

Maxwell, die Ionosphäre, und der Luxemburg-Effekt

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

Dieser Beitrag besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden aus physikalischen Basisprinzipien, aber ohne Mathematik, die bekanntesten Phänomene der ionosphärischen Kurzwellenausbreitung erklärt: Absorption und Reflektion, und deren Abhängigkeit von Frequenz und Einfallswinkel. Zwar ist dies schon ein Großteil eines Jahrhunderts bekannt (z.B. [1]), aber in der Amateurfunkliteratur hatte ich noch keine solche Beschreibung gesehen.

Der zweite Teil betrifft den s.g. Luxemburg-Effekt (Kreuzmodulation in der Ionosphäre), ein Effekt der mit der Theorie aus dem ersten Teil erklärt werden kann. Aber neue Messungen mit SDR-Technik zeigen eine Überraschung: die beiden Seitenbänder eines AM-Signals sind nicht gleich betroffen.

1 Radiowellen in der Ionosphäre

1.1 Maxwell-Gleichungen und Radiowellen

Die Maxwell-Gleichungen beschreiben das Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern (wie vorher auf der Tagung erläutert [8]). Insbesondere erklären sie, wie elektromagnetische Wellen (d.h., Radiowellen) sich ausbreiten können: ein in der Zeit variierendes magnetisches Feld erzeugt ein (wiederum variierendes) elektrisches Feld; und umgekehrt erzeugt ein variierendes elektrisches Feld wieder ein Magnetfeld.

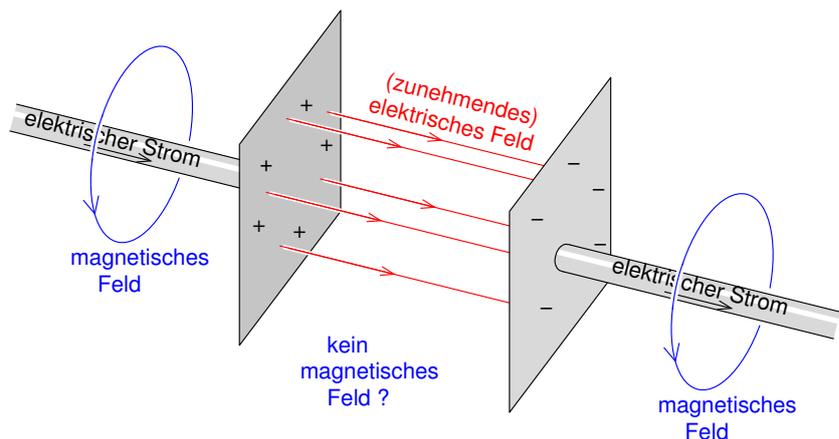


Abbildung 1: Grundlage des Verschiebungsstroms.

In diesem Zusammenhang ist der Begriff "Verschiebungsstrom" wichtig: mit diesem Begriff wird die Tatsache bezeichnet, dass ein variierendes elektrisches Feld ein Magnetfeld erzeugt, genau so wie ein "normaler" Strom das macht. Dies ist in Bild 1 veranschaulicht: es sind zwei Metallplatten gezeigt, und ein Strom der die linke Platte positiv auflädt und die Rechte negativ. Demzufolge findet man zwischen den beiden Platten ein mit der Zeit zunehmendes elektrisches Feld, das ein Magnetfeld erzeugt, genau so wie der Strom das machen würden wenn der Draht nicht unterbrochen wäre.

Der linke Teil von Bild 2 zeigt wie elektrisches Feld, Verschiebungsstrom, und Magnetfeld, einander erzeugen, sodass die elektromagnetische Welle sich im Raum ausbreiten kann.

1.2 Vertikal in die Ionosphäre hinein

Hoch in der Atmosphäre sorgt ultraviolettes Licht der Sonne dafür, dass Elektronen von Luftmolekülen getrennt werden. Wenn dort eine Radiowelle vorhanden ist, wird dessen elektrisches Feld

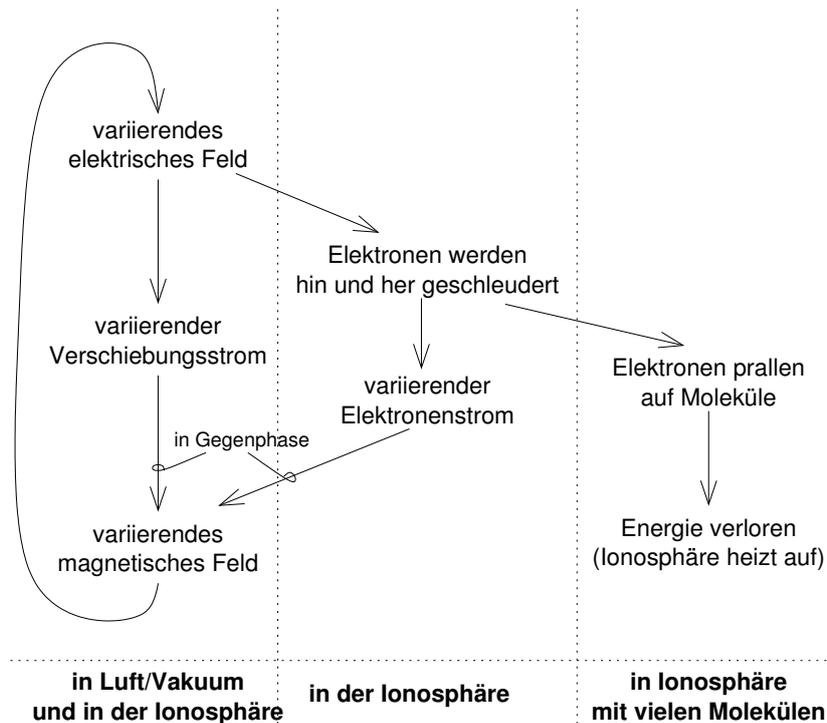


Abbildung 2: Wie die variierenden elektrischen und magnetischen Felder einer Radiowelle sich gegenseitig in Stand halten (links), und der Einfluß der Ionosphäre darauf (mitte und rechts).

eine Kraft auf diese freien Elektronen ausüben, die sie in Bewegung bringt. Solche bewegenden Elektronen bilden einen (Elektronen)Strom, und erzeugen deshalb ein Magnetfeld.

In der Ionosphäre erzeugt das wechselnde elektrische Feld einer Radiowelle also auf *zwei* Weisen ein magnetisches Feld: durch den Verschiebungsstrom (aus dem Maxwellschen Gesetz) und durch den Elektronenstrom (von bewegenden Elektronen). Es stellt sich heraus (s.u. für die Erklärung) dass:

- der Elektronenstrom in die Gegenrichtung des Verschiebungsstroms fließt;
- bei niedrigerer Frequenz der Elektronenstrom größer wird und der Verschiebungsstrom kleiner.

Für hohe Frequenzen hat der Elektronenstrom also wenig Einfluß, aber bei einer bestimmten niedrigen Frequenz (der s.g. kritischen Frequenz) ist der Elektronenstrom genau so groß wie der Verschiebungsstrom; die Ströme fließen einander aber entgegen, ihre Magnetfelder heben sich also auf, sodass die elektromagnetische Welle sich nicht weiter ausbreiten kann. Bei noch niedrigeren Frequenzen dominiert der Elektronenstrom und entsteht netto wieder ein Magnetfeld, aber dies ist "falsch herum" für die Wellenausbreitung. *Schlußfolgerung: in der Ionosphäre kann eine Radiowelle sich nur ausbreiten wenn seine Frequenz oberhalb der kritischen Frequenz liegt.* Wellen mit niedrigeren Frequenzen die die Ionosphäre erreichen, können nicht weiter gehen, und müssen deshalb wohl reflektiert werden.

Weshalb fließt der Elektronenstrom dem Verschiebungsstrom entgegen? Bei dem Kondensator aus Bild 1 sahen wir dass der Verschiebungsstrom eigentlich die Vortsetzung der Ströme in den Drähten ist. Wenn unser Kondensator links positiv aufgeladen wird, wie gezeigt, läuft der Verschiebungsstrom also nach rechts. Wenn diese Kondensatorplatten sich in der Ionosphäre befinden würden, würde es zwischen den Platten freie Elektronen geben. Diese sind negativ geladen, würden also von der positiven Ladung angezogen, und würden sich also zur linken Platte bewegen; aber weil sie negativ geladen sind, ist das ein (positiver) Strom nach rechts. So sieht es aus als liefere der Elektronenstrom in *gleicher* Richtung wie der Verschiebungsstrom. Aber wenn wir dem Kondensator einen sinusförmigen Wechselstrom zuführen, sieht es anders aus. Die Ladung auf dem Kondensator eilt dem Strom um

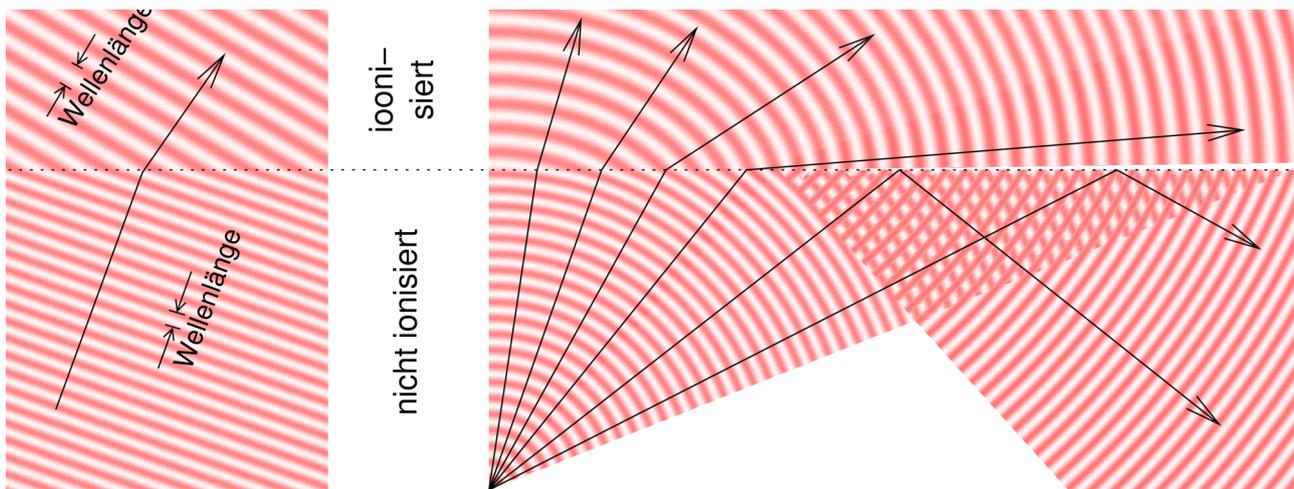


Abbildung 3: Brechung der Radiowellen an der Ionosphäre; eine Animation findet sich auf [6]

90 Grad nach (der Strom bringt ja die Ladung zur Kondensatorplatte). Es ist diese Ladung die das elektrische Feld erzeugt, und dieses Feld bestimmt die Kraft die auf die Elektronen ausgeübt wird. Die Geschwindigkeit der Elektronen eilt dieser Kraft wieder um 90 Grad nach (man muß ja zunächst die Kraft auf das Elektron ausüben vor es in Bewegung kommt). Insgesamt eilt der Elektronenstrom dem Verschiebungsstrom also um 180 Grad nach, und ist ihm also doch entgegengesetzt.

Und weshalb wird bei niedrigeren Frequenzen der Elektronenstrom größer und der Verschiebungsstrom kleiner? Auch das lässt sich mit dem Kondensator aus Bild 1 erklären. Bei einer *niedrigeren* Frequenz steigt die Feldstärke zwischen den Platten *langsamer* an (weil eben eine Periode der angelegten Wechselspannung länger dauert), sodass der Verschiebungsstrom *kleiner* ist (weil dieser ja mit der *Veränderung* der Feldstärke zusammenhängt). Daneben behält bei niedrigerer Frequenz das elektrische Feld während *längerer* Zeit die gleiche Polarität, sodass die Elektronen während längerer Zeit in die gleiche Richtung beschleunigt werden, und sie also eine *höhere* Geschwindigkeit erreichen, sodass der Elektronenstrom *größer* wird.

1.3 Schräg in die Ionosphäre hinein

Betrachten wir mal eine Radiowelle in der Ionosphäre, mit einer Frequenz oberhalb der kritischen Frequenz. Wie oben erklärt wird dann der Verschiebungsstrom nur *teilweise* von dem entgegengesetzten Elektronenstrom aufgehoben. Insgesamt ist das erzeugte Magnetfeld dann also kleiner als ausserhalb der Ionosphäre. Aus der Berechnung von Hr. Maxwell folgt ein Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge für normale, nicht ionisierte, Luft. In der Ionosphäre ist das Magnetfeld verhältnismäßig kleiner; aus der Berechnung folgt dann für die gleiche Frequenz eine *größere* Wellenlänge.¹ (Weshalb das so ist und nicht umgekehrt, lässt sich leider nicht ohne Mathematik erklären.)

Die Folge dieser Änderung der Wellenlänge ist links in Bild 3 gezeigt. Unten sehen wir eine Radiowelle die sich nach rechts oben ausbreitet in nicht-ionisierter Luft. Oben ist die Luft wohl ionisiert. Wo die Radiowelle den ionisierten Bereich erreicht, muß jedes Maximum und jedes Minimum der Welle sich aus dem nicht-ionisierten Bereich in den ionisierten Bereich weiter bewegen, denn die Frequenz bleibt gleich. Aber wie gesagt, die Wellenlänge ist im ionisierten Teil größer. Das lässt sich nur lösen

¹Man könnte glauben dass dadurch die Geschwindigkeit der Welle über die Lichtgeschwindigkeit hinaus ginge, was von Hr. Einstein nicht erlaubt wird; die Lösung für dieses (scheinbare) Problem beruht auf den Unterschied zwischen Phasengeschwindigkeit und Gruppengeschwindigkeit, was aber den Rahmen dieses Beitrags sprengt.

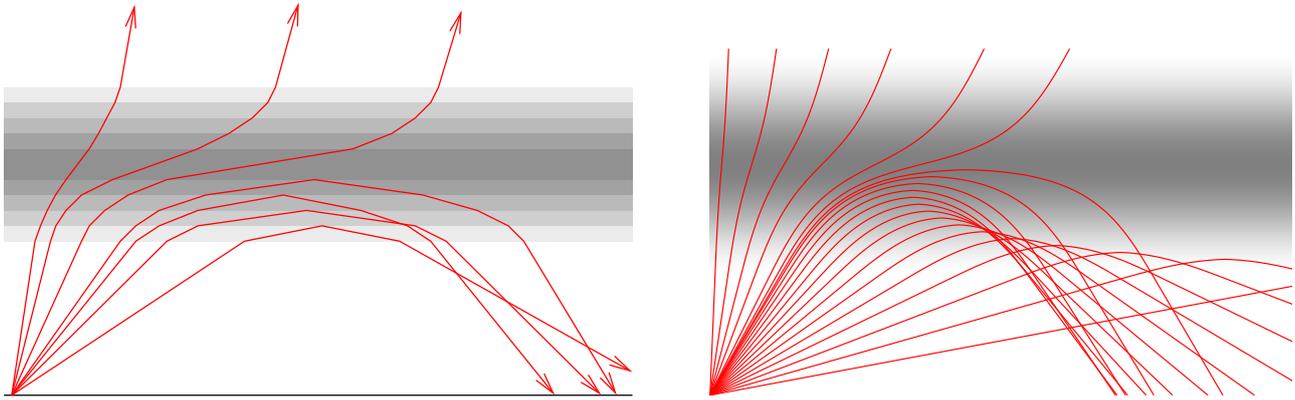


Abbildung 4: Biegung der Radiowellen in der Ionosphäre

indem die *Ausbreitungsrichtung* der Wellen sich ändert, wie gezeigt; sonst könnten die Maxima und Minima der Wellen im ionisierten und nicht-ionisierten Bereich nicht aneinander anschließen.

Rechts im gleichen Bild wird gezeigt was passiert wenn sich Radiowellen aus einem Punkt links unten ausbreiten. Diese Wellen erreichen die Grenze der Ionosphäre an verschiedenen Stellen, unter unterschiedlichen Winkeln. Wellen die recht nach oben gehen, gehen problemlos weiter. Wellen die einigermaßen schräg einfallen, ändern ihre Richtung, wie oben erklärt. Je schräger der Einfall, umso größer die Richtungsänderung, bis die Wellen so schräg einfallen, dass sie in der Ionosphäre horizontal laufen müssen um noch anzuschließen. Wenn die Wellen noch schräger einfallen, dann ist es unmöglich um noch eine anschließende Welle im ionisierten Teil zu haben, und bleibt den Wellen nichts anders als reflektiert zu werden.

Wir sehen hier also wieder ein bekanntes Phänomen: *Frequenzen oberhalb der kritischen Frequenz werden recht nach oben nicht reflektiert, können aber bei ausreichend schrägem Einfall doch reflektiert werden.*

In Bild 3 ist aber eine große Vereinfachung gemacht: wir nahmen an dass die Ionisation auf einer bestimmten Höhe plötzlich anfängt. Stattdessen nimmt die Ionisation in Wirklichkeit allmählich mit der Höhe zu, und noch höher wieder ab. Die Folge davon ist gezeigt in Bild 4. Links sehen wir eine Ionosphäre die in einigen Scheiben aufgeteilt ist, sodass die Ionisation in einigen Schritten ihr Maximum erreicht. Bei jeder Grenze zwischen zwei Scheiben können die Radiowellen entweder mit geänderter Richtung weiter gehen, oder reflektiert werden, abhängig von deren Einfallswinkel. Rechts ist diese Idee weiter getrieben zu unendlich vielen, unendlich dünnen, Scheiben: wir sehen dass die Radiowellen jetzt *allmählich* ihre Richtung ändern, und abhängig vom Einfallswinkel schließlich doch nach oben entkommen, oder nach unten gebogen werden und irgendwo die Erdoberfläche erreichen. Wegen dieser allmählichen Richtungsänderung ist es eigentlich besser nicht von "Reflektion" zu reden, sondern von "Biegung".

Wir sehen auch dass es zwei unterschiedliche Pfade zur gleichen Stelle auf der Erdoberfläche geben kann, mit unterschiedlichen Längen. Das verursacht Fading, weil die Signale über die beiden Pfade mit unterschiedlichen Phasen ankommen und einander also entweder verstärken oder (teilweise) aufheben können.

1.4 Dämpfung

Wir haben gesehen dass Elektronen in der Ionosphäre in Bewegung gesetzt werden durch das elektrische Feld einer einfallenden Radiowelle. Bisher nahmen wir an, dass sie diese Bewegung ungestört

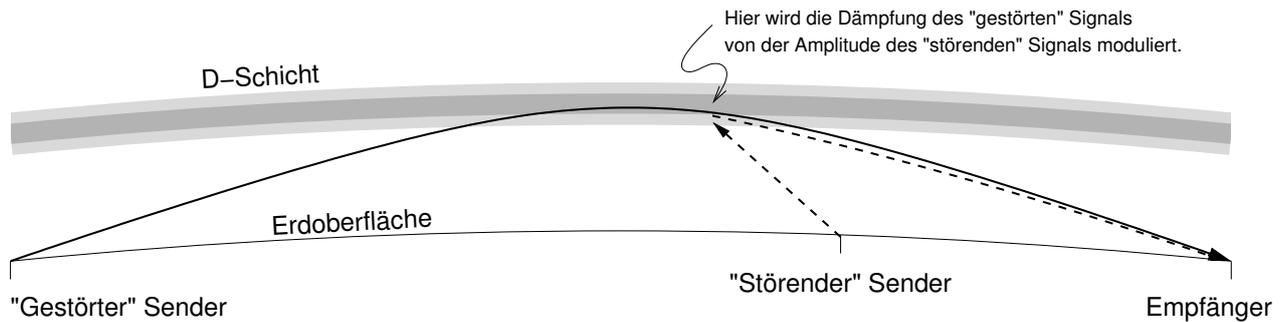


Abbildung 5: Wie der Luxemburg-Effekt (ionosphärische Kreuzmodulation) auftritt.

ausführen konnten: sie werden von dem elektrischen Feld hin und her geschleudert. Das stimmt wenn wir über die höheren Teile der Ionosphäre reden, wo die Luft sehr dünn ist.

Weniger hoch ist die Luft nicht so dünn und prallen die freien Elektronen häufig auf Luftmoleküle. Ein Molekül ist viel schwerer als ein Elektron. Es ist als ob ein Tischtennisball mit einem Fußball zusammenstößt: der Tischtennisball fliegt in eine willkürliche Richtung (abhängig von genau wie er auf den Fußball gestoßen ist), während der Fußball kaum in Bewegung kommt. Unsere Elektronen (Tischtennisbälle) werden also vom elektrischen Feld beschleunigt, aber prallen schon bald gegen ein Molekül (Fußball) und fliegen dann in eine willkürliche Richtung. Sie können also nicht "ruhig" hin und her geschleudert werden. So wird der Elektronenstrom gar nicht so groß und "entweicht" ein Teil der Energie: die beschleunigten Elektronen fliegen in willkürliche Richtungen und können so ihre Energie nicht der Radiowelle "zurückgeben". Die Welle wird also schwächer.

Eine ionisierte Schicht kann also zwei Effekte auf unsere Radiowellen haben:

- wenn die freien Elektronen ungestört hin und her geschleudert werden können, tritt Biegung/Reflektion auf;
- wenn die Elektronen schon bald auf Moleküle stoßen, tritt Dämpfung auf.

Hieraus folgt dass wir Dämpfung vor allem erwarten können in ionisierten Schichten auf geringerer Höhe (mehr Luftmoleküle, also mehr Kollisionen), und bei niedrigeren Frequenzen (denn bei einer höheren Frequenz dreht sich die Richtung der Elektronenbewegung schneller um, sodass es weniger wahrscheinlich ist dass das Elektron mittlerweile auf ein Molekül gestoßen ist). Deshalb dämpft praktisch nur die D-Schicht, und nur auf niedrigeren Frequenzen (z.B. in den 160m- und 80m-Amateurfunkbändern).

1.5 Fazit

Maxwell introduzierte, auf Basis von pur theoretischen Überlegungen, den "Verschiebungsstrom", der Radiowellen möglich macht. Diese Radiowellen ändern ihre Richtung in der Ionosphäre, oder werden gar völlig blockiert, indem der Strom der freien Elektronen teilweise oder gänzlich den Effekt des Verschiebungsstroms aufhebt. Und Kollisionen dieser freien Elektronen mit Luftmolekülen sorgen für die Dämpfung in der D-Schicht.

Übrigens ist diese ganze Überlegung doch wohl eine vereinfachte; z.B. haben wir den Einfluß des Erdmagnetfelds nicht mitgenommen. Aber dennoch ist es ein nützliches Model.

2 Der Luxemburg-Effekt

Der sogenannte Luxemburg-Effekt wurde 1933 vom Niederländer Bernard Tellegen entdeckt [2]. In Eindhoven (im Süden der Niederlande) hörte er beim Empfang eines Schweizerischen Mittelwellensender, im Hintergrund auch leise die Modulation eines Langwellensenders aus Luxemburg. Eine gerade Linie von der Schweiz nach Eindhoven führt über Luxemburg, was die Vermutung gab, dass etwas besonderes in der Ionosphäre über Luxemburg geschah. Tatsächlich haben Bailey und Martyn einige Jahre später eine Erklärung für diesen Effekt ausgedacht, die wir mit den obigen Kenntnissen über die Ionosphäre auch (qualitativ) verstehen können.

2.1 Theoretische Erklärung

Wie oben erwähnt dämpft die D-Schicht weil die Elektronen häufig auf Moleküle prallen. Wenn ein sehr starker Sender (in diesem Fall Luxemburg) aktiv ist, und es also ein starkes elektrisches Feld gibt, werden die Elektronen doch noch ziemlich viel beschleunigt bevor sie auf Moleküle prallen. Bei der Kollision verliert das Elektron nur einen kleinen Teil seiner Geschwindigkeit zugunsten der Moleküle; den Rest behält das Elektron, aber nach der Kollision in eine ganz andere Richtung. Die Folge ist dass über einem solchen leistungsstarken Sender die Elektronen durchschnittlich schneller bewegen als anderswo. Man sagt auch dass die Ionosphäre von dem luxemburgischen Sender "aufgeheizt" wird, weil ohne Radiosender die durchschnittliche Geschwindigkeit der Elektronen in der Ionosphäre nur von der Temperatur abhängig ist.

Wenn die Elektronen, vom luxemburgischen Sender aufgeheizt, schneller bewegen, werden sie auch eher wieder auf ein Molekül stoßen. Wir sahen vorher dass die Dämpfung der Ionosphäre von diesen Kollisionen verursacht wird: je mehr Kollisionen, umso mehr Dämpfung. Wenn ein anderes Radiosignal (in diesem Fall aus der Schweiz) durch die "aufgeheizte" Ionosphäre über Luxemburg geht, wird das Signal also mehr gedämpft. Und weil die Stärke des luxemburgischen Senders mit seiner Modulation variiert (Amplitudenmodulation!), wird auch die Dämpfung des schweizerischen Signals variieren mit der luxemburgischen Modulation: so wird auf dem schweizerischen Signal auch den luxemburgischen Ton hörbar.

Die luxemburgische Modulation klingt auf dem schweizerischen Signal aber dumpf. Das kommt dadurch, dass die Elektronen den Amplitudenänderungen des luxemburgischen Signals nicht unmittelbar folgen: es dauert etwas bis ihre Geschwindigkeit gestiegen ist in den Modulationsspitzen, und im Minimum dauert es auch wieder etwas bevor die Elektronen ihre erhöhte Geschwindigkeit wieder losgeworden sind (in Kollisionen mit Molekülen).

Das Phänomen wird immer noch den Luxemburg-Effekt genannt, oder manchmal auch Luxemburg-Gorky-Effekt, aber es ist seitdem noch in vielen anderen Situationen beobachtet, besonders bei leistungsstarken Langwellensendern. Technisch wäre der Begriff "ionosphärische Kreuzmodulation" besser.

2.2 Messungen in den 1940er

In den 1940er Jahren hat man detaillierte Messungen gemacht um obige Theorie zu verifizieren [3, 4, 5]. Diese Messungen wurden nach Ende der normalen Programme gemacht, sodass geeignete Testsignale ausgestrahlt werden konnten: der weit entfernte, "gestörte", Sender strahlte einen unmodulierten Träger aus, und der nähere, "störende", Sender strahlte nacheinander verschiedene Töne aus. So konnte man messen wie stark das Signal des entfernten Senders vom störenden Sender (kreuz)moduliert wurde, und mit welcher Phase (bezogen auf das Signal vom störenden Sender

selbst). Dabei wurde die Theorie bestätigt:

1. Die Kreuzmodulation wird geringer bei höherer Modulationsfrequenz; wie oben erklärt brauchen die freien Elektronen ja Zeit um ihre Geschwindigkeit der momentanen Signalamplitude anzupassen.
2. Die Kreuzmodulation ist bei niedrigen Modulationsfrequenzen dem störenden Sender gegenphasig (180 Grad Phasenverschiebung); das passt zur Theorie: umso größer die Amplitude des störenden Senders, umso schneller die Elektronen, also häufigere Kollisionen, also mehr Dämpfung des gestörten Signals.
3. Die Phase eilt bei höheren Modulationsfrequenzen zusätzlich noch bis zu 90 Grad mehr nach: das ist auch eine Folge davon, dass die Elektronen ihre Geschwindigkeit nicht unmittelbar anpassen (genau so wie ein RC-Tiefpassglied bei höheren Frequenzen nicht nur dämpft sondern auch bis zu 90 Grad Phasenverschiebung gibt).
4. Die Phase eilt bei höheren Modulationsfrequenzen noch mehr nach (zusätzlich zu den obigen 180 und 90 Grad), und zwar linear mit der Modulationsfrequenz. Eine linear von der Frequenz abhängige Phasendrehung weist auf eine konstante Zeitverzögerung hin, und das ist hier tatsächlich der Fall: der Weg des störenden Signals von seinem Sender direkt zum Empfänger (als Referenz für die Phasenmessung) ist ja kürzer als der Weg zunächst in die Ionosphäre hinein und dann "huckepack" auf dem gestörten Signal zum Empfänger.

Mir sind keine Veröffentlichungen über spätere detaillierte Messungen des Phänomens bekannt.

2.3 Neue Messungen mit SDR-Technik

Software-Defined Radio erlaubt es heutzutage, den Luxemburg-Effekt zu untersuchen auf eine Weise die in den 40er Jahren nicht möglich war:

- Messung während des ganzen Tages, statt von speziellen nach Programmende ausgestrahlten Testsignalen abhängig zu sein, indem man in Software die Kreuzkorrelation berechnet zwischen den Signalen des störenden und des gestörten Senders.
- Messung aller Modulationsfrequenzen gleichzeitig, indem man die Kreuzkorrelation für jede Modulationsfrequenz separat berechnet; die ausgestrahlte Modulation normaler Programme enthält ja etwa alle Frequenzen.
- Getrennte Messung des oberen und unteren Seitenbandes.

In Prinzip hätte man dies mit entsprechenden Filtern auch in den 40er Jahren schon tun können, aber damals hat wohl keiner geahnt dass dies interessant sei. Die Tatsache dass die Seitenbänder von dem Effekt unterschiedlich betroffen sind, hat m.W. Markus Vester, DF6NM, erstmals beobachtet [7], im Wasserfalldiagramm des WebSDRs Twente; und ein solches Wasserfalldiagramm gab es in den 40er Jahren ohne SDR eben nicht.

Ein Ergebnis einer solchen Messung, von mir mit dem WebSDR-Empfänger in Enschede, den Niederlanden, gemacht, ist in Bild 6 gezeigt. Wir sehen zwei Diagramme: das obere zeigt die (relative) Stärke der Kreuzmodulation (dunkler = starker), das untere die Phasenverschiebung zwischen störendem Signal und erzeugter Kreuzmodulation (weiß...schwarz = 0...360 Grad; mit Farben lässt sich dies im Vortrag 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. (Das sind Seitenbänder des gestörten Signals; vom störenden Signal werden für die Kreuzkorrelation immer beide Seitenbänder addiert.)

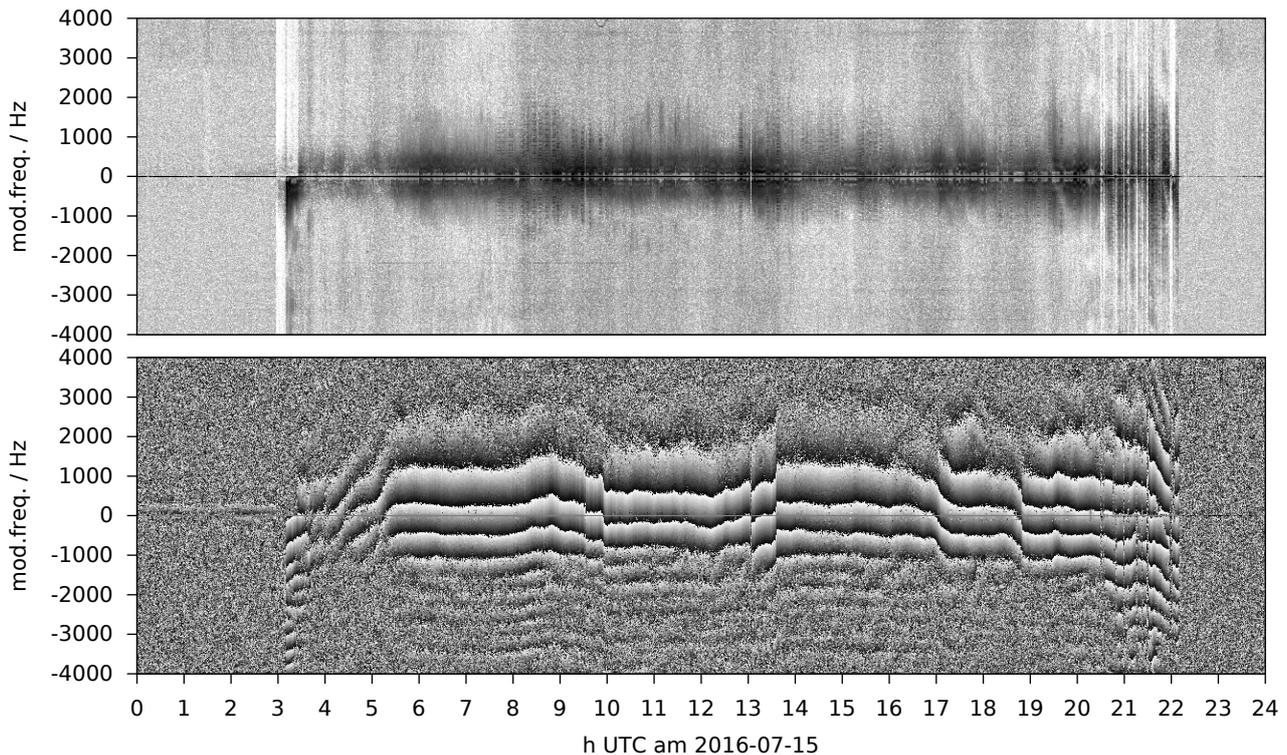


Abbildung 6: Ionosphärische Kreuzmodulation von RTL 234 kHz auf RMC 216 kHz, empfangen in Enschede, NL; oben Stärke, unten Phase. Zwischen 22:08 und 02:58 UTC sendet RMC nicht auf Langwelle.

Schauen wir uns zunächst mal die Stärke der Kreuzmodulation an (oberes Diagramm). Wir sehen dass diese stärker ist bei niedrigen Modulationsfrequenzen, so bis etwa 600 Hz. Das war ja theoretisch erwartet, Effekt nr. 1 der obigen Liste (Abschnitt 2.2).

Schauen wir uns dann die Phase an. Da fällt vor allem auf, dass sie stark mit der Modulationsfrequenz variiert. Dies ist vermutlich vor allem Effekt nr. 4 aus der Liste, nämlich die zusätzliche Verzögerung weil die Kreuzmodulation einen längeren Weg zurücklegt. Bei konstanter Zeitverzögerung sollte die Phase *linear* von der Frequenz abhängen, aber das ist klar nicht der Fall: bei höheren Frequenzen scheint die Verzögerung, und damit der Weglängendifferenz, kleiner zu sein. Insbesondere sind die beiden Seitenbänder nicht symmetrisch. Das ist sehr merkwürdig, denn eine variierende Dämpfung entspricht einer Amplitudenmodulation, wobei symmetrische Seitenbänder entstehen sollten.

Dann die andere Effekte. Laut Effekt nr. 2 soll für Modulationsfrequenzen nahe 0 Hz die Phasenverschiebung 180 Grad sein; das ist hier aber nicht der Fall; warum weiß ich nicht. Effekt nr. 3 sagt eine zusätzliche Phasenverschiebung von 90 Grad vorher; ob diese hier auftritt, ist schwer zu sagen, wegen der anderen Phasenverschiebungen. Desweiteren sieht man Phasensprünge von 180 Grad, z.B. bei 10 h UTC. Eine mögliche Erklärung dafür wird in [3] gegeben: wenn neben der Raumwelle auch die Bodenwelle ausreichend stark ist, kann, abhängig von deren Weglängenunterschied, der Effekt auch mal eine Phasendrehung von 0 statt 180 Grad (Effekt 2) aufweisen.

Bild 7 zeigt Messergebnisse der Kreuzmodulation von einem Mittelwellensender nahe Prag auf dem Ungarischen Teleswitch-Signal HGA22 auf 135 kHz; auf diesem Signal wurde Asymmetrie des Luxemburg-Effekts erstmals beobachtet [7], damals nur in Amplitude (sichtbar in einem Wasserfalldiagramm weil HGA22 ein Großteil der Zeit nur einen unmodulierten Träger ausstrahlt). Tatsächlich ist die Asymmetrie auch im Phasendiagramm sehr deutlich sichtbar, und nicht (wie in [7] gedacht)

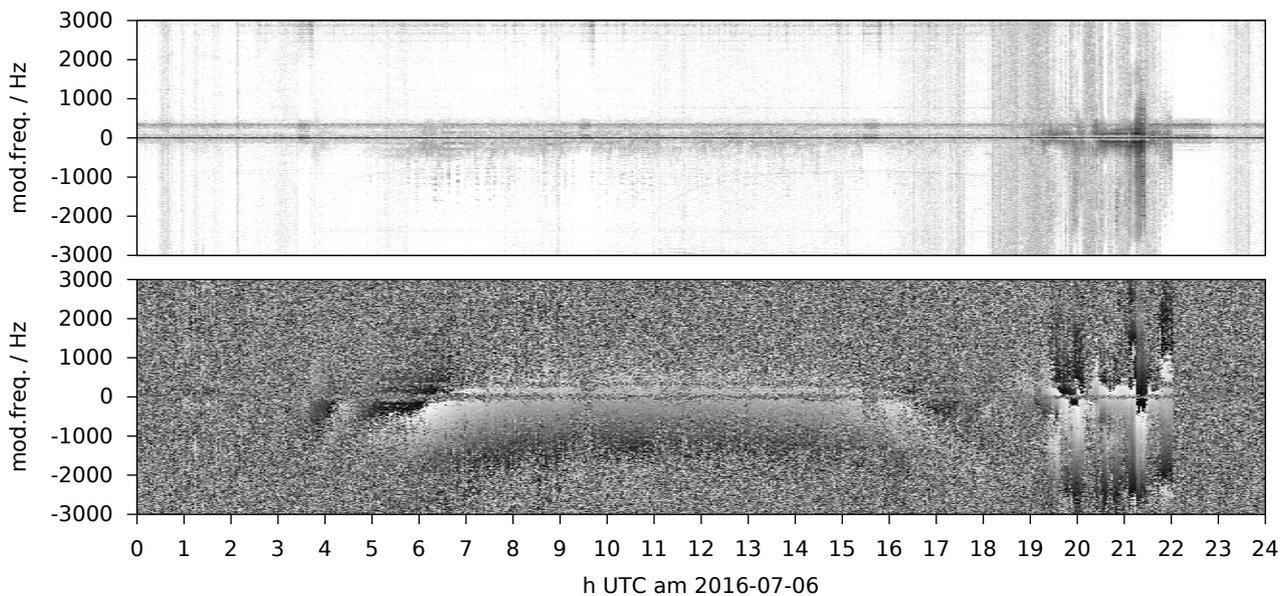


Abbildung 7: Ionosphärische Kreuzmodulation von Prag 639 kHz auf HGA22 (Ungarn) 135,43 kHz; oben Stärke, unten Phase. Zwischen 22 und 02 UTC sendet Prag 639 kHz nicht.

auf die Abendstunden beschränkt; aber tagsüber scheint sie weniger stark zu sein.

Übrigens sieht man hier gut dass der Effekt oft besser im Phasendiagramm als im Stärkediagramm zu erkennen ist.

2.4 Erklärung der Seitenband-Asymmetrie?

Es sind hier zwei Beispiele von Seitenband-Asymmetrie beim Luxemburg-Effekt gezeigt: Phasen-asymmetrie, also scheinbar unterschiedliche Weglängen (wie bei RTL/RMC, aber ich habe dies auch bei anderen Kombinationen von Langwellensendern gesehen), und Amplitudenasymmetrie (wie bei HGA22, aber auch schon anderswo gesehen). Eine Erklärung dafür gibt es m.W. (noch) nicht.

Mittlerweile mache ich mehr Aufzeichnungen und Analysen, auch von anderen Signalen und an anderen Empfangsstandorten; vielleicht wird es daraus bis zum Vortrag mehr Einsichte geben.

Weitere Ideen und Überlegungen zum Phänomen sind willkommen!

Referenzen

- [1] Raymond Jouaust: L'ionosphère, 1946.
- [2] B.D.H. Tellegen: Interaction between Radio-Waves? Nature, June 1933.
- [3] J.A. Ratcliffe, I.J. Shaw: A Study of the Interaction of Radio Waves. Proc. Royal Soc. London A, 1948.
- [4] L.G.H. Huxley, H.G. Foster, C.C. Newton: Measurements of the Interaction of Radio Waves in the Ionosphere. Proc. Phys. Soc., 1948.
- [5] L.G.H. Huxley, J.A. Ratcliffe: A survey of ionospheric cross-modulation. Proc. IEE, 1949.
- [6] <http://www.pa3fwm.nl/technotes/tn12.html>
- [7] Markus Vester, DF6NM: Asymmetric Luxembourg Effect on HGA. Mailingliste rsgb_lf_group@blacksheep.org, 6. Januar 2013.
- [8] P.T. de Boer, PA3FWM: Von den Maxwell-Gleichungen zur MiniWhip-Antenne. UKW-Tagung Weinheim, 2014.