

Seitenbandasymmetrie beim Luxemburg-Effekt: die Lösung eines Mysteriums

Pieter-Tjerk de Boer, PA3FWM pa3fwm@amsat.org

In meinem letztjährigen Beitrag wurde mit Messergebnissen gezeigt, dass beim Luxemburgeffekt (Kreuzmodulation in der Ionosphäre) oft asymmetrische Seitenbänder entstehen, obwohl die gängige Theorie symmetrische Seitenbänder erwarten lässt. Seitdem haben Markus Vester, DF6NM, und ich zusammen dieses Phänomen erklären können, und die Erklärung wird in diesem Beitrag beschrieben.

1 Einführung

Der sogenannte Luxemburg-Effekt, der wissenschaftlich als ionosphärische Kreuzmodulation bekannt ist, heißt dass die Modulation eines starken amplitudenmodulierten Senders auf den Träger eines anderen Senders übertragen wird. Er tritt typisch bei Lang- und Mittelwellen-Rundfunksendern auf. Er wurde in den 30er Jahren entdeckt [1, 2], und auch wissenschaftlich erklärt [3]. Die Erklärung ist dass der "störende" Sender so stark ist, dass sein elektrisches Feld die freien Elektronen in der Ionosphäre so stark beschleunigt, dass deren durchschnittlichen Geschwindigkeit spürbar mit der Modulation des "störenden" Senders variiert. Mit dieser variierenden Geschwindigkeit variiert auch die Häufigkeit der Kollisionen der freien Elektronen. Und weil diese Kollisionen für Dämpfung verantwortlich sind, variiert damit auch die Dämpfung des "gestörten" Signals, wenn es den gleichen Teil der Ionosphäre durchläuft (Bild 2). Die Amplitude des "gestörten" Signals übernimmt so die Modulation des "störenden" Senders. Diese Theorie wurde mit ausgiebigen Messungen in den 1940er bestätigt [4, 5, 6], aber damals hat man nie die Seitenbänder getrennt betrachtet.

Seitenbandasymmetrie wurde zum ersten Mal von Markus Vester, DF6NM, in Januar 2013 gesehen [7]: Bild 1. Man sieht um den (an sich unmodulierten) Träger von HGA22 auf 135,43 kHz asym-

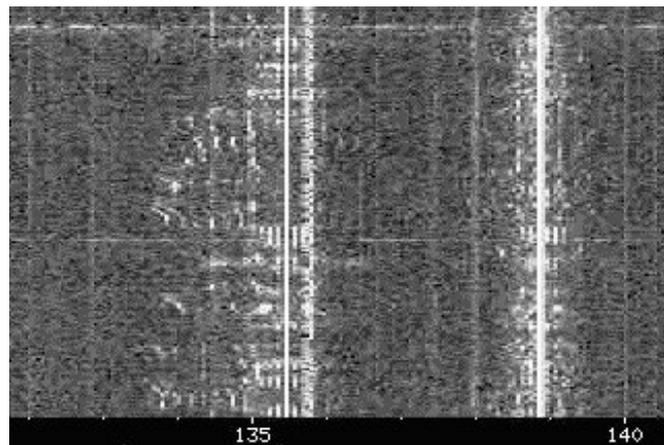


Abbildung 1: Die erste Beobachtung von Amplitudenasymmetrie: HGA22 auf dem Wasserfalldiagramm des WebSDR Twente, Januar 2013 (aus [7]). Die beiden Träger (HGA22 auf 135,43 kHz und DCF39 auf 138,83 kHz) sind eigentlich nicht moduliert. Die sichtbaren Seitenbänder entstehen durch ionosphärische Kreuzmodulation; bei DCF39 sind sie symmetrisch, aber bei HGA22 ist das untere Seitenband viel ausgeprägter.

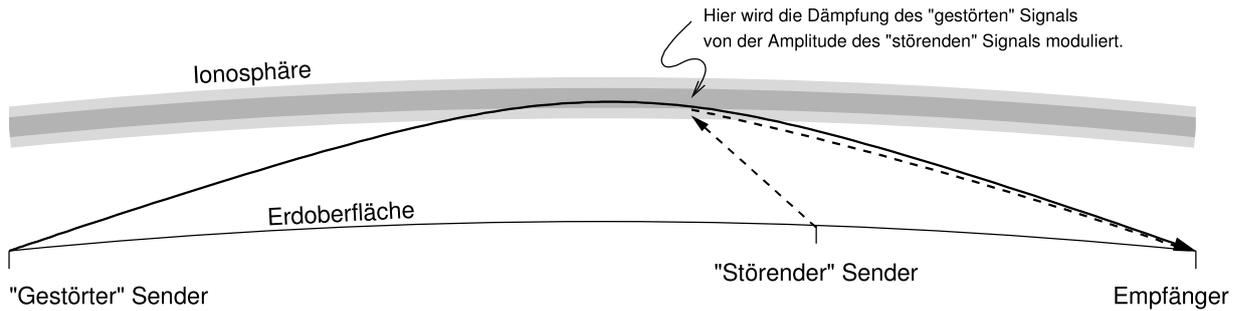


Abbildung 2: Wie der Luxemburg-Effekt (ionosphärische Kreuzmodulation) auftritt.

metrische Seitenbänder entstanden sind. Es stellte sich heraus dass dies die Modulation vom Tsjechischen Rundfunksender Liblice (nähe Prag) auf 693 kHz war, der sich auf dem Weg von HGA22 nach Twente befindet. Aber die Asymmetrie war ein Rätsel. Nach der gängigen Theorie sollte ja die Dämpfung des Trägers von HGA22 mit der Modulation von Liblice variieren. Das ist saubere Amplitudenmodulation, wobei *symmetrische* Seitenbänder entstehen sollten.

2016 schrieb ich einen Artikel über die Ionosphäre für die Niederländische Amateurfunkzeitschrift Electron, in dem ich auch den Luxemburgeffekt und seine Erklärung erwähnte. Der Artikel erschien im April-Heft, und ein Leser bedankte sich bei mir für den gelungenen Aprilscherz, nämlich den Luxemburg-Effekt... Das veranlasste mich, ein gutes Beispiel von dem Effekt zu finden, das ich in der Kombination von Radio Monte Carlo (216 kHz, Süd-Frankreich) und RTL (234 kHz, Luxemburg, als "störender" Sender) und meinem Empfänger in Twente fand, und auch mal einige Messungen zu machen. Bei diesen Messungen, anfangs mit normalen, doppelseitigen AM-Demodulatoren, fand ich ein sehr unverständliches Phasenverhalten; und bei getreter Beobachtung beider Seitenbänder wurde klar, dass der Phasenverlauf aussah als ob die Kreuzmodulation für das obere Seitenband näher am Empfänger entstand als für das untere Seitenband. Ganz merkwürdig!

Im vorliegenden Artikel wird die Erklärung gegeben. Es stellt sich heraus dass die Seitenbänder aus verschiedenen Richtungen den Empfänger erreichen, und demzufolge auch mit unterschiedlichen Laufzeiten, und eventuell auch Amplituden.

Viel mehr Details werden in einem wissenschaftlichen Artikel zu diesem Thema erscheinen [9].

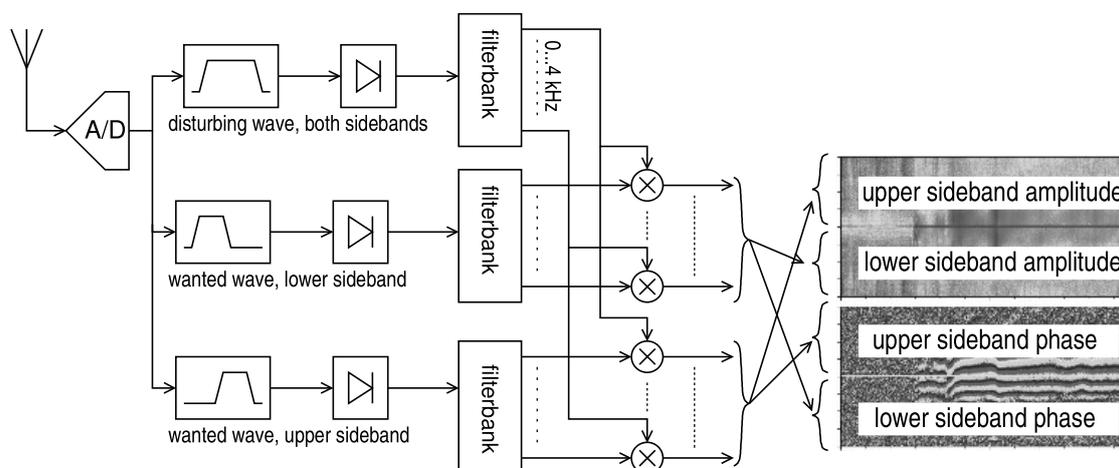


Abbildung 3: Messaufbau (größtenteils in Software)

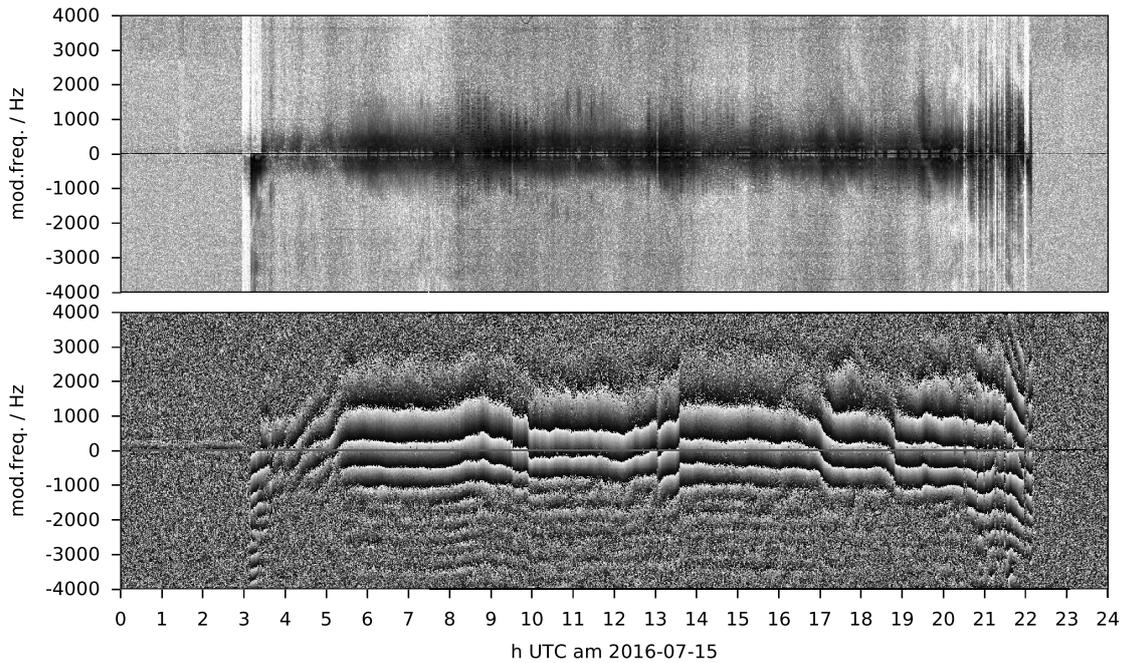


Abbildung 4: Ionosphärische Kreuzmodulation von RTL 234 kHz auf RMC 216 kHz, empfangen in Enschede, NL; oben Stärke, unten Phase. Zwischen 22:08 und 02:56 UTC sendet RMC nicht auf Langwelle.

2 Die Messungen und das Phänomen

Bild 3 zeigt das Blockdiagramm der Signalverarbeitung die ich benutzt habe um das Phänomen zu untersuchen. Das Antennensignal wird mit einem einzelnen A/D-Wandler digitalisiert, und in Software werden AM-Empfänger betrieben auf den Frequenzen des “gestörten” und des “störenden” Senders. Auf der Frequenz des “gestörten” Senders laufen sogar zwei AM-Empfänger, mit Filter die jeweils nur das obere und nur das untere Seitenband durchlassen. Die Ausgangssignale (= empfangene Modulation) der Empfänger werden mit drei Filterbanken (FFT mit Windowing) in die Frequenzdomäne gebracht. Dann wird getrennt für jede Modulationsfrequenz eine Kreuzkorrelation berechnet zwischen dem “störenden” Sender und dem oberen oder unteren Seitenband des “gestörten” Senders. So wird gemessen wie stark die Modulation des “störenden” Senders in der Ionosphäre auf den Träger des “gestörten” Senders übertragen ist, und mit welcher Phase, und das ganze als Funktion der Modulationsfrequenz und separat für beide Seitenbänder.

(So kann man heutzutage mit SDR-Technik dauernd die Kreuzmodulation für alle Modulationsfrequenzen gleichzeitig messen. In den 40er Jahren maß man die Kreuzmodulation indem der “störende” Sender mit einem sauberen Sinuston moduliert wurde; also, nur eine Modulationsfrequenz gleichzeitig, und erst nach Ende der normalen Programme, nicht den ganzen Tag.)

Das Ergebnis einer solchen Messung ist Bild 4 dargestellt. Wir sehen zwei Diagramme: das obere zeigt die (relative) Stärke der Kreuzmodulation (dunkler = stärker), das untere die Phasenverschiebung zwischen störendem Signal und erzeugter Kreuzmodulation (weiß...schwarz = 0...360 Grad; mit Farben lässt sich dies viel besser zeigen). In beiden Diagrammen verläuft horizontal die Zeit: ein ganzer Tag. Die vertikale Achse zeigt die Modulationsfrequenz, von -4000 bis +4000 Hz, wobei negative Frequenzen das untere Seitenband betreffen und positive das obere.

In diesem Beispiel sind die Amplituden der Seitenbänder symmetrisch. Aber der Phasenverlauf ist

unsymmetrisch. Theoretisch würde man vor allem einen *linearen* Phasenverlauf mit der Modulationsfrequenz erwarten. Der Grund dafür ist das die Kreuzmodulation einen längeren Weg vom störenden Sender zum Empfänger zurücklegt als das Signal das direkt vom störenden Sender empfangen wird (Bild 2); die Kreuzmodulation ist also um eine Weile verzögert, und eine feste Verzögerung entspricht einem mit der Frequenz linearen Phasenverlauf. Die Tatsache dass der Phasen im oberen Seitenband langsamer mit der Frequenz variiert als im unteren Seitenband, gibt den Eindruck dass die Kreuzmodulation im unteren Seitenband einen längeren Weg zurücklegt als im oberen Seitenband. Aber wie wäre das möglich; beiden Seitenbänder entstehen doch an der gleichen Stelle in der Ionosphäre?

Im folgenden werden drei unterschiedliche Erklärungen für diese Seitenbandasymmetrie gegeben. Sie letztendlich äquivalent, unterscheiden sich aber in der Abwägung zwischen wieviel Präzision und wieviel Einsicht sie geben. Die erste Erklärung (Abschnitt 3) ist eine ganz qualitative, die sich basiert auf Fresnelzonen in der Ionosphäre. Die zweite (Abschnitt 4) macht dies mathematisch präzise. Die dritte Erklärung (Abschnitt 5) betrachtet die Radiowellen als Strahlen die durch die Kreuzmodulation in der Ionosphäre zusätzlich abgelenkt werden; auf Basis davon lassen sich einleuchtende Diagramme erstellen.

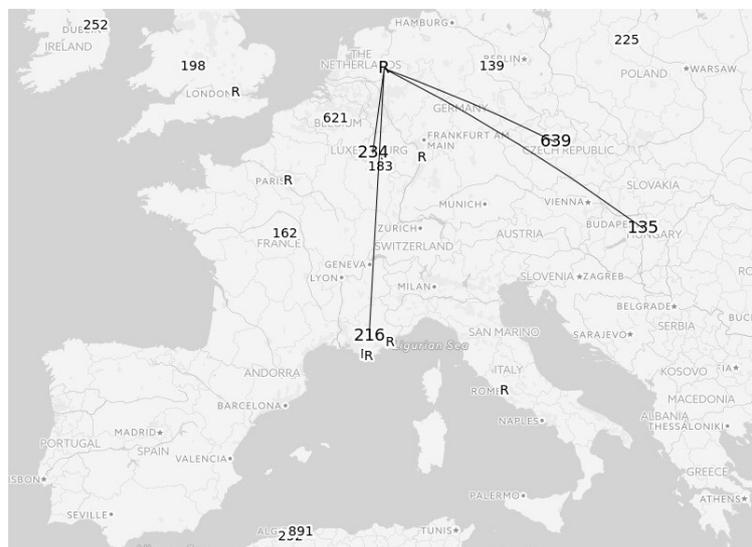


Abbildung 5: Für meine Messungen verwendete Sender (Zahl = Frequenz in kHz) und Empfangsstandorte (R); der R im Osten der Niederlande ist unser WebSDR mit Dauermessungen, die anderen Standorte waren gelegentlicher Portabelbetrieb.

3 Qualitative Erklärung basierend auf Fresnelzonen

Bei dieser Erklärung muß man sich bedenken, ist dass es sich bei Radio um *Wellen* handelt. Wellen breiten sich in Prinzip frei im Raum aus, in allen Richtungen. Der Empfänger empfängt die *Summe* der Beiträge aller Wege vom Sender zum Empfänger.

Bild 6 zeigt, maßstabgerecht, die Ausbreitungswege vom Sender RMC zum Empfänger in Twente. Die Linie die in der Mitte auf die Ionosphäre spiegelt, ist der kürzeste Weg von RMC nach Twente für Ausbreitung mit einer einzelnen Reflexion. Die gestrichelten Linien beidseitig davon sind Wege die um einer halben Wellenlänge länger sind, und also mit umgekehrter Phase (180°) beitragen. Die nächsten gezogenen Linien sind wieder um einer halben Wellenlänge länger, haben also 360° Phasenverschiebung, d.h., tragen wieder phasenrichtig bei; die nächsten Strichellinien mit 540° , u.s.w.

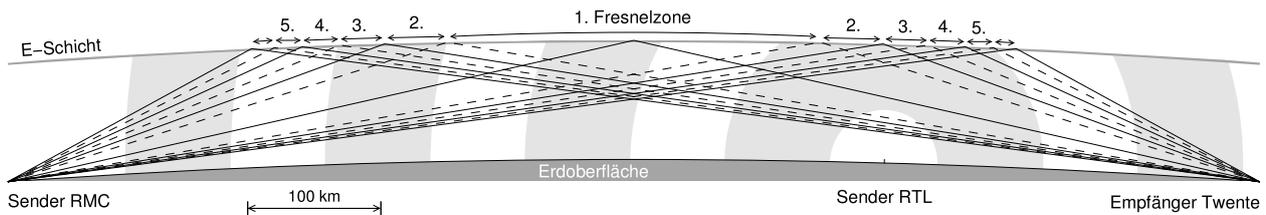


Abbildung 6: Fresnelzonen in der Ionosphäre

Zusammen markieren sie die Fresnel-Zonen auf der Ionosphären-“Oberfläche”: die Zonen mit ungeraden Nummern tragen alle phasenrichtig bei, während die Zonen mit geraden Nummern gegenphasig beitragen. Dadurch heben die Beiträge der Zonen mit höheren Nummern einander größtenteils auf, sodass vor allem die erste Zone beiträgt. Deshalb kann man oft tun als ob das Signal nur die mittlere Linie folgt (wie auch in Bild 2 vorgetauscht), aber in manchen Fällen, wie jetzt, reicht das nicht aus.

Betrachten wir nun mal was passiert wenn die Absorption (oder, umgekehrt, die Reflektivität) der Ionosphäre sich ändert unter Einfluß der RTL-Modulation. Wenn diese Variation langsam ist, wird die in Twente empfangene Signalstärke sie einfach folgen. Aber wenn die Modulationsfrequenz höher ist, wird es anders. Nehmen wir mal an dass RTL einen Puls sendet, der, wenn er eine Stelle in der Ionosphäre erreicht, während sehr kurzer Zeit die dortige Reflexion verbessert (= Absorption verringert). Ein solcher Puls wird nicht jede Stelle der ersten Fresnelzone gleichzeitig erreichen. Und auch falls das doch der Fall wäre, hätte die Strecke von jedem Punkt dieser Zone zum Empfänger eine andere Länge. So wird die kurzzeitige Erhöhung des Signals in der Zeit ausgeschmiert: der Empfänger wird also von der kurzzeitig erhöhten Reflektivität der ersten Fresnelzone kaum etwas bemerken.

Aber weiter weg von der Mitte, bei den höheren Fresnelzonen, wird es interessant. Betrachten wir z.B. die 2. und 3. Fresnelzonen, die sich gerade oberhalb des RTL-Senders befinden; der Puls wird sie also fast gleichzeitig erreichen. Normalerweise, bei konstanter Reflektivität, würden die Beiträge dieser zwei Zonen einander fast gegenseitig aufheben, wie oben erwähnt. Aber, von rechts nach links in diesen Zonen nimmt die Entfernung zum Empfänger zu. Also, wenn die Reflektivität kurzzeitig erhöht wird, wird zunächst der erhöhte Beitrag vom rechten Teil der 3. Fresnelzone (der dem kürzesten Weg um 540 Grad nachgeht) den Empfänger erreichen, gefolgt vom Beitrag von der Grenze der 2. und 3. Fresnelzone (der um etwa 360 Grad nachgeht), und endlich kommt der Beitrag vom linken Teil der 2. Fresnelzone (geht um etwa 180 Grad nach). Wir sehen also dass der Beitrag in kurzer Zeit durch 360 Grad Phasenverschiebung “rotiert”. Effektiv ist dies eine Art Doppler-Effekt; wenn genau nach dieser Zeit der Puls (und damit die Rotation durch 360 Grad) sich wiederholt, ist das Ergebnis ein neues Signal auf einer geringfügig höheren Frequenz: das obere Seitenband entsteht, und kommt, aus Sicht dieses Empfängers, aus dieser 2./3. Fresnelzone, und *nicht* aus der Mitte der 1. Fresnelzone. Für andere Pulswiederholungsfrequenzen werden andere Teile von Fresnelzonen ein passendes oberes Seitenband erzeugen; und mit der gleichen Mechanismus können Teile der Ionosphäre links von der Mitte das untere Seitenband erzeugen.

Wir sehen also dass der Empfänger effektiv das obere und das untere Seitenband der Modulation von verschiedenen Stellen der Ionosphäre empfängt.

4 Quantitative Erklärung: der Kirchhoff-Integral

Die obige Erklärung kann quantitativ gemacht werden mit Hilfe von Kirchhoffs Diffraktionsformel. Die Idee ist, die ganze Ionosphäre in kleine Stückchen aufzuteilen, für jedes Stückchen den Beitrag zum entgültig empfangenen Signal zu berechnen, und alles zu addieren. Dabei müssen dann für jedes

Stückchen die Entfernungen zu Sendern und Empfänger berechnet werden und die dadurch verursachte Phasendrehungen und Abschwächungen in Bezug genommen, und die Kreuzmodulation richtig berechnet werden. Es fällt ja ein Signal ein mit einer bestimmten Frequenz (z.B. Trägerfrequenz von RMC), und die Reflektivität wird (amplituden)moduliert mit der Modulation von RTL, sodass Summen- und Differenzfrequenzen entstehen, die zwei Seitenbänder. Das ganze kann man natürlich nur im Computer machen.

Bild 7 zeigt dass der so vorhergesagte Phasenverlauf tatsächlich gut mit den Messungen übereinstimmt, wenigstens in den Nachtstunden. In den Tagesstunden passen die Messergebnisse etwas schlechter; die Ursache ist vermutlich dass tagsüber die Ionosphäre unten nicht so scharf begrenzt ist als nachts, sodass unsere Betrachtung der Ionosphäre als spiegelnde Fläche weniger genau ist.

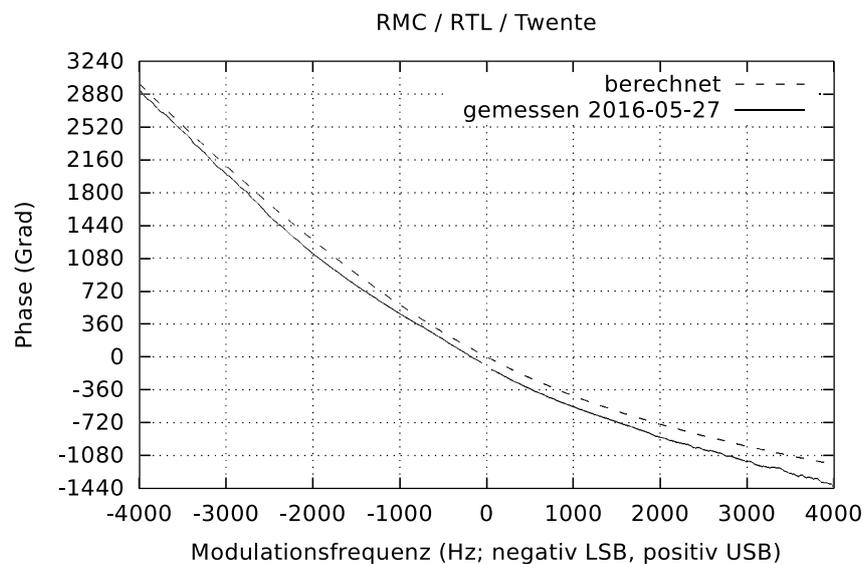


Abbildung 7: Gemessener und berechneter Phasenverlauf für RMC/RTL/Twente

5 Qualitative Erklärung basierend auf Strahlen-Betrachtung

Wenn eine flache Welle auf eine flache Oberfläche reflektiert (ohne Kreuzmodulation), verlässt die Welle die Reflexionsebene unter dem gleichen Winkel wie der Einfallswinkel. Der Grund dafür ist die Kontinuität der Wellen: für jedes Wellenfront dass auf die Oberfläche stößt, muß auch wieder ein Wellenfront die Oberfläche verlassen (sonst würde die Frequenz nicht gleich sein). Das geht, bei gleicher Frequenz und Wellenlänge, nur wenn die Winkel gleich sind, sonst "passt es nicht".

Wenn aber an der Oberfläche Kreuzmodulation auftritt, verlassen die Oberfläche nicht nur Wellen mit der gleichen Frequenz wie die einfallende Welle, sondern auch mit geringfügig höheren und niedrigeren Frequenz: Mischprodukte mit der Modulationsfrequenz des "störenden" Senders, also oberes und unteres Seitenband. Diese haben natürlich auch eine geringfügig kleinere und größere Wellenlänge. Wenn man dann immer noch möchte dass die einfallende und ausgehende Wellen kontinuierlich zu einander passen, muß die Winkel des ausgehenden Strahls wohl kleiner oder größer sein als der Einfallswinkel, wie in Bild 8(a) (übertrieben) gezeigt. Betrachtet man dies aus Sicht des Empfängers, dann ist die Folge dass die Seitenbänder aus verschiedenen Richtungen empfangen werden, wie in Bild 8(b) gezeigt.

Rechnet man das für den Fall RMC/RTL/Twente und verschiedene Modulationsfrequenzen durch,

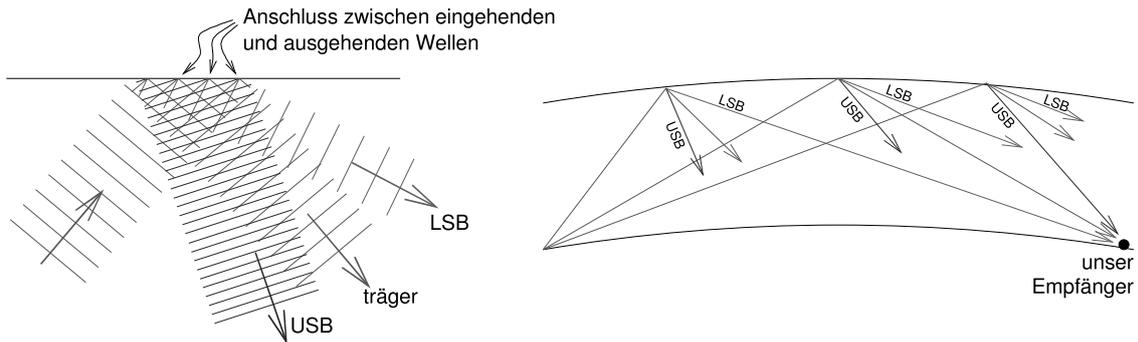


Abbildung 8: Die Kreuzmodulationsseitenbänder haben verschiedene Richtungen

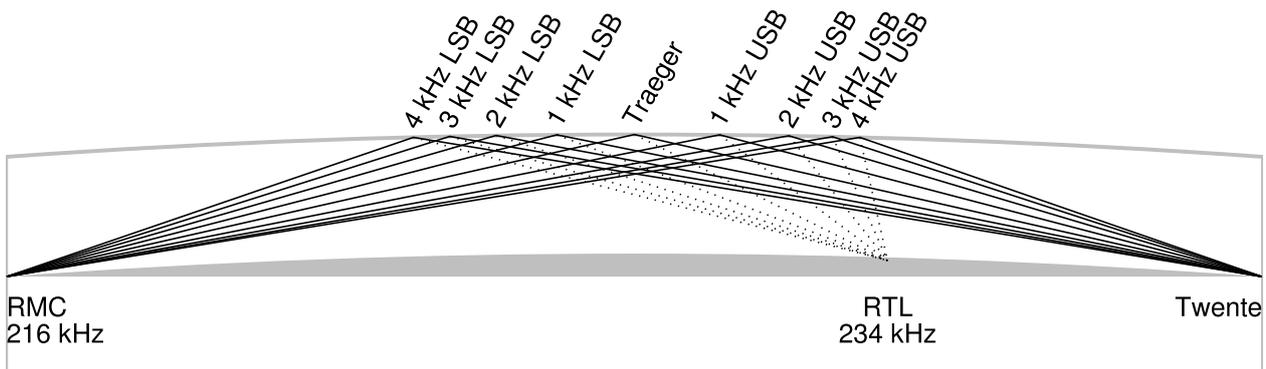


Abbildung 9: Strahlen im Fall RMC/RTL/Twente

dann erhält man Bild 9. Man sieht ganz klar dass der Weg für die Intermodulation von RTL via Ionosphäre zum Empfänger für das obere Seitenband kürzer ist als für das untere Seitenband, was ja den Messungen entspricht.

6 Amplitudenasymmetrie

Es ist jetzt klar, dass für verschiedene Frequenzen in den Seitenbändern der Hauptbeitrag aus verschiedenen Richtungen kommt, nämlich von verschiedenen Stellen der Ionosphäre; Bild 9 zeigt dies explizit. Das erklärt den beobachteten Phasenverlauf, denn die unterschiedlichen Wege haben auch unterschiedliche Längen, und deshalb unterschiedliche Phasendrehungen.

Aber auch die Asymmetrie der Seitenband*amplitude* kann nun, wenigstens qualitativ, verstanden werden. Die unterschiedlichen Wege der Seitenbandfrequenzen können ja durchaus unterschiedlich starke Signale geben. Faktoren die darauf Einfluß haben, sind (u.a.):

- wie stark die Ionosphäre dort ionisiert ist;
- Abstand zum störenden Sender (weiter weg → weniger Kreuzmodulation);
- Strahlungsdiagramme der Antenne der beiden Sender und des Empfängers;
- Eindringtiefe in die Ionosphäre: wenn das “gestörte” Signal den Teil der Ionosphäre durchläuft wo das “störende” Signal am meisten absorbiert wird, ist die Kreuzmodulation stärker;
- “Fokussierungseffekt”: abhängig von der Geometrie kann es so sein dass für eine bestimmte Frequenz ein größerer oder kleinerer Teil der Ionosphäre beiträgt, wodurch bestimmte Seitenbandfrequenzen auf bestimmte Stellen der Erde fokussiert werden.

Prinzipiell könnte man den Amplitudenverlauf wieder mit dem Kirchhoffschen Integral berechnen, aber dafür braucht man quantitative Daten für alle oben genannte Faktoren, die in der Praxis selten vorhanden sind.

Betrachten wir mal den ursprünglichen Fall wo Amplitudenasymmetrie beobachtet wurde: HGA22/Liblice/Twente. Bild 10 zeigt das nach Abschnitt 5 berechnete Strahlendiagramm. Wir sehen dass ein relativ großer Teil der Ionosphärenoberfläche dem unteren Seitenband gewidmet ist, insbesondere zwischen 1 und 2 kHz. Dies weist auf den o.g. Fokussierungseffekt hin, und könnte tatsächlich die größere Anwesenheit des unteren Seitenbandes erklären. Aber: aus Sicht von Liblice ist die Elevation der für diese Frequenzen "aktiven" Teile der Ionosphäre etwa 45 Grad; und dieser Sender hat eine Antenne mit einer sehr flachen Abstrahlung: bei 45 Grad Elevation schon mehr als 20 dB gedämpft, laut Entwurfdokument dieser Antenne. Berechnung des Kirchhoff-Integrals zeigt zwar den Fokussierungseffekt, aber auch dass die flache Abstrahlung dessen Gewinn reichlich aufhebt...

Fazit: Prinzipiell verstehen wir jetzt wie Seitenbandasymmetrie beim Luxemburgeffekt auftreten kann. Bezüglich Phase ist dies quantitativ und stimmt gut mit Messungen überein (Bild 7, und vielen anderen hier nicht in Detail gezeigte Fälle (Bild 5)). Bezüglich Amplitude verstehen wir auch in manchen Fällen (hier nicht gezeigt) qualitativ was passiert. Aber gerade in dem Fall wo Amplitudenasymmetrie zum ersten Mal beobachtet wurde, bleibt leider doch noch ein kleines Mysterium übrig...

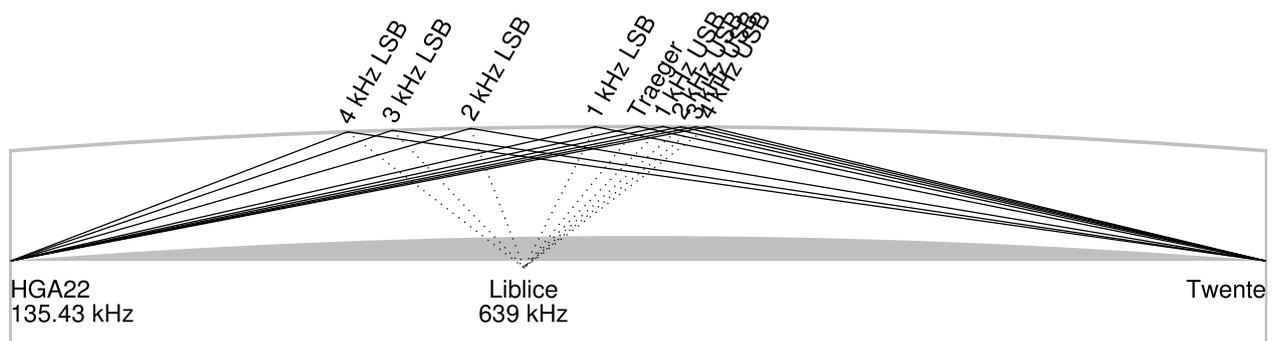


Abbildung 10: Strahlen im Fall HGA22/Liblice/Twente. Die merkwürdige "unterirdische" Position des Liblice-Senders kommt dadurch, dass dieser Sender sich nicht in der vertikalen Ebene durch HGA22 und Twente befindet, sondern etwa 80 km nördlich; Liblice ist hier so gezeichnet dass die Weglängen zur Ionosphäre noch stimmen (aber die Elevationswinkel nicht).

Referenzen

- [1] B.D.H. Tellegen: Interaction between Radio-Waves? Nature, June 1933.
- [2] Butt, A.: Luxembourg: Background of Radio-Paris, World-Radio, 1933, p. 556.
- [3] Bailey, V., and D. Martyn: Interaction of radio waves. Nature, February 1934.
- [4] J.A. Ratcliffe, I.J. Shaw: A Study of the Interaction of Radio Waves. Proc. Royal Soc. London A, 1948.
- [5] L.G.H. Huxley, H.G. Foster, C.C. Newton: Measurements of the Interaction of Radio Waves in the Ionosphere. Proc. Phys. Soc., 1948.
- [6] L.G.H. Huxley, J.A. Ratcliffe: A survey of ionospheric cross-modulation. Proc. IEE, 1949.
- [7] Markus Vester, DF6NM: Asymmetric Luxembourg Effect on HGA. Mailingliste rsgb_lf_group@blacksheep.org, 6. Januar 2013.
- [8] P.T. de Boer, PA3FWM: Maxwell, die Ionosphäre, und der Luxemburg-Effekt. UKW-Tagung Weinheim, 2016.
- [9] P.T. de Boer, M. Vester: Sideband asymmetry in ionospheric crossmodulation. In Vorbereitung.