

# Schumann-Resonanzwellen – die Atmosphäre als Wellenleiter

WOLFGANG FRIESE – DG9WF; PATRIK VOGT

Im Raum zwischen Ionosphäre und Erdoberfläche entstehen Resonanzen, die beispielsweise für die globale Blitzortung nutzbar sind und sich mit einfachen Mitteln messen lassen.

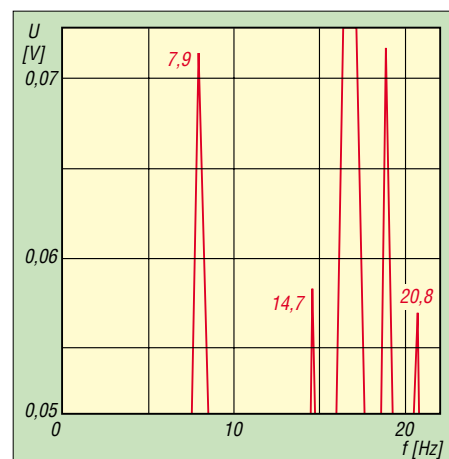
Der von 1888 bis 1974 lebende deutsche Physiker Prof. Dr. Winfried Otto Schumann sagte 1952 als erster voraus, dass im Raum zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre Funkwellen existieren, die durch die geometrischen Abmessungen der Grenzschichten bestimmte Resonanzfrequenzen besitzen. Doch erst im Jahre 1954 gelang seinem Assistenten Prof. Dr. Herbert L. König ihr experimenteller Nachweis, wobei die berechneten Werte gut mit den gemessenen übereinstimmten [1]. Doch wie bilden sich solche Resonanzen aus und wie kann man sie messen bzw. nutzen?

zu einem Hohlraumresonator, stehende elektromagnetische Wellen ausbilden können.

Die Wellenlänge  $\lambda$  der Grundschwingung dieses Resonators ergibt sich aus der einfachen Annahme, dass sie den Abmessungen des Raumes, also in guter Näherung dem Erdumfang  $U$ , entsprechen muss. Es gilt daher:

$$\lambda \approx U = 2\pi \cdot r$$

Aus dem Erdradius von 6370 km errechnet sich die Wellenlänge der Grundschwingung zu 40000 km – entspricht 7,5 Hz.



**Bild 2:** Neben den ersten drei Schumann-Resonanzwellen ist noch die Frequenz der Bahn bei  $16 \frac{2}{3}$  Hz sowie eine weitere Störung bei rund 19 Hz zu festzustellen.

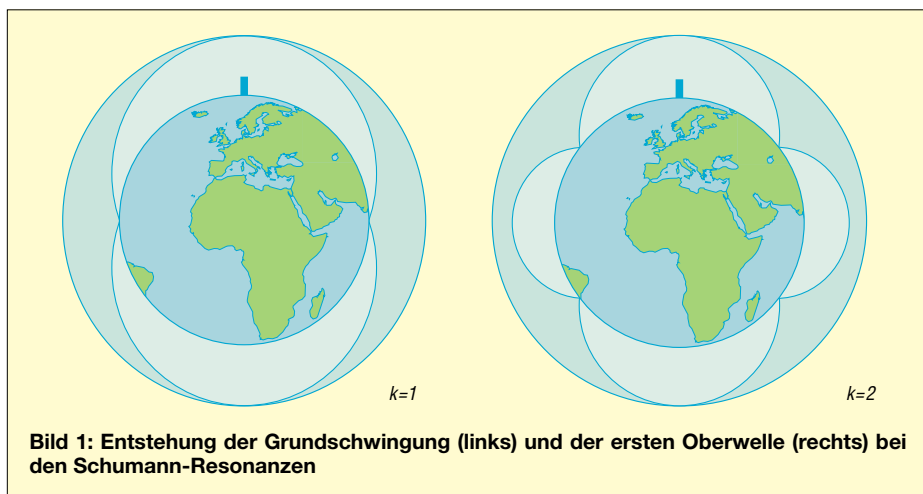
leiters bildet, sowie deren Form, dann ergibt sich als Näherung:

$$f_k \approx 6,0 \text{ Hz} \cdot \sqrt{k \cdot (k+1)} \quad (k = 1, 2, \dots)$$

Demnach liegen die ersten vier Resonanzen bei 8,5 Hz, 14,7 Hz, 20,8 Hz und 26,8 Hz. Vorwiegend durch Gewitter werden die Resonanzfrequenzen angeregt, deren elektromagnetische Impulse nahezu den gesamten ELF- und VLF-Bereich ausfüllen. Die experimentell gemessenen Frequenzen liegen bei 7,8 Hz, 14 Hz, 20 Hz und 26 Hz, wobei sie eine Abweichung aufgrund verschiedener Ionisationen in der D-Schicht von bis etwa 10% aufweisen [5].

## Empfang der Resonanzwellen

Das Messen der Schumann-Resonanzwellen erforderte noch vor wenigen Jahrzehnten einen extrem hohen technischen Aufwand für Antenne, Empfangs- und Registrierungsanlagen. So gibt Prof. Dr. H. König in [1] die technischen Daten einer



**Bild 1:** Entstehung der Grundschwingung (links) und der ersten Oberwelle (rechts) bei den Schumann-Resonanzen

## Entstehung der Schumann-Resonanzwellen

Die Ionosphäre bildet gemeinsam mit der gut leitenden Erdoberfläche einen natürlichen Wellenleiter, in dem sich elektromagnetische Signale durch Mehrfachreflexion ausbreiten können. Genutzt wird dieses Ausbreitungsprinzip beispielsweise von Langwellensendern, deren Signale an Orte empfangen werden können, zu denen eine direkte Ausbreitung, wie sie z.B. bei UKW-Sendern vorliegt, ausgeschlossen ist. Da der Erdradius  $r$  rund hundertmal größer ist als der Abstand von der Erdoberfläche zur Ionosphäre, reicht es für eine Reihe von Anwendungen aus, dies als einen planaren Wellenleiter anzusehen. Es entspricht jedoch nicht der Realität, denn in Folge der Erdkrümmung bildet dieser Raum eine Kugelschale, Bild 1. Der betrachtete natürliche Wellenleiter ist somit abgeschlossen, weshalb sich, analog

Falls die Abmessung des so gebildeten Hohlleiters ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist, bilden sich außerdem stehende Wellen.

$$\lambda_k \approx \frac{2\pi \cdot r}{k} \quad (k = 1, 2, \dots)$$

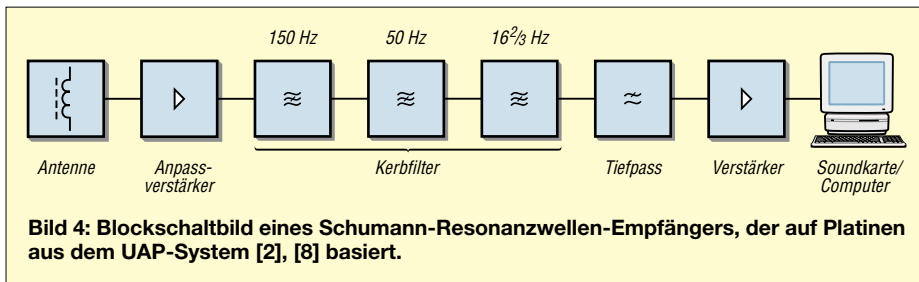
Da das Produkt aus Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $f$  einer elektromagnetischen Welle ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  entspricht, lassen sich die Resonanzfrequenzen des Hohlraumresonators Erde-Ionosphäre wie folgt berechnen:

$$f_k \approx \frac{k \cdot c}{2\pi \cdot r} = 7,5 \text{ Hz} \cdot k \quad (k = 1, 2, \dots)$$

Diese Gleichung stellt selbstverständlich nur eine erste Näherung dar. Berücksichtigt man die nur endliche Leitfähigkeit der D-Schicht, die die obere Grenze des Hohl-



**Bild 3:** Die in einem Aluminiumkoffer untergebrachte Zweifach-Induktionsspule besitzt einen 36 cm langen Ferritkern mit sehr hoher Permeabilität.



speziell für die Messung der Resonanzfrequenzen geeigneten, magnetischen Empfangsantenne mit einer Induktivität von 6600 H, Eigenresonanz 74 Hz, Spulendurchmesser 2 m, Windungszahl 40000, Gesamtmasse 153 kg an. Durch den Einsatz von Computern und der Anwendung moderner Analyseprogramme ist es jedoch heutzutage jedem Interessierten möglich, mit relativ einfachen Mitteln die Resonanzwellen nachzuweisen.

tungselektronik erzeugt und belegen die Frequenzen 25 Hz, 12,5 Hz und 6,25 Hz. Aber auch andere Frequenzbelegungen sind möglich.

■ **Schaltung des Empfängers**

Die Forderung des relativ breitbandigen Empfangs und das Vorhandensein der genannten Störungen geben schon fast das Schaltungskonzept eines Schumann-Resonanzwellenempfängers vor, Bild 4.

tive Tiefpass-Kettenschaltung die obere Grenzfrequenz des Empfängers festzulegen. 30 Hz bis 40 Hz sind hier eine gute Wahl. Hat man die Gelegenheit, das Gerät fernab der Zivilisation zu betreiben, kann die Grenzfrequenz auf über 50 Hz angehoben werden.

Um einen möglichst linearen Frequenzgang zu erhalten, sollten die aktiven Tiefpässe keine Verstärkung im Übertragungsbereich aufweisen. Weiterhin ist bei kapazitiver Kopplung der einzelnen Stufen auf ausreichend große Koppelkapazitäten zu achten, sodass es zu keiner nennenswerten Verstärkungsminderung im unteren Frequenzbereich kommt.

Ein Abschlussverstärker sorgt für eine kräftige Pegelanhebung. An seinem Ausgang kann das Signal zur Weiterleitung an die Soundkarte oder eine andere Auswerteschaltung weitergeleitet werden.



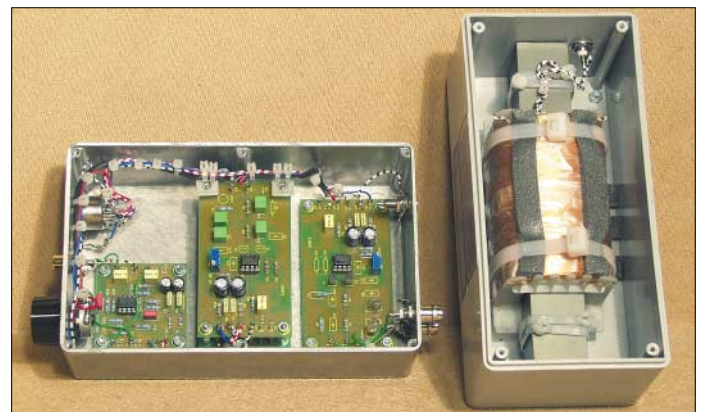
**Bild 5: Dieser zweiteilige Empfänger stellt eine kompakte Anordnung auf Basis des UAP-Systems dar.**

■ **Geeignete Antennen**

Als Operationsverstärker kommen insbesondere in den Eingangsstufen nur rauscharme Typen in Frage. Zwei mögliche Aufbauvarianten zeigen die Bilder 5 und 6 bzw. 7 und 8.

Trotz moderner Technik haben Messungen in diesen tiefen Frequenzbereichen ihre Besonderheiten, denen mit einem speziellen Empfangskonzept Rechnung zu tragen ist. Schwache Signale erfordern eine sehr hohe Verstärkung. Da neben der Grundwelle auch die ersten Oberwellen empfangen werden sollen, erfolgt, bezogen auf den Frequenzbereich, ein breitbandiger Empfang. Störend wirken sich dabei verschiedene Frequenzen mit meist technischem Ursprung aus. Neben der Netzfrequenz mit 50 Hz sind die 16 2/3 Hz der Bahn mit einem besonders hohen Störpegel besetzt. Selbst 20 und mehr Kilometer Abstand des Empfangsorts von der nächsten elektrifizierten Bahnlinie verhindert nicht, dass deren Aussendungen einen wesentlich höheren Empfangspegel als die schwachen Resonanzwellen ergeben. Je nach der Versorgungsnetzsituation und der Art der angeschlossenen Verbraucher kann es im Umfeld des Empfängers noch zu weiteren sehr störenden Aussendungen kommen. Dazu zählen neben den Oberwellen der Netzfrequenz bei 100 Hz und 150 Hz auch subharmonische Schwingungen, so genannte Unterschwingungen. Diese werden, je nach Aufbereitung der Netzfrequenz, insbesondere von der Leis-

**Bild 6: Die Filterstufen des Empfängers sind in der Mitte des linken Gehäuses übereinander angeordnet.**



Der Antennenanpassverstärker sorgt für die verlustfreie Übergabe des Antennensignals und eine erste kräftige Verstärkung. Direkt nach der Eingangsstufe folgen schmalbandige Sperrfilter für die Störsignale auf 150 Hz, 50 Hz und 16 2/3 Hz. Dafür eignen sich Notch-Filter, aktive Wien-Robinson-Sperrfilter oder aktive Doppelt-Sperrfilter.

Wir haben mit Letzteren sehr gute Erfahrungen gemacht, jede Filterstufe kommt mit nur einem Operationsverstärker aus. Voraussetzung für die optimale Funktion und daher wirkungsvolle steiflankige Unterdrückung der unerwünschten Frequenz ist allerdings die Verwendung engtolerierter Bauteile für die frequenzbestimmenden Elemente [2], [8]. Die Auswahl der Kerbfilter sollte sich nach den Empfangsbedingungen richten.

Nachdem die größten Störer nun gezielt unterdrückt wurden, gilt es, durch eine ak-

Für den Empfang der magnetischen Feldkomponente werden im VLF- und ELF-Bereich oft Rahmenantennen benutzt. Deren Gewinn wächst mit der umschlossenen Fläche und der Windungszahl. Für die tiefen Schumann-Frequenzen ergeben sich bei der Benutzung dieser Antennentypen einige Nachteile.

Durch die erforderliche Größe sind die Konstruktionen sehr windempfindlich. Das führt zu Induktionsspannungen durch die Bewegung der Leiterschleifen im Erdmagnetfeld, wobei die Frequenz der induzierten Spannung proportional zur mechanischen Vibrationsfrequenz ist. In der Praxis erfordert diese Tatsache absolute Windstille, da selbst die Induktionsspannungen kleinster mechanischer Bewegungen zur Übersteuerung des Empfängers durch das sehr hoch verstärkte Eingangssignal führen würde. Weitere Nachteile der Rahmenantenne sind die aus der notwendigen Größe

resultierende Unhandlichkeit und das hohe Gewicht der Konstruktion.

Sehr gute Erfahrungen haben wir mit dem Empfang mittels so genannter Induktionspulen gemacht. Dabei handelt es sich um hochinduktive Spulen, deren Wicklungen aus 10 000 oder mehr Windungen CuL-Draht bestehen. Der Spulenkörper sitzt auf einem Kern mit sehr hoher Permeabilität. Zur Erreichung der erforderlichen Induktivität ist es auch möglich, mehrere Spulen zusammenzuschalten. Neben der hohen Empfindlichkeit zeichnen sich diese Spulen durch einen geringen Antenneneffekt und durch äußerst kompakte, handliche Abmessungen aus.



### ■ Anforderungen an Empfänger und Betriebstechnik

Um optimale Empfangsergebnisse zu erzielen, sind unbedingt einige Punkte zu beachten. Der Empfangsort sollte einen gewissen Abstand zu Bahnleitungen, Hochspannungsleitungen, Umspannstationen und Industriebetrieben aufweisen. Vorteilhaft ist die mobile Aufzeichnung mit Hilfe eines Laptops oder eines speziellen Aufzeichnungsgerätes. Durch die Versorgung der Geräte aus Akkumulatoren oder Batterien erübrigen sich Netzzuleitungen, sodass damit verbundene Störungen entfallen. Der Empfänger mit der magnetischen Antenne sollte über ein längeres Verbindungskabel und eher reichlich bemessenen räumlichen Abstand mit den Registriergeräten verbunden sein, um Rückwirkungen zu vermeiden.

Vorteilhaft kann die Testaufnahme mit einem klirrarmlen Referenzsignal z.B. eines NF-Generators sein. Dafür schließt man eine Frequenzquelle an die Soundkarte an und testet schrittweise den Bereich von 20 Hz abwärts. Dabei lässt sich sowohl der Frequenzgang der Soundkarte ermitteln als auch die Fähigkeiten des Analyseprogramms bei der Bearbeitung der tiefen Frequenzen bewerten.

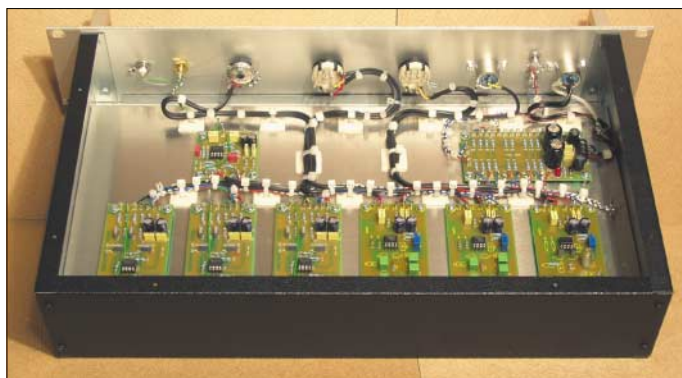
Die Resonanzgüte des von Erde und Ionosphäre gebildeten Hohlleiters nimmt mit höherer Frequenz ab. Dadurch werden die Empfangspegel der Oberwellen immer kleiner und die Resonanzhöcker flachen sich

immer weiter ab. In der Praxis sind die Signale oberhalb der dritten Resonanzwelle mit amateurmäßigen Mitteln hierzulande meistens nicht mehr nachweisbar – sie gehen im Rauschen unter. Die Empfangsbedingungen sind tagsüber besser als in der Nacht und im Sommer besser als im Winter.

Ein Versuchsergebnis zeigt Bild 2. Zur Auswertung der empfangenen Signale wurde das PC-Interface Sensor-Cassy der Firma Leybold [7] benutzt, die Auswertung und Darstellung erfolgte mit der Software Cassy-Lab. Prinzipiell kann auch jede andere Analysesoftware Anwendung finden, sofern sie die Möglichkeit zur Analyse mittels Fast Fourier Transforma-

**Bild 7:** Das Anpassmodul für magnetische und elektrische Antennen lässt sich auch abgesetzt und ferngespeist vom Hauptgerät betreiben.

**Bild 8:** An der hier vorne liegenden Rückseite des verwendeten 19-Zoll-Gehäuses erkennt man die Platinen der Kerb- und Tiefpassfilter. Fotos: DG9WF



tion (FFT) bietet und für die tiefen Frequenzen geeignet ist.

Neben den ersten drei Schumann-Resonanzen, die in diesem Beispiel bei 7,9 Hz, 14,7 Hz und 20,8 Hz liegen, kann man die Frequenz der Bahn von  $16 \frac{2}{3}$  Hz sowie eine weitere Störfrequenz bei etwa 19 Hz deutlich erkennen. Ein Vergleich der experimentell bestimmten Resonanzfrequenzen mit der schon aufgeführten, einfachen Theorie sowie mit den in [5] dargelegten Messergebnissen zeigt, dass schon mit relativ einfachen Mitteln erstaunlich gute Resultate erzielbar sind.

### ■ Nutzung der Resonanzwellen

Eine der wichtigsten Anwendungen der Resonanzen stellt die globale Blitzortung dar. Dazu werden drei Messstationen benötigt, die in möglichst großen Abständen voneinander platziert und mittels GPS-Empfängern synchronisiert wurden. Zündet ein Blitz an einer beliebigen Stelle auf der Erdoberfläche, so regt er den Hohlraumresonator zum Schwingen an. Aufgrund der unterschiedlich langen Wege vom Entstehungsort des Blitzes zu den Empfängern

erreichen die abgestrahlten elektromagnetischen Impulse die Messstationen nicht gleichzeitig. Aus den gemessenen Zeitdifferenzen kann man den Entstehungsort des Blitzes bis auf mehrere hundert Kilometer genau bestimmen [3]. Eine ausführlichere und anschauliche Beschreibung der Blitzortung wird in [6] gegeben.

Neben der globalen Blitzvermessung stellt die Überwachung des Weltraumwetters eine weitere Anwendung dar. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen durch Mehrfachreflexion im natürlichen Wellenleiter wird in besonderem Maße von der Leitfähigkeit der Ionosphäre beeinflusst. Diese wiederum ist variabel und ändert sich mit der Elektronendichte, die in unmittelbarem Zusammenhang zur Sonnenaktivität steht. Insbesondere magnetische Stürme, verbunden mit Sonneneruptionen, führen zu einer zusätzlichen Ionisation bis in eine Höhe von 50 km.

Nicht nur die Leitfähigkeit unterliegt dabei erheblichen Änderungen, sondern auch die

Abmessungen des Resonators; seine obere Begrenzung wird weit nach unten verschoben [3]. Dies führt zu einer messbaren Änderung der Resonanzwellen, was die Beobachtung der Variation von Leitfähigkeit und Weltraumwetter ermöglicht.

WolfgangFriese@t-online.de  
Patrik\_Vogt@t-online.de

### Literatur

- [1] König, H. L.: Unsichtbare Umwelt. Eigenverlag, München, 1983
- [2] Friese, W., DG9WF: Universelles analoges Platinensystem. FUNKAMATEUR 52 (2003) H. 4, S. 366–367; H. 11, S. 1117–1121
- [3] Schlegel, K.; Füllekrug, M.: 50 Jahre Schumann-Resonanzen – Weltweite Ortung von Blitzen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Physik in unserer Zeit 33 (2002) H. 6
- [4] Volland, H.: Die Ausbreitung langer Wellen. Vieweg Verlag, Braunschweig 1967
- [5] Max-Planck-Institut für Aeronomie Katlenburg-Lindau: Schumann-Resonanzwellen. Schriftliche Auskunft
- [6] Leonhardt, F.: Methoden der Blitzortung. Arbeitskreis Amateurfunk & Telekommunikation in der Schule e.V., AATIS, Praxisheft 9
- [7] Leybold Didactic GmbH: Homepage. [www.leybold-didactic.com](http://www.leybold-didactic.com)
- [8] Friese, W., DG9WF: UAP-System. [www.sfericsempfang.de](http://www.sfericsempfang.de)