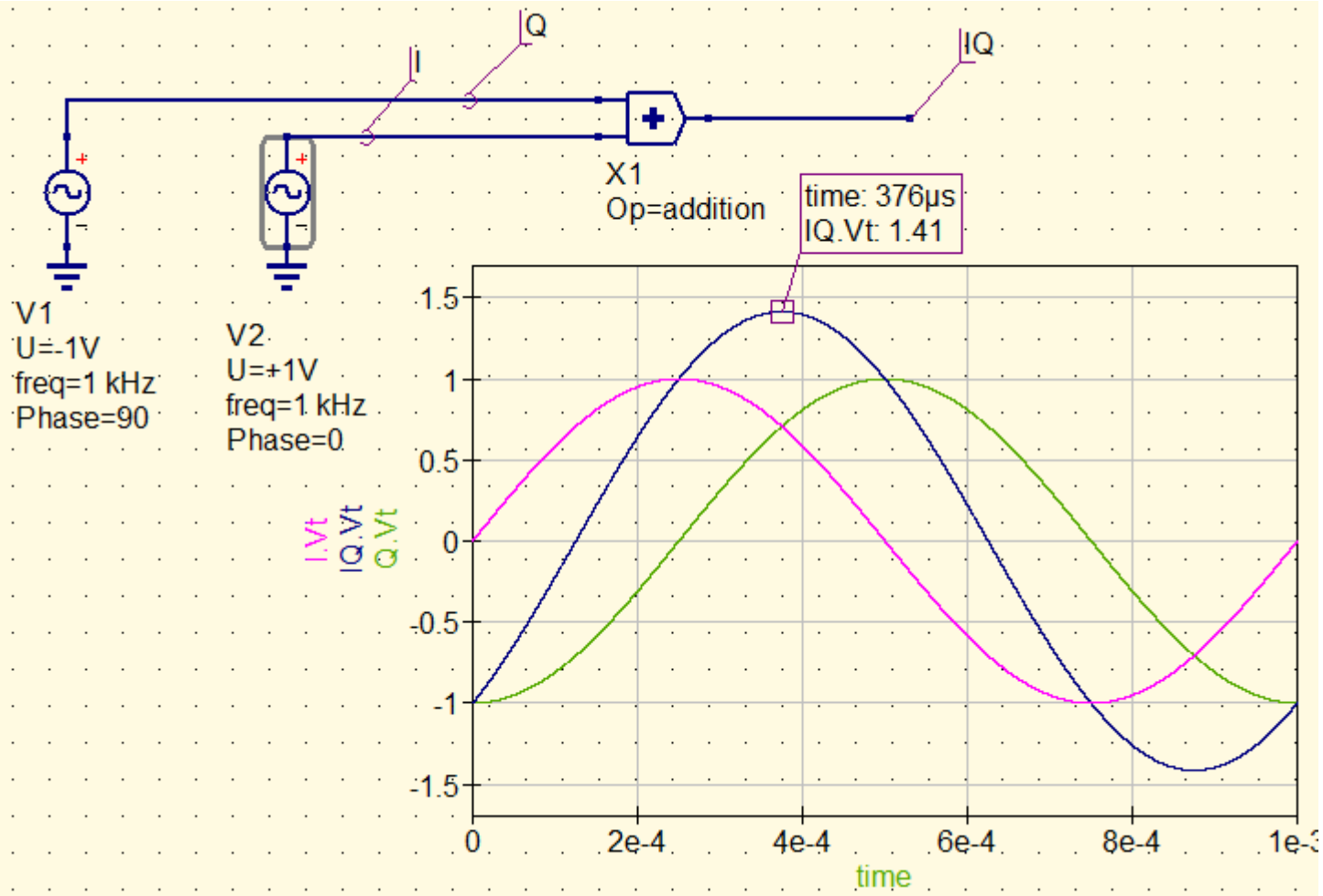
I=+1 / Q=+1 → Phasenverschiebung des IQ-Signals um 45°



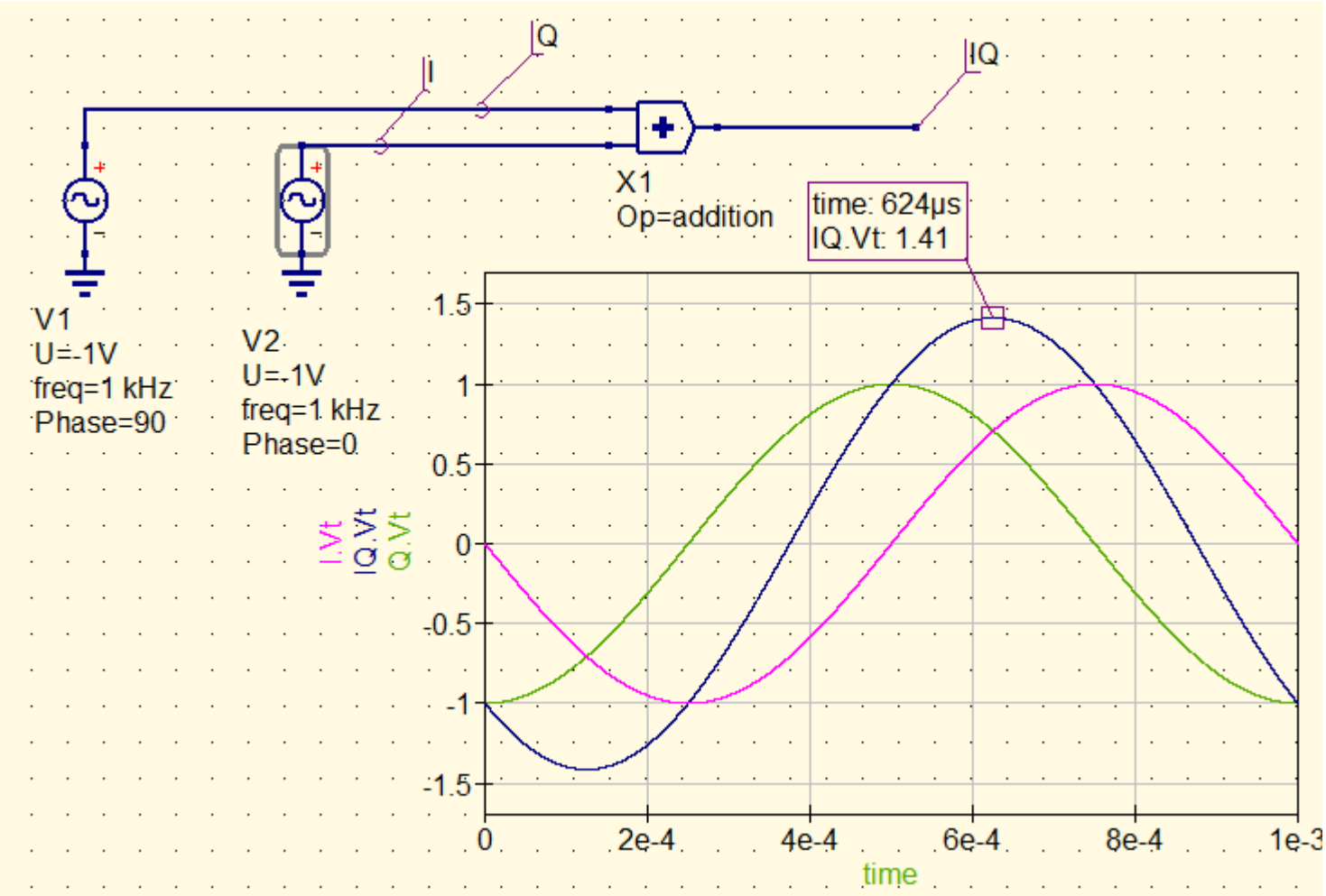
I=+1 / Q=-1 → Phasenverschiebung des IQ-Signals um 315°

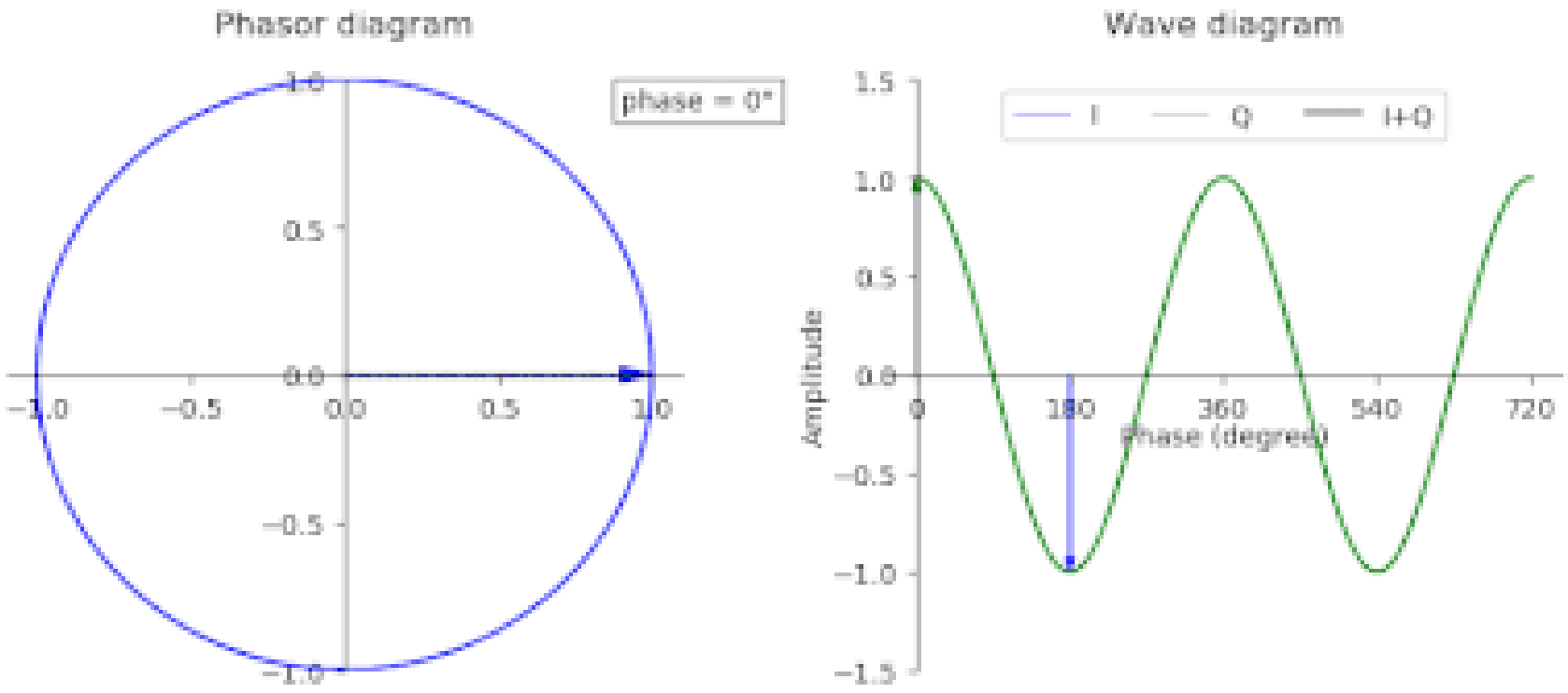


I=-1 / Q=+1 → Phasenverschiebung des IQ-Signals um 135°



I=-1 / Q=-1 → Phasenverschiebung des IQ-Signals um 225°

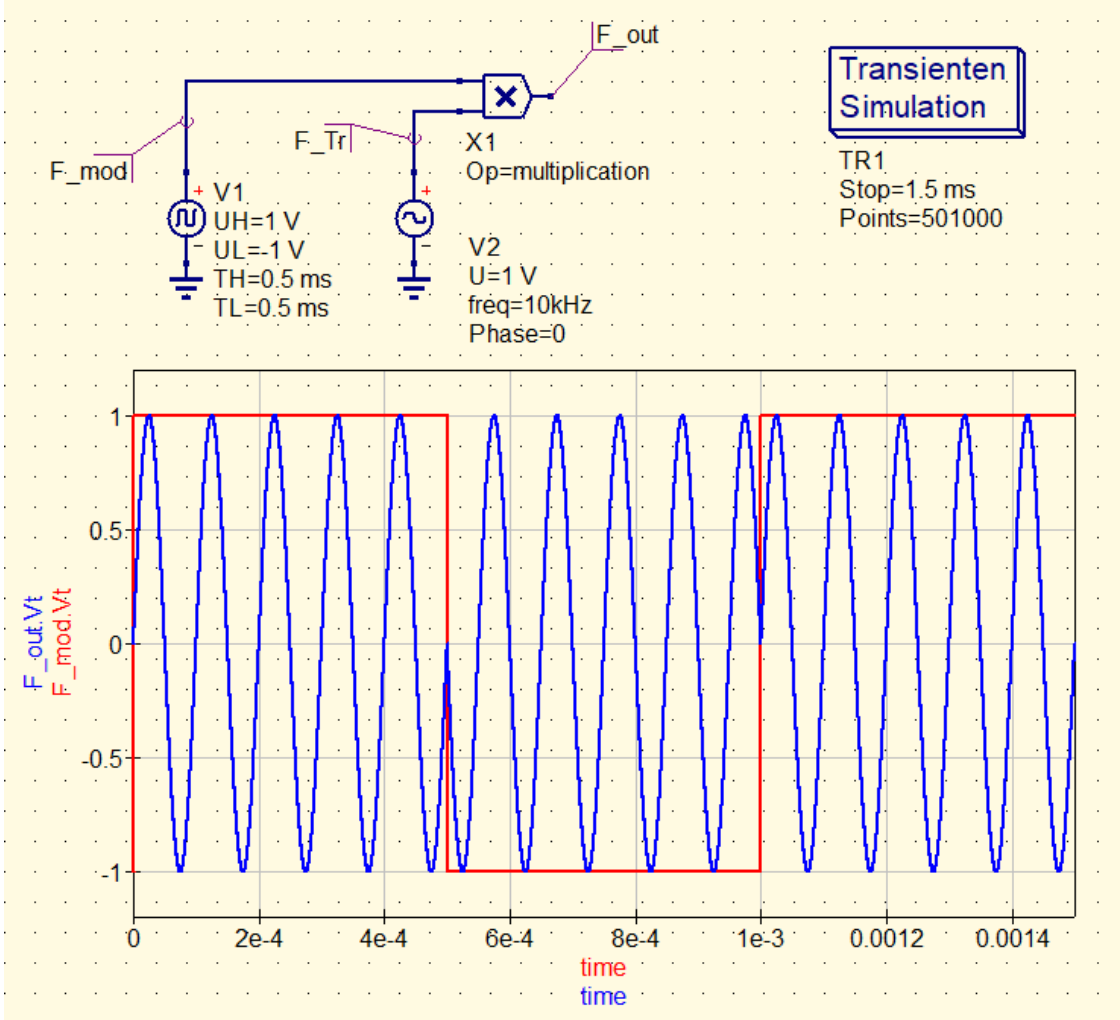




https://en.wikipedia.org/wiki/File:Phase_shifter_using_IQ_modulator.gif

Von der Amplitude zur Phase

Phasenmodulation in Form von Phasenumtastung ist eine wichtige Technik in modernen HF-Systemen, und Phasenmodulation kann bequem durch **Variation der Amplitude** von I/Q-Signalen erreicht werden.



Wenn es sich bei den I- und Q-Datenströmen jedoch um bipolare Signale handelt (NRZ) – d. h. wenn sie zwischen einer negativen und einer positiven Spannung schwanken – invertiert unsere „Amplitudenmodulation“ tatsächlich den Träger, wenn die Eingangsdaten logisch niedrig sind (aufgrund der negativen Eingangsspannung multipliziert mit dem Träger ergibt eine Invertierung). Das bedeutet, dass wir vier I/Q-Zustände haben werden:

I&Q-Addition; Beispiel 1kHz			
Δϕ	µs	I	Q
0	0		
45	125	+1	+1
90	250	+1	0
135	375	-1	+1
180	500	0	-1
225	625	-1	-1
270	750	-1	0
315	875	+1	-1
360	1000	0	+1

Durch Variationen der I und Q-Werte als Funktionen der Zeit resultieren komplexe Modulationsarten (AM, FM, PM). Hinweis, gelb unterlegt → NRZ-Code

Dieser Code soll in ein BPSK-Signal gewandelt werden - nach jeder Änderung von 1 zu 0 oder 0 zu 1 findet eine Phasenumtastung statt: 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0

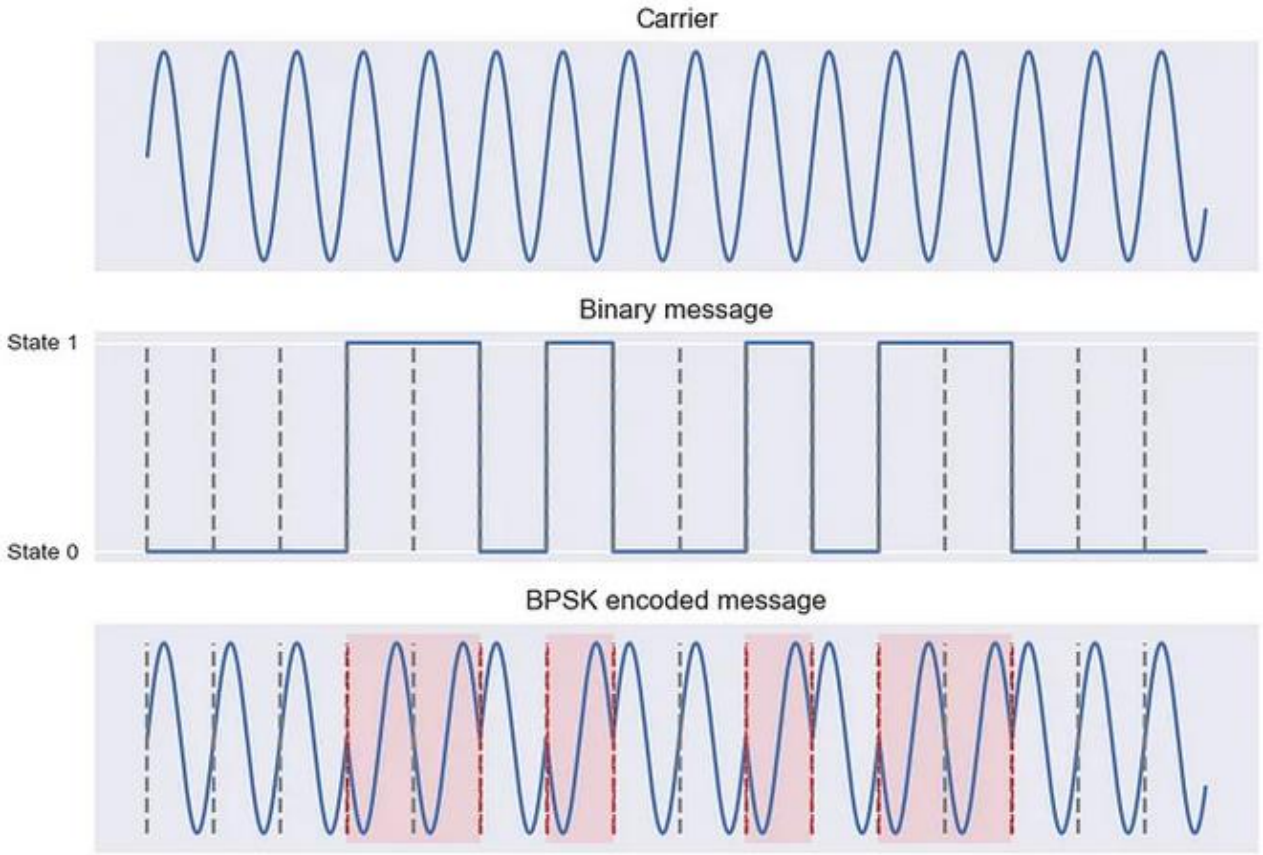
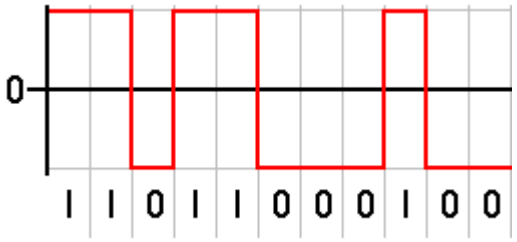


Figure 2: Simple BPSK encoding of a binary sequence. Image by author.

Weitere Begrifflichkeiten (2 Beispiele für Leitungscodes):

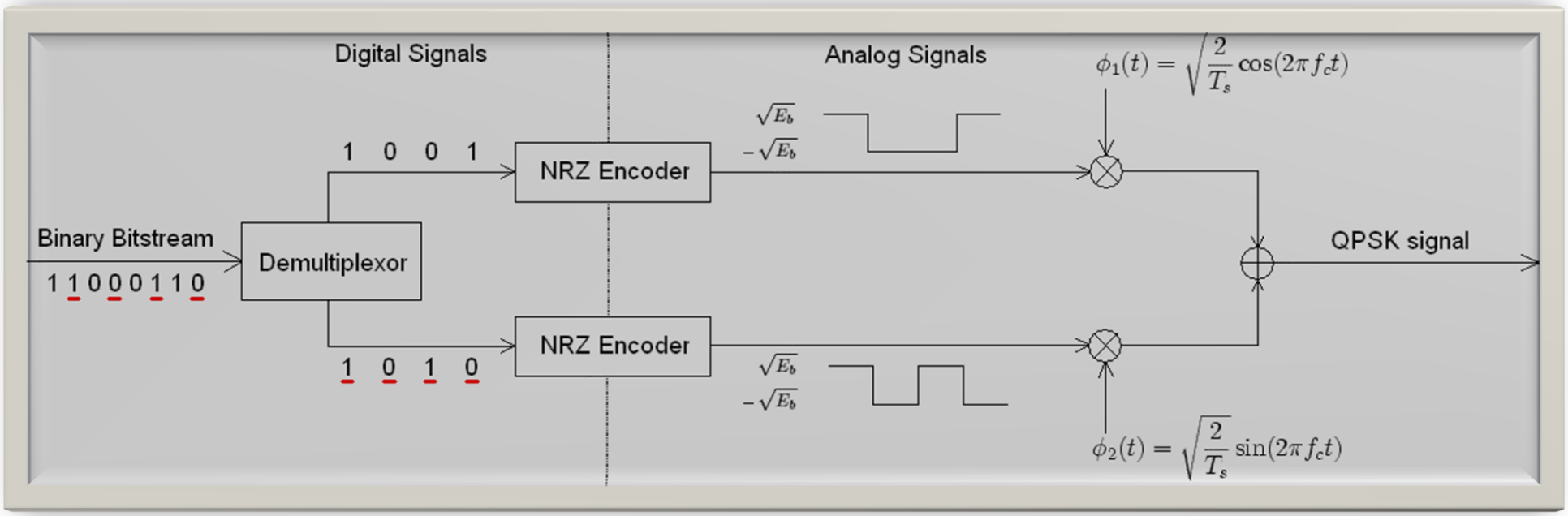
Non Return to Zero (NRZ) ist ein Binärcode, der bei der Telekommunikationsübertragung verwendet wird, wobei ein Datenbit von 1 eine positive Spannung und ein Datenbit von 0 eine negative Spannung ist. Der NRZ-Code hat keinen neutralen Zustand, im Gegensatz zum Return to Zero (RZ)-Code, der einen Ruhezustand hat.
Nachteil: Ein Synchonisationsrahmen ist erforderlich (separates Taktsignal).
Vorteil: Ein Verpolen der Übertragungsleitung ändert nicht die Bitfolge.



Beim **Return-to-Zero-Code** (kurz **RZ-Code)** handelt es sich um einen Leitungscode, mit dem es möglich ist, Binärzahlen über ein Medium zu übertragen, indem der Sender dessen Zustand zwischen drei Pegelwerten (Sendesymbole, meist als +1, 0 und −1 bezeichnet) wechseln lässt.
Vorteil: Beim Übertragen eines Bits garantiert eine Pegeländerung die Möglichkeit einer Synchronisation im Empfänger (Taktrückgewinnung)
Nachteil: Doppelte Bandbreite gegenüber NRZ benötigt.

Quadraturmodulation

Der Begriff „Quadraturmodulation“ bezieht sich auf eine Modulation, die auf der Summation zweier Signale basiert, die sich in Quadratur befinden.

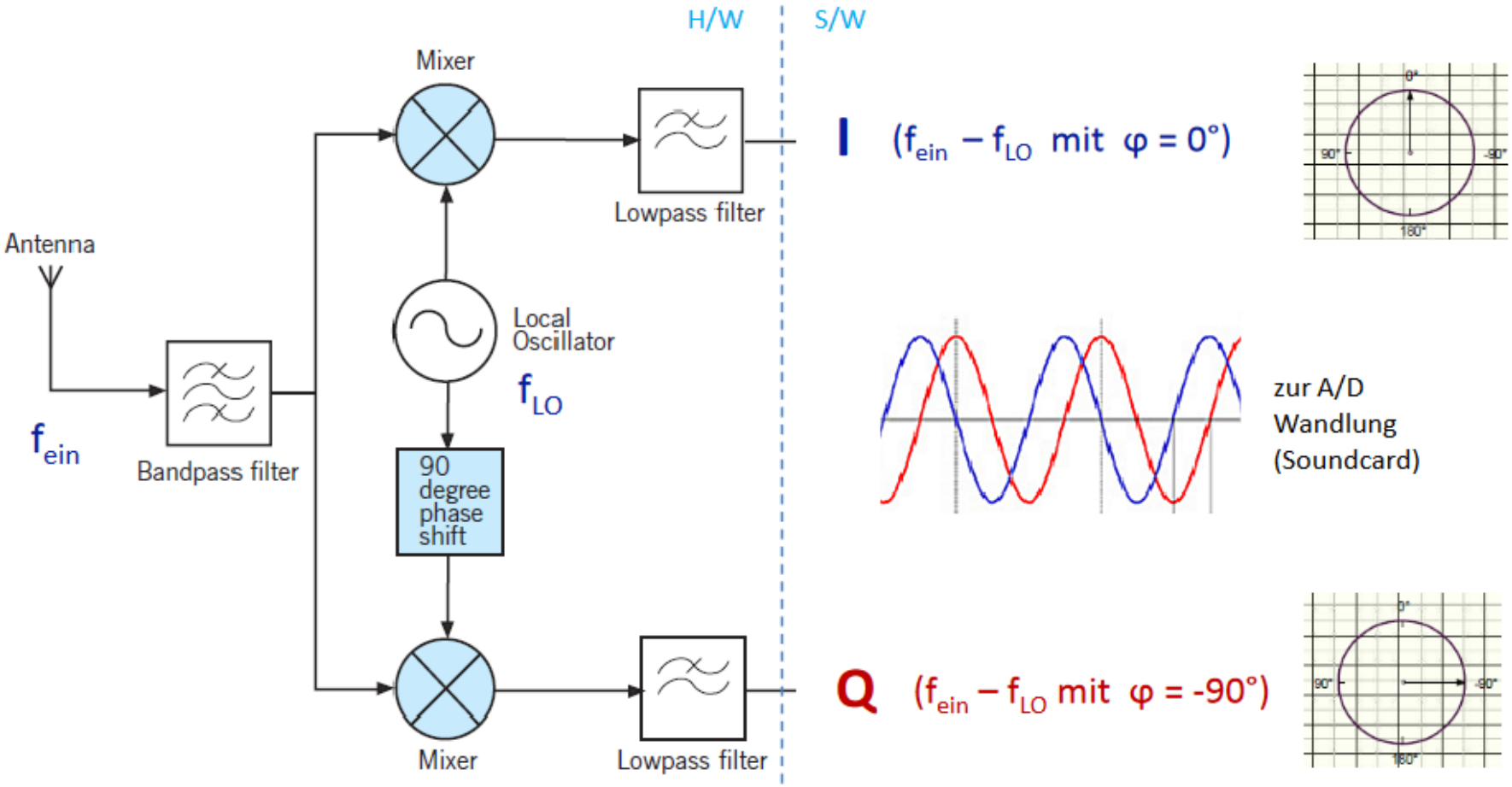


Grundlegendes Blockdiagramm für einen QPSK-Modulator: Zunächst wird der digitale Datenstrom so verarbeitet, dass aus zwei aufeinanderfolgenden Bits zwei parallele Bits werden. Beide Bits werden gleichzeitig übertragen.

Der lokale Oszillator erzeugt die Trägersinuskurve. Das Lokaloszillatorsignal selbst wird zum I-Träger, und eine Phasenverschiebung von 90° wird angewendet, um den Q-Träger zu erzeugen.

Die I- und Q-Träger werden mit den I- und Q-Datenströmen multipliziert und die beiden aus diesen Multiplikationen resultierenden Signale werden summiert, um die QPSK-modulierte Wellenform zu erzeugen.

Quadratur Sampling Decoder (QSD)



Zusammenfassung

- Unter I/Q-Signalisierung versteht man die Verwendung zweier Sinuskurven mit gleicher Frequenz und einer relativen Phasenverschiebung von 90°.
-
- Amplituden-, Phasen- und Frequenzmodulation können durch Summieren amplitudenmodulierter I/Q-Signale durchgeführt werden.
-
- Unter Quadraturmodulation versteht man eine Modulation, die I/Q-Signale umfasst.
-
- Eine Quadratur-Phasenumtastung kann durch Addition von I- und Q-Trägern erreicht werden, die individuell entsprechend den eingehenden digitalen Daten mit +1 oder –1 multipliziert wurden.

Quellen und weiterführende Links:

https://www.oevsv.at/export/oevsv/technik-folder/J2018/bin/SDR-Grundlagen-und-Anwendungen-v2-.0.pdf

https://www.dl4zao.de/_downloads/SDR_Workshop.pdf

https://z21.vfdb.org/Archiv/pdf-Dateien/D.Briggmann_SDR.pdf

https://www.darc.de/fileadmin/filemounts/distrikte/x/ortsverbaende/17/SDR.pdf

https://de.wikipedia.org/wiki/I%26Q-Verfahren

https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp06.de.html

https://www.youtube.com/watch?v=h_7d-m1ehoY

https://www.mathe-online.at/lernpfade/winkelfunktioneneinheitskreis/?navig=r&kapitel=3
https://de.serlo.org/mathe/1961/trigonometrie-am-einheitskreis

https://www.needles.de/HPSDR/QuadSignals-DE.pdf

https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/radio-frequency-demodulation/understanding-i-q-signals-and-quadrature-modulation/

https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying#/media/File:Transmisor_QPSK_2.png

http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ

https://en.wikipedia.org/wiki/In-phase_and_quadrature_components#/media/File:IQ_phasor_diagram.svg

https://towardsdatascience.com/mind-your-is-and-q-s-the-basics-of-i-q-data-d1f2b0dd81f4

https://epaper.heise.de/download/archiv/e74148e18d84/ch.14.02.132-142.pdf