

SSB-Erzeugung nach Weaver

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	3
2. AM.....	3
3. SSB nach der Filtermethode.....	4
4. SSB nach der Phasenmethode.....	5
.....	6
5. SSB nach der Weaver-Methode.....	7
6. Demodulation nach dem Weaver-Verfahren.....	9
7. Vergleich der Verfahren.....	10
7.1 Vergleich Weaver-Methode mit dem Filterverfahren.....	10
7.2 Vergleich Weaver-Methode mit dem Phasen-Methode.....	10
8. Verifizierung der Weaver-Verfahrens.....	11
9. Quellenverzeichnis.....	11

1. Vorwort

SSB ist eine Betriebsart, die sich im Amateurfunk in den 1960er und 1970er Jahren verbreitet hat. Während für die Dekodierung von SSB-Signalen kein größerer Zusatzaufwand zu treiben war, ist die Erzeugung von SSB-Signalen nicht trivial. Für die Generierung von SSB-Signalen hatten sich zwei Verfahren durchgesetzt, die Filtermethode und die Phasenmethode, jede mit ihren eigenen Vor- und Nachteilen. Schon 1956 hat ein Herr Weaver aber eine dritte Methode beschrieben die die Nachteile der beiden anderen Methoden elegant umschiffet und sich speziell für SDR-Lösungen sehr gut eignet.

In diesem Vortrag sollen die ersten beiden Methoden mit deren Vor- und Nachteilen kurz gezeigt werden und danach soll auf die SSB-Erzeugung nach Weaver genauer eingegangen werden.

2. AM

Um die verschiedenen Methoden besser zu verstehen, ist es am besten mit der heute noch bei Rundfunksendern oder im Flugfunk verwendeten Amplitudenmodulation AM zu beginnen. Technisch wird die AM erzeugt indem man das Trägersignal in irgendeiner Form mit dem NF-Signal multipliziert. In Zeiten der Röhrentechnik wurde an der Endröhre die Anodenspannung oder die Schirmgitterspannung mit dem NF-Signal moduliert. Mathematisch betrachtet sieht das dann so aus:

mit $\omega_N = 2\pi f_N$; $f_N = \text{NF-Frequenz}$; und

mit $\omega_T = 2\pi f_T$; $f_T = \text{Trägerfrequenz}$; entsteht das modulierte Signal durch die folgende Multiplikation

$$A_T \sin(\omega_T t) * (c + A_N \sin(\omega_N t)) = A_T c \sin(\omega_T t) + \frac{A_T A_N}{2} (\cos((\omega_T - \omega_N)t) - \cos((\omega_T + \omega_N)t));$$

Im Signalbild sieht das dann so aus:

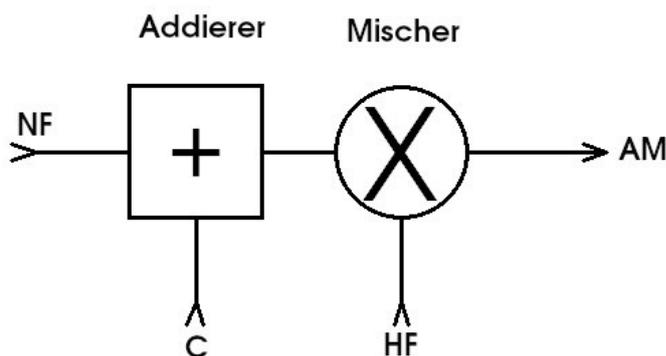


Bild 1 Signalbild zur Erzeugung von AM-Signalen

Wie die Umrechnung zeigt, besteht das Gesamtsignal letztendlich aus drei Anteilen, einem mit der ursprünglichen Trägerfrequenz, einem der um die Modulationsfrequenz tiefer liegt und einem der um die Modulationsfrequenz höher liegt. Das konstante Signal „C“ sorgt dafür, dass ein AM-Träger

entsteht. Ist $C = 0$, so entsteht anstatt AM ein DSB (Doppelseitenband)-Signal. Mit dem Verhältnis von C und dem NF-Pegel lässt sich der Modulationsgrad einstellen.

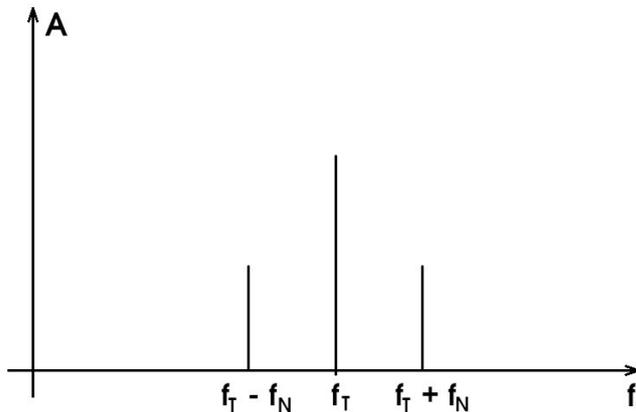


Bild 2: Spektrum bei der Modulation mit einem Sinussignal

Moduliert man den Träger nicht nur mit einer Modulationsfrequenz sondern einem üblichen Audiosignal, so entsteht im Spektrogramm das bekannte Schmetterlingsbild.

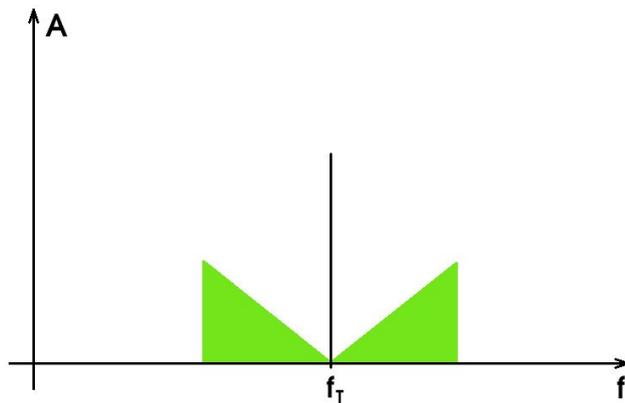


Bild 3: Spektrum eines mit einem Audiosignal modulierten Trägers

3. SSB nach der Filtermethode

Sieht man sich den Schmetterling an, erkennt man, daß die beiden Flügel dieselbe Information übertragen. Man könnte also einen der beiden Flügel weglassen ohne dass man etwas von der zu übertragenden Information verlieren würde. Zusätzlich kann man auch noch den Träger in der Mitte weglassen, die Information würde sich trotzdem wieder genügend gut rekonstruieren lassen.

Eine Methode wie man das erreichen kann ist offensichtlich: Ein Filter der die unerwünschten Anteile unterdrückt.

Es besteht allerdings das Problem einen Filter zu bauen der genügend Flankensteilheit und genügend Dämpfung im Sperrbereich hat, dass wirklich nur einer der beiden Flügel (Seitenband) übrig bleibt. Auch bei guten Filtern bleibt das Problem dass damit tiefe Töne nicht übertragen werden können.

Technisch lässt sich die SSB-Erzeugung mit geeigneten Quarzfiltern erzeugen, eine Methode die heutzutage in den meisten analogen Geräten verwendet wird.

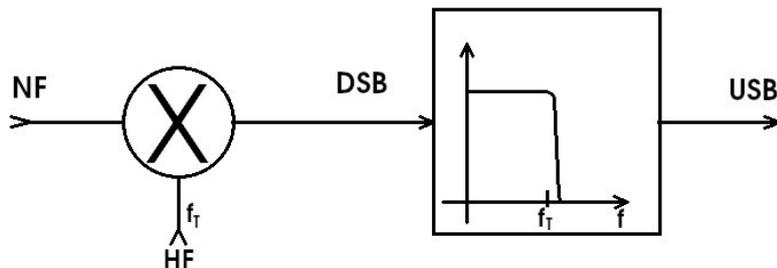


Bild 4: Signalbild zur Erzeugung eines SSB Signals nach der Filtermethode

4. SSB nach der Phasenmethode.

Durch geschickte Phasenverschiebung, zwei Mischern und einem Addierer lässt sich auch SSB erzeugen.

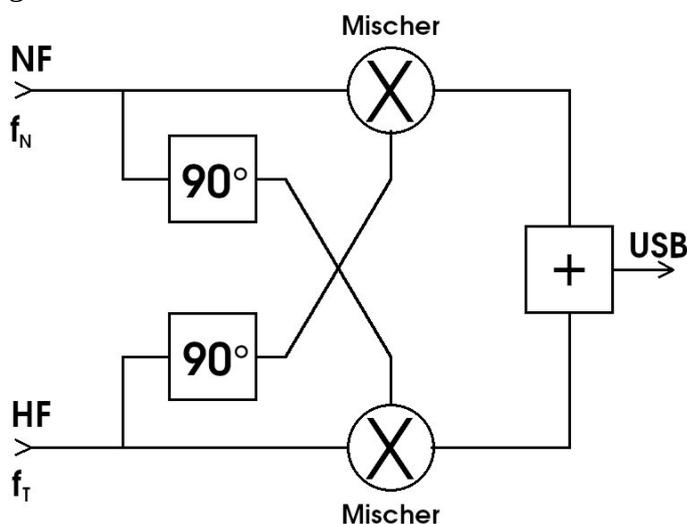


Bild 5: Signalbild zur Erzeugung eines SSB Signals nach der Phasenmethode

Das was im Bild dargestellt ist, sieht in Formeln ausgedrückt so aus:

Im oberen Pfad entsteht das Signal

$$A_T \sin(\omega_T t) * A_N \cos(\omega_N t) = \frac{A_T A_N}{2} (\sin((\omega_T + \omega_N)t) + \sin((\omega_T - \omega_N)t));$$

und im unteren Pfad

$$A_T \cos(\omega_T t) * A_N \sin(\omega_N t) = \frac{A_T A_N}{2} (\sin((\omega_T + \omega_N)t) - \sin((\omega_T - \omega_N)t));$$

Addiert man beide, erhält man nur das obere Seitenband:

$$A_T A_N \sin((\omega_T + \omega_N)t)$$

Subtrahiert man sie, bleibt nur das untere Seitenband übrig:

$$A_T A_N \sin((\omega_T - \omega_N)t)$$

Eigentlich ideal, sollte man meinen. Aber wie so oft steckt hier der Teufel im Detail und zwar im Phasenschieber auf der NF Seite. Einen Phasenschieber für ein Sinussignal konstanter Frequenz ist kein wirkliches Problem. Das geht indem man das Signal einen kurzen Moment verzögert. Die Verzögerungszeit muss natürlich genau $t = \frac{1}{4} * \frac{1}{f}$; sein. Das gilt für die Trägerfrequenz genau so wie für die Modulationsfrequenz. Wäre das NF-Signal auch ein Sinussignal mit konstanter Frequenz, gäbe es keine Probleme, das Audiosignal besteht aber aus einer eher wilden Mischung vieler verschiedener Frequenzanteile von dem jeder Anteil um seine individuelle Zeit verschoben werden müsste.

Die gute Nachricht: Es gibt Netzwerke mit denen man für einen engen Frequenzbereich (300Hz bis 2,7kHz) näherungsweise eine Phasenverschiebung um 90° hinbekommt.

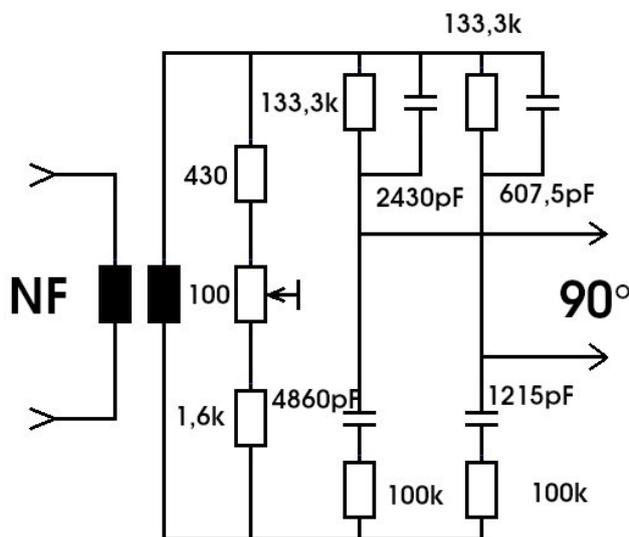


Bild 6: Phasenschiebernetzwerk

(Eigener Hinweis: Dieses Netzwerk wurde aus dem Schaltbild eines Röhren-SSB-Senders kopiert. Eigene Berechnungen zeigen aber, dass dieses Netzwerk keine brauchbare Phasenverschiebung liefert. Es muss also mindestens einen gravierenden Fehler enthalten. Trotzdem soll es hier als mögliches Beispiel gezeigt werden).

Damit hat die SSB-Erzeugung mit der Phasenmethode ähnliche Einschränkungen wie die Filtermethode. Hier ist das NF-Signal auf 300 Hz bis 2,7 kHz beschränkt, bei der Filtermethode

existiert nur die untere Grenze von ca. 300 Hz. Dafür kommt man bei der Phasenmethode eher mit Standard-Bauelementen aus.

5. SSB nach der Weaver-Methode

Bereits 1956 hat ein Mr. Weaver eine Methode beschrieben, die ohne NF Phasenschieber und ohne Quarzfilter auskommt. Der „Nachteil“ dieser Methode ist, dass der Aufbau komplexer wird, man also nicht zwei sondern vier Mischer braucht. Das ist vermutlich auch der Grund warum dieses Verfahren zumindest im Amateurbereich in der Vergangenheit nicht aufgetaucht ist. Mit dem Übergang von Analogtechnik zu digitalen Verfahren fällt die zusätzliche Komplexität nicht weiter ins Gewicht denn man erspart sich im Gegenzug HF-Filter oder Phasenschieber. Aber jetzt zum Verfahren selbst:

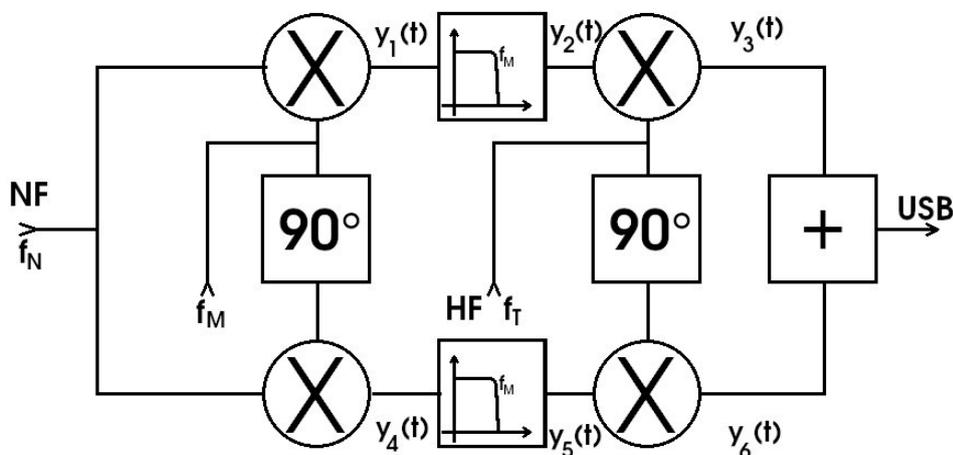


Bild 7: Struktur der SSB-Aufbereitung nach Weaver

Wie man aus dem Bild erkennt, sind jetzt nicht nur zwei Multiplikationen (Mischer) nötig sondern vier. Außerdem sind noch zwei Tiefpässe zu sehen. Um zu verstehen wie alles zusammenspielt beginnen wir mit dem Pfad links oben. Das Signal am Ausgang des ersten Mixers soll $y_1(t)$ heißen. Bei dem Verfahren brauchen wir noch einen zusätzlichen Oszillator der in der Mitte des Audiodereiches $f_M = \frac{300 \text{ Hz} + 2700 \text{ Hz}}{2} = 1500 \text{ Hz}$; mit konstanter Frequenz schwingt. Das in den folgenden Formeln auftauchende ω_M errechnet sich damit zu

$$\omega_M = 2\pi f_M;$$

Für die Signalaufbereitung brauchen wir von dem Oszillator zwei um 90° verschobene Signale.

Aus dem Mischer links oben kommt damit folgendes Signal

$$y_1(t) = A_N \sin(\omega_N t) \cos(\omega_M t) = \frac{A_N}{2} (\sin((\omega_N - \omega_M)t) + \sin((\omega_N + \omega_M)t));$$

Zugegeben – das was da rauskommt sieht etwas gruselig aus. Entweder man akzeptiert negative Frequenzen oder die Mischprodukte überlappen sich gegenseitig.

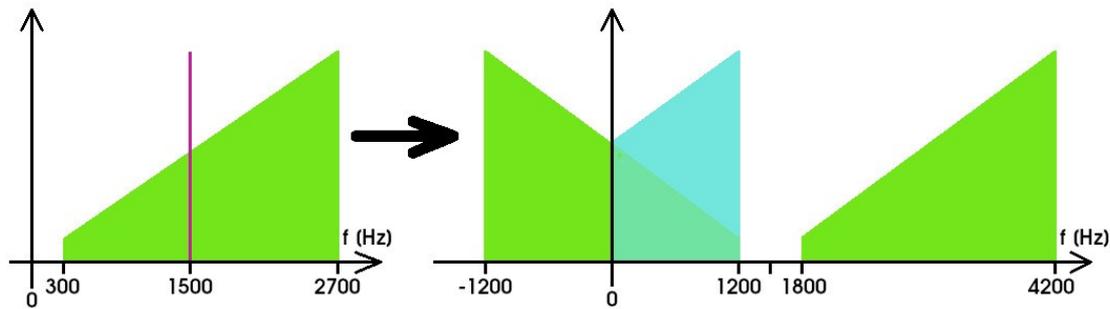


Bild 8: Das Ergebnis nach dem ersten Mischer

Der Anteil über ω_M (1500Hz) wird jetzt noch durch einen Tiefpass weggebügelt. Nach dem Tiefpass bleibt also nur noch

$$y_2(t) = \frac{A_N}{2} \sin((\omega_N - \omega_M)t); \text{ übrig.}$$

Das „Problem“ mit den negativen Frequenzen lässt sich leicht lösen denn für $\omega_N < \omega_M$ kann man auch schreiben:

$$y_2(t) = -\frac{A_N}{2} \sin((\omega_M - \omega_N)t); \text{ Damit werden die Frequenzen positiv, das Vorzeichen des Ergebnisses negativ.}$$

Was bei diesen beiden Operationen (also der Mischung und dem Tiefpass) passiert ist, dass das Audiospektrum von 300 Hz bis 2700 Hz auf 0 Hz bis 1200 Hz komprimiert wird. Hätte man nur diesen einen Pfad, könnte man mit dem Ergebnis nichts mehr anfangen denn ein Ton von 2000 Hz erzeugt im Ergebnis einen Ton von 500 Hz, ebenso wie ein Ton von 1000 Hz wobei der untere im Ergebnis eine Phasendrehung von 180° erfährt. Kennt man die ursprüngliche Phasenlage nicht, kann man diese beiden Töne nicht mehr eindeutig rekonstruieren. Für eine eindeutige Unterscheidung braucht es deshalb den unteren Pfad.

Für die weiteren Betrachtungen können wir also bei den negativen Frequenzen bleiben. Aber jetzt wieder zurück zum oberen Pfad. Das eben besprochene Signal wird jetzt mit dem Trägersignal gemischt wir erhalten:

$$y_3(t) = \frac{A_N}{2} \sin((\omega_N - \omega_M)t) \cos(\omega_T t) = \frac{A_N}{4} (\sin((\omega_N - \omega_M + \omega_T)t) + \sin((\omega_N - \omega_M - \omega_T)t));$$

Im unteren Pfad entstehen die folgenden Signale:

$$y_4(t) = A_N \sin(\omega_N t) \sin(\omega_M t) = \frac{A_N}{2} (\cos((\omega_N - \omega_M)t) - \cos((\omega_N + \omega_M)t)); \text{ nach dem Tiefpass}$$

bleibt nur der frequenzmäßig untere Teil übrig:

$$y_5(t) = \frac{A_N}{2} \cos((\omega_N - \omega_M)t);$$

Gemischt mit dem Trägersignal gibt das dann:

$$y_6(t) = \frac{A_N}{2} \cos((\omega_M - \omega_N)t) \sin(\omega_T t) = \frac{A_N}{4} (\sin((\omega_T + \omega_N - \omega_M)t) + \sin((\omega_T - \omega_N + \omega_M)t));$$

etwas anders geschrieben:

$$y_6(t) = \frac{A_N}{4} (\sin((\omega_N - \omega_M + \omega_T)t) - \sin((\omega_N - \omega_M - \omega_T)t));$$

Addiert man die beiden Signale y_6 und y_3 erhält man

$$y_6(t) + y_3(t) = \frac{A_N}{2} \sin((\omega_T - \omega_M + \omega_N)t);$$

was dem oberen Seitenband eines SSB-Signals mit der Trägerfrequenz $f_T - f_M$ entspricht.

Subtrahiert man beide voneinander so erhält man

$$y_6(t) - y_3(t) = \frac{A_N}{2} \sin((\omega_T + \omega_M - \omega_N)t);$$

was dem unteren Seitenband eines SSB-Signals mit der Trägerfrequenz $f_T + f_M$ entspricht.

6. Demodulation nach dem Weaver-Verfahren

Das Weaver-Verfahren lässt sich übrigens auch zur Demodulation von HF-Signalen nutzen. Dazu braucht man im Prinzip nur die Eingänge für die Träger- und die Mittenfrequenz zu tauschen. Im Strukturbild sieht das dann so aus:

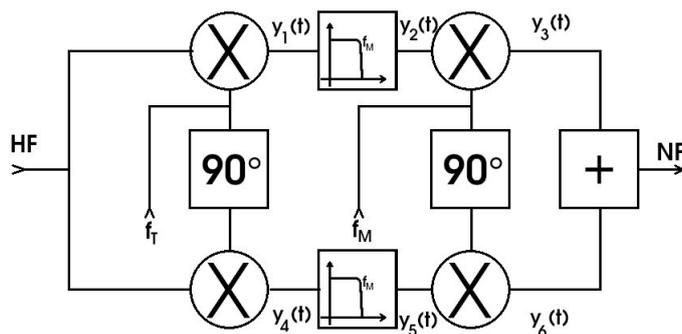


Bild 9: Strukturbild für die Demodulation von SSB-Signalen nach Weaver

7. Vergleich der Verfahren

Vor dem Vergleich der Verfahren ist bei dem Weaver-Verfahren noch zwei Anmerkungen zu machen. In der Beschreibung wurde von einem NF-Spektrum von 300Hz bis 2700Hz ausgegangen und daraus die Mittenfrequenz 1500Hz abgeleitet. Das Verfahren funktioniert aber auch mit beliebigen NF-Spektren und damit auch beliebigen Mittenfrequenzen (z.B. 50Hz – 10000Hz mit $f_M = 5025 \text{ Hz}$;) wobei die Mittenfrequenz auch noch höher und das Spektrum auch noch beiter sein kann.

Das Weaver-Verfahren ist besonders für rein digitale Systeme geeignet. Dabei ist allerdings zu beachten, dass solche Systeme nur mit entsprechend hoher Taktrate funktionieren. Liegen die zu bearbeitenden Frequenzen über der Hälfte der Taktrate muss der hochfrequente Teil analog ausgeführt werden. Der niederfrequente Teil kann natürlich erhalten bleiben.

7.1 Vergleich Weaver-Methode mit dem Filterverfahren

Das Filterverfahren sieht auf dem ersten Blick weit einfacher aus als die SSB-Erzeugung nach Weaver. Das Problem bei der Filtermethode steckt aber im Filter selbst. Die Flankensteilheit des Filters bestimmt die niedrigste übertragbare Frequenz, die Sperrdämpfung die Unterdrückung des anderen Seitenbandes. Bei den in analogen Aufbauten üblichen Quarzfiltern mit 9MHz muss das Filter auf etwa 300Hz seine volle Sperrdämpfung erreicht haben. Setzt man diese Werte zueinander in Relation, kommt man auf einen Wert von $1 / 30000$.

Bei dem Weaver-Verfahren sind zwar auch Filter nötig. Dort liegt die Grenzfrequenz aber im NF-Bereich bei 1500Hz. Setzt man die Werte hier in Relation liegt man bei $1 / 5$. Würde man in mit der Filtermethode vergleichbares Filter einsetzen, wäre man bei 50mHz.

Das Weaver-Verfahren steht und fällt mit der Güte der Mischer. Die Auswirkung von Nichtlinearitäten der Mischer wurden hier nicht näher untersucht, die machen sich im Endergebnis aber sicher sehr unangenehm bemerkbar. Im analogen dürfte die Filtermethode der nach Weaver deshalb überlegen sein, wohl einer der Gründe warum das Weaver-Verfahren bei der SSB-Aufbereitung kaum eine Rolle gespielt hat. Bei digitaler Aufbereitung sieht es dann aber ganz anders aus. Filter, wie sie bei der Filtermethode benötigt werden lassen sich in der digitalen Welt zwar auch gut realisieren, fordern aber eine recht hohe Rechenleistung. Da ist das Weaver-Verfahren der Filtermethode überlegen.

7.2 Vergleich Weaver-Methode mit dem Phasen-Methode

Bei der Phasenmethode werden Filter auf den ersten Blick vermieden. Letztendlich sind sie aber doch nötig um das NF-Band auf den Bereich zu beschränken in dem der Phasenschieber mit genügender Genauigkeit funktioniert. Auch in der digitalen Welt ist der Phasenschieber ein gewisses „Problem“. Es lässt sich sogar mathematisch nachweisen dass es keinen idealen Phasenschieber gibt der über einen größeren Frequenzbereich die Amplitude konstant hält und eine

konstante Phasenverschiebung ausführt. Im Audibereich erreicht man eine Genauigkeit von ca. 1 Prozent was zu einer Unterdrückung des unerwünschten Seitenbandes von etwa 40dB führt.

Das Weaver-Verfahren kommt ohne den kritischen Phasenschieber aus. Damit gibt es für das Audiosignal auch eine frequenzmässige Einschränkung nach oben. Auch nach unten kann man mit dem Weaver-Verfahren deutlich unter die 300Hz-Grenze kommen. Damit ist das Weaver-Verfahren der Phasenmethode deutlich überlegen.

8. Verifizierung der Weaver-Verfahrens

Um die Funktion des Weaver-Verfahrens zu verifizieren wurde mit Hilfe des GnuRadio-Systems ein Blockschaltbild erstellt und ein über ein Mikrofon eingespeistes NF-Signal mit verschiedenen Bandbreiten (und damit verschiedenen Mittenfrequenzen) auf einen 10kHz-Träger aufmoduliert. Das durch Mischung mit 10kHz +- Mittenfrequenz und auf die NF-Bandbreite gefilterte Signal wurde auf den Audio-Ausgang gegeben.

GnuRadio ist ein System mit dessen Hilfe sich mit graphischen Hilfsmitteln in C++ geschriebene Bausteine parametrieren und miteinander verbinden lassen.

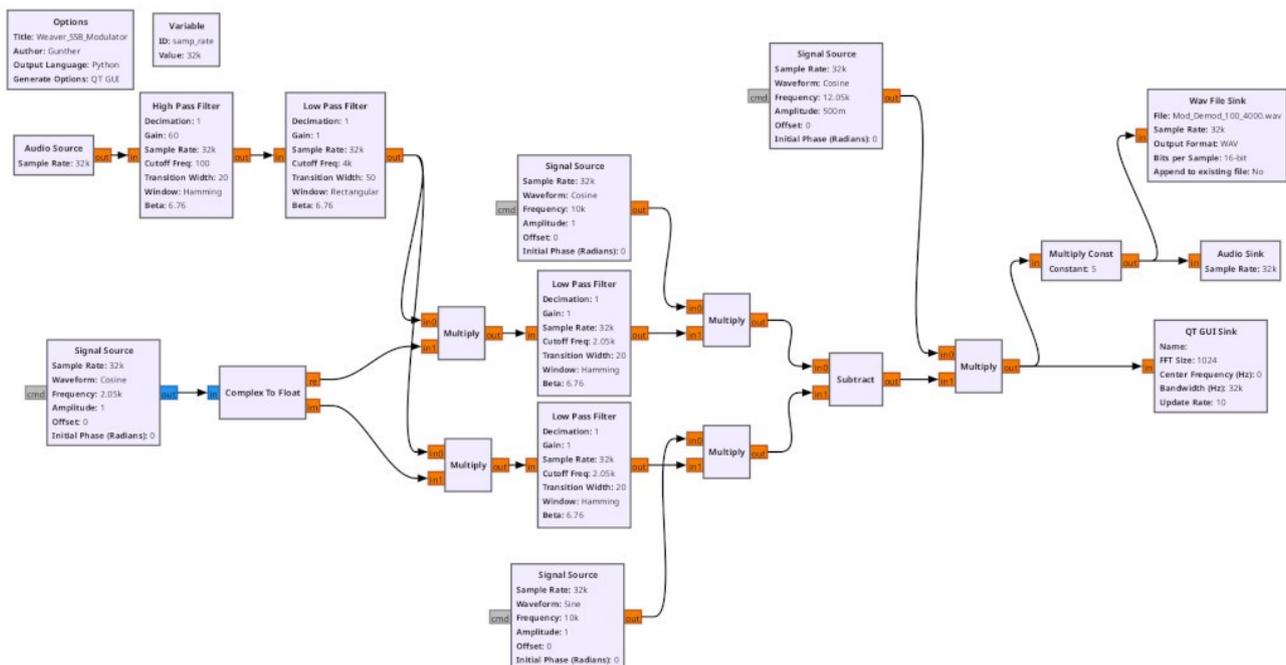


Bild 14: Blockschaltbild zur Verifizierung des Weaver-Modulationsverfahrens.

9. Quellenverzeichnis

Derek Rowell: Weaver SSB Modulation/Demodulation a Tutorial 18.2.2017

Schultheiss, DL1QK: Der Kurzwellen-Amateur, Telekosmos-Verlag 10 Auflage

Bronstein-Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik 6. Auflage

wiki.gnuradio.org