

Radiowellen als Form elektromagnetischer Wellen
- Betrachtung in der Elektrodynamik, Technik und Astrophysik -

Besondere Lernleistung im Fach Physik

Elisabeth-Gymnasium Halle (Saale)

Schuljahr 2015/16

Betreuender Lehrer: Herr M. Talanow

Abgabetermin: 14. März 2016

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	4
2. Radiowellen im elektromagnetischen Spektrum	5
3. Radiowellen in der Elektrodynamik als elektromagnetische Wellen	
3.1 Die Maxwellschen Gleichungen im Vakuum	6
3.2 Entstehung elektromagnetischer Wellen	
3.2.1 Entstehung am Hertzschen Dipol	10
3.2.2 Andere Entstehungsorte	13
3.3 Eigenschaften elektromagnetischer Wellen	
3.3.1 Ausbreitung im Nah- und Fernfeld eines Hertzschen Dipols	14
3.3.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit	16
3.3.3 Energiedichte	17
3.3.4 Wellen- und Teilcheneigenschaften	18
4. Technische Nutzung von Radiowellen	
4.1 Geschichte der Funktechnik	19
4.2 Unterschiedliche Frequenzbereiche von Radiowellen	20
4.3 Radio	21
4.4 Fernsehen	24
4.5 Radar	25
4.6 GPS	26
4.7 Beispiele für weitere Anwendungen	27
4.8 Einflüsse nicht ionisierender Strahlung auf den Menschen	27
5. Radiowellen in der Astrophysik - Die Radioastronomie	
5.1 Kosmische Radioquellen	29
5.2 Beobachtungsmöglichkeiten	32
5.3 Exkursion zum Radioteleskop Effelsberg	35
5.4 Eigenbau eines einfachen Radioteleskops zur Sonnenbeobachtung	
5.4.1 Versuchsaufbau	42
5.4.2 Messungen und Auswertung	47
6. Schlussbemerkungen	54
Quellenverzeichnis	55
Danksagung	63
Eigenständigkeitserklärung	64

1. Einleitung

Der englische Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) veröffentlichte 1873 ein Lehrbuch über Elektrizität und Magnetismus ("Treatise on Electricity and Magnetism"), in dem seine vier Grundgleichungen der Elektrodynamik enthalten waren. Diese "Maxwellschen Gleichungen" beschreiben die Existenz und das Verhalten von elektromagnetischen Wellen als eine Ausbreitung elektromagnetischer Felder im Raum (vgl. Ref.2.1: o.V., dibb Biographien), die Maxwell selbst aber nicht experimentell nachweisen konnte, was 1886 Heinrich Hertz (1857-1894) erstmals gelang (vgl. Ref.1.2: Dombrowski et al. 2009, S. 233).

Diese Facharbeit soll Radiowellen als eine Form elektromagnetischer Wellen in verschiedenen wissenschaftlichen Teilbereichen betrachten: Den Inhalt der Maxwellschen Gleichungen, die Entstehung von Radiowellen sowie deren Eigenschaften im Bereich der Elektrodynamik, die Nutzung von Radiowellen in der Technik sowie die Analyse und Bedeutung von Radiowellen in der Radioastronomie, einem Teilgebiet der Astrophysik. Dabei sollen experimentell eigene Messungen solarer Radiowellen mit Hilfe eines selbstgebautes Radioteleskops vorgenommen werden.

Da elektromagnetische Wellen und insbesondere Radiowellen alltäglich verwendet werden, aber mir dennoch kaum etwas über genauere Eigenschaften und die Entstehung dieser Wellen bekannt war, fiel meine Wahl des Themas in diesen physikalischen Teilbereich, um durch die Recherchen für diese Arbeit mehr über diese Form der Wellen zu erfahren, die aus der heutigen Technik und Gesellschaft nicht mehr wegzudenken sind und deren breites Anwendungsspektrum auch einen faszinierenden Aspekt im Rahmen meiner besonderen Lernleistung darstellt. Ebenfalls die Analyse und Nutzung elektromagnetischer Wellen in der Astrophysik, die bereits im Astronomieunterricht angesprochen wurden, weckten mein Interesse, genauso wie die Möglichkeit, mit einfachen Mitteln selber Radiowellen empfangen und messen zu können. Gespannt war ich besonders auf die abschließende Exkursion und die Einführung in die Technik des Radioteleskops von Effelsberg, um die dortigen professionellen Messmethoden und Möglichkeiten als Ergänzung zu denen meines Eigenbaus betrachten zu können.

2. Radiowellen im elektromagnetischen Wellenspektrum

Bei Radiowellen handelt es sich um elektromagnetische Wellen, die vor allem zur Übertragung von Rundfunk und Fernsehen dienen und die zu Ehren von Heinrich Hertz auch Hertz'sche Wellen genannt werden (vgl. Ref.2.2: o.v., LernHelfer), mit einer Wellenlänge λ von ca. 10 km bis 1 cm. Ihre Frequenzen f umfassen damit einen Frequenzbereich von ca. 30 Kilohertz bis 30 Gigahertz (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 365).

Der Name Radiowellen leitet sich vom lateinischen Wort "radius", Strahl, ab (vgl. Ref.1.5: Jonis, Michaela et al., 1998, S. 689) und verweist auf die Definition einer elektromagnetischen Welle als eine sich geradlinig ausbreitende elektromagnetische Schwingung im Raum, wobei eine periodische Änderung der Amplitudengrößen erfolgt. Elektromagnetische Wellen benötigen hierfür, anders als mechanische Wellen, wie z.B. Schallwellen, kein Medium, sondern können sich auch im Vakuum ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c aller elektromagnetischen Wellen beträgt im Vakuum 299.792 km/s, rund 3×10^8 m/s (vgl. Ref.1.4: Prof. Hoche et al., 2011, S. 254ff). Es gilt: $c = f \cdot \lambda$

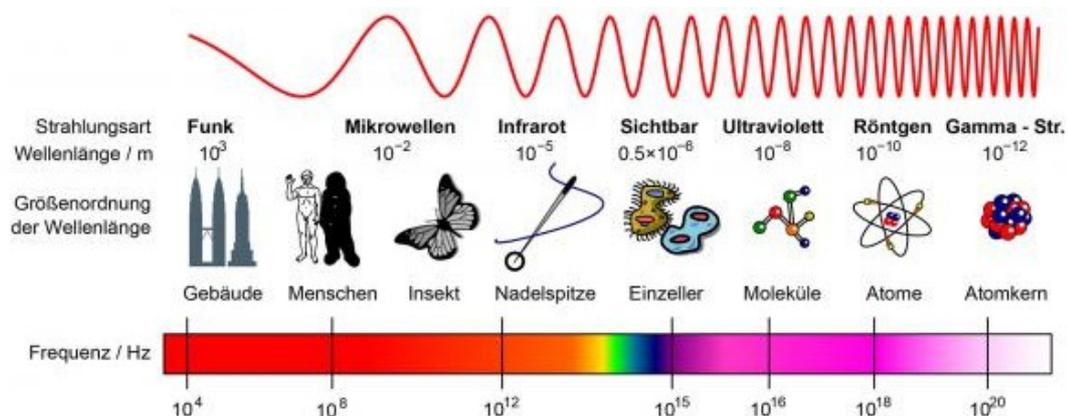


Abb. 1: Radiowellen als "Funk" im elektromagnetischen Spektrum (nach Ref.3.1: diybook)

Radiowellen sind aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Frequenz und großen Wellenlänge im unteren Bereich des elektromagnetischen Spektrums angesiedelt. Lediglich Wellen des technischen und tonfrequenten Wechselstroms besitzen größere Wellenlängen. Am oberen Ende des Frequenzbereichs von Radiowellen schließen sich mit höheren Frequenzen Mikrowellen an (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 368), wobei eine klare Trennung der Frequenzbereiche hier schwer ist und auch in der Literatur nicht einheitlich vorgenommen wird.

3. Radiowellen in der Elektrodynamik als elektromagnetische Wellen

3.1 Die Maxwellschen Gleichungen im Vakuum

James Clerk Maxwell beschrieb 1873 erstmals Eigenschaften elektromagnetischer Wellen, indem er vier Gleichungen über das Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern zusammenstellte. Sie beinhalten Wissen, das teilweise vor Maxwell bekannt war, doch ihm gelang es, mehrere Formeln zusammenzufassen, zu erweitern oder umzuschreiben. Durch diese Formeln war es ihm möglich, die Existenz elektromagnetischer Wellen vorherzusagen, die er selber nicht experimentell nachweisen konnte (vgl. Ref.1.2: Dombrowski et al. 2009, S. 233). Die hier erläuterten Gleichungen beschreiben das Verhalten elektrischer und magnetischer Felder im materiefreien Raum (mikroskopische Gleichungen) und vernachlässigen damit die Einflüsse durch andere Stoffe und deren materialabhängige Eigenschaften (vgl. Ref.2.3: Noack, Theor. Physik für Lehramtsstudenten).

Das elektrische und magnetische Feld sind Vektorfelder. Sie können z.B. durch die vektoriellen Größen der elektrischen Feldstärke \vec{E} (als Kraft pro Ladung) und der magnetischen Flussdichte \vec{B} (als Kraft durch Stromstärke in Abhängigkeit von der Länge des Leiters) beschrieben werden. Die zeitliche Änderung dieser Vektorfelder lässt sich als partielle Ableitung nach der Zeit t darstellen (vgl. Ref.2.4: Dr. Bäker, ScienceBlogs):

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \text{ bzw. } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Partiell ableiten bedeutet, eine Größe, die von mehreren Variablen abhängig ist (hier den räumlichen Variablen in x -, y - und z -Richtung und der zeitlichen Variablen t), nur nach einer dieser Variablen abzuleiten (vgl. Ref.2.5: Dr. Leisen, Gutenberg-Universität Mainz).

Die Divergenz (div) eines Vektorfeldes ist ein Maß für dessen Quellendichte. Als Quellen und Senken werden Anfangs- und Endpunkte von Vektorpfeilen bezeichnet, z.B. für den Vektor der elektrischen Feldstärke. Ist die Divergenz eines betrachteten Volumens ungleich Null, so befinden sich Quellen und/oder Senken in diesem Volumen (vgl. Ref.2.4: Dr. Bäker, ScienceBlogs). Die Divergenz ist das Skalarprodukt aus dem Nabla-Operator, der die Anweisungen enthält, die einzelnen x -, y - und z -Komponenten jeweils partiell nach der Variablen (x , y oder z) abzuleiten, und der zu untersuchenden Größe, deren Ergebnis eine Zahl oder ein Ausdruck mit Variablen ist und kein Vektor (vgl. Ref.2.5: Dr. Leisen, Gutenberg-

Universität Mainz).

Schreibweise: $\operatorname{div} \vec{X} = \nabla \cdot \vec{X}$

Zur Berechnung kann auch ein Volumenintegral verwendet werden. Wenn beispielsweise in einen Würfel der Kantenlänge 1 in einem Koordinatensystem die gleiche Anzahl gleich langer Vektoren auf einer Seite hineinführen wie auf der gegenüberliegenden Seite herausführen, so ist die Divergenz dieses Vektorfeldes Null. Beispielsweise ist die Divergenz der Feldstärke eines homogenen elektrischen Feldes oder Radialfeldes Null, solange sich keine Ladung im betrachteten Volumen befindet, doch bei Betrachtung des gesamten Feldes sind Anfangs- und Endpunkte der Vektorpfeile als Orte der positiven bzw. negativen Ladung definiert und es handelt sich somit um ein Quellenfeld. Nach Gauß ist auch die Berechnung mit Hilfe der Flächenintegrale und der Flächenvektoren, die senkrecht auf der Körperoberfläche stehen, möglich (vgl. Ref.2.4: Dr. Bäker, ScienceBlogs).

Die Erste Maxwellsche Gleichung bezieht sich auf die Divergenz elektrischer Felder:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Sie sagt aus, dass die Divergenz der elektrischen Feldstärke \vec{E} von der Ladungsdichte ρ abhängt, und zeigt, dass es sich um ein Feld mit Quellen und Senken handeln muss, also mit Feldlinien, die einen festen Anfangspunkt haben - die positive Ladung - und nicht geschlossen sind. Ist keine Ladung im betrachteten Volumen vorhanden, beträgt die Ladungsdichte und damit die Divergenz Null. Dieses Gesetz wurde von Carl Friedrich Gauß in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt und von Maxwell übernommen.

Die Zweite Maxwellsche Gleichung trifft eine Aussage zur Divergenz magnetischer Felder:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Die Divergenz der magnetischen Flussdichte ist Null. Das heißt, dass auch magnetische Feldlinien nicht divergieren, beziehungsweise keine festen Anfangs- und Endpunkte haben. Dieses Gesetz entspricht der Anwendung des Gaußschen Gesetzes auf magnetische Felder (vgl. Ref.2.6: o.V., Engineering and Technology History Wiki) und beruht auf Erkenntnissen des französischen Physikers André-Marie Ampère von 1820, der feststellte, dass magnetische Felder quellenfrei sind und es keine magnetischen Monopole gibt, weshalb die Feldlinien geschlossen sind (vgl. Ref.2.5: Dr. Leisen, Gutenberg-Universität Mainz).

Für die Dritte und Vierte Maxwellsche Gleichung spielt die Rotation von Vektorfeldern eine Rolle, die deren räumliche Änderung beschreibt (vgl. Ref.2.4: Dr. Bäker, ScienceBlogs). Hierfür

wird ein geschlossenes Kurvenintegral verwendet, ein Umlaufintegral, bei dem nicht über eine Achse (z.B. die x-Achse) integriert wird, sondern über einen "Weg", bei dem Anfangs- und Endpunkt identisch sind. Eine andere Berechnung der Rotation kann mit Hilfe des Nabla-Operators beschrieben werden, wobei die Rotation das Kreuzprodukt aus Nabla-Operator und der zu untersuchenden Größe ist, z.B. der elektrischen Feldstärke oder magnetischen Flussdichte.

Schreibweise: $\text{rot } \vec{X} = \nabla \times \vec{X}$

Als Ergebnis erhält man einen Wert für die Verwirbelung von Vektorfeldern. Als ein Wirbel werden geschlossene Feldlinien bezeichnet. Ruhende elektrische Ladungen erzeugen wirbelfreie elektrische Felder, was bereits der französische Physiker Charles Augustin de Coulomb im Jahr 1785 entdeckte. Ihre Rotation ist gleich Null, was bedeutet, dass ein Umlaufintegral beliebiger Form stets Null ist. Der Grund dafür ist, dass Feldlinien dieser elektrischen Felder einen festen Anfangspunkt haben, nämlich eine positive Ladung. Von hier aus verlaufen sie entweder zu einer negativen Ladung oder ins Unendliche und sind nicht geschlossen.

Mit der Verwirbelung elektrischer Felder befasst sich die Dritte Maxwellsche Gleichung:

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Sie sagt aus, dass nicht alle elektrischen Felder wirbelfrei sind. Dies ist beispielsweise von Induktionsströmen bekannt. Demnach ist bei einer sich zeitlich verändernden magnetischen Flussdichte eines magnetischen Feldes immer ein elektrisches Wirbelfeld vorhanden. Dieses Gesetz schlussfolgerte Maxwell aus dem Induktionsgesetz des englischen Naturwissenschaftlers Michael Faraday von 1831.

Die Feldlinien magnetischer Felder dagegen sind geschlossen und haben keinen festen Anfangs- oder Endpunkt (vgl. Ref.2.5: Dr. Leisen, Gutenberg-Universität Mainz). Es handelt sich daher um Wirbelfelder, was auch Inhalt der Vierten Maxwellschen Gleichung ist:

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Sie besagt, dass die Rotation der magnetischen Flussdichte \vec{B} von der zeitlichen Änderung der elektrischen Feldstärke \vec{E} sowie dem Stromdichtevektor \vec{j} abhängig ist, der in Richtung des Stromflusses führt und dessen Länge der Stromstärke pro Leiterquerschnittsfläche entspricht. Umgekehrt lässt sich schlussfolgern: Bei einem sich zeitlich verändernden

elektrischen Feld existiert immer ein magnetisches Wirbelfeld (vgl. Ref.2.4: Dr. Bäker, ScienceBlogs). Diese Gleichung leitete Maxwell vom Ampèreschen Durchflutungsgesetz ab, das von ihm um den zweiten Summanden vervollständigt wurde und beruht auf Erkenntnissen des dänischen Physikers Hans Christian Ørsted (vgl. Ref.2.5: Dr. Leisen, Gutenberg-Universität Mainz). Man spricht daher auch vom erweiterten Durchflutungsgesetz, bei dem der sogenannte Verschiebungsstrom berücksichtigt wird, der z.B. zwischen Kondensatorplatten eines Wechselstromkreises auftritt, obwohl sich keine Ladungsträger zwischen den Platten bewegen (vgl. Ref.2.7: o.V., Spektrum). Maxwell stellte so eine Beziehung zwischen der elektrischen Feldstärke und dem magnetischen Wirbelfeld her. Auffällig ist auch, dass das Dritte und Vierte Maxwellsche Gesetz nicht symmetrisch aufgebaut sind: Ein elektrisches Wirbelfeld existiert demnach bei der zeitlichen Änderung eines magnetischen Feldes, doch ein magnetisches Wirbelfeld existiert sowohl bei vorhandenem Verschiebungsstrom als eine zeitliche Änderung des elektrischen Flusses als auch bei vorhandenem Leitungsstrom durch bewegte Ladungen (vgl. Ref.2.5: Dr. Leisen, Gutenberg-Universität Mainz).

Zusammenfassend kann man sagen: Ein sich zeitlich veränderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld und ein sich zeitlich veränderndes elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Wirbelfeld. Mit diesen Erkenntnissen traf Maxwell Vorhersagen zu elektromagnetischen Wellen, die es geben müsse, wenn sich elektrisches und magnetisches Feld quasi gegenseitig aufrechterhalten und sich so eine Welle im Raum ausbreiten kann (vgl. Ref.2.4: Dr. Bäker, ScienceBlogs).

3.2 Entstehung elektromagnetischer Wellen

3.2.1 Entstehung am Hertzschen Dipol

Elektromagnetische Schwingungen bilden die Grundlage für elektromagnetische Wellen. Sie treten auf, wenn sich elektrische und magnetische Feldenergie in einem System periodisch ineinander umwandeln, was mit einer zeitlich periodischen Änderung von Spannung und Stromstärke verbunden ist. Dies findet z.B. in einem elektromagnetischen Schwingkreis statt, bei dem ein Kondensator und eine Spule in Reihe geschaltet sind.

Ist der Kondensator vollständig geladen, so sind die Stärke des elektrischen Feldes und die Spannung U am Kondensator maximal, während die Stromstärke I des Systems und die Stärke des magnetischen Feldes um die Spule gleich Null sind. Entlädt sich der Kondensator, fließt Strom, der das Entstehen eines magnetischen Feldes um die Spule herum bewirkt, während das elektrische Feld um den Kondensator abgebaut wird. Bei einer vollständigen Entladung des Kondensators sind die Spannung am Kondensator sowie die Stärke des elektrischen Feldes gleich Null, während die Stromstärke im Schaltkreis sowie die Stärke des magnetischen Feldes um die Spule herum maximal sind. Die Induktion in der Spule bewirkt das Entstehen einer Spannung, die den Kondensator entgegengesetzt auflädt, wodurch auch dessen elektrisches Feld entgegengesetzt aufgebaut wird, während das magnetische Feld um die Spule abgebaut wird. Anschließend findet ein erneutes Entladen und darauffolgendes Aufladen des Kondensators über die Spule statt. Es findet somit ein wechselseitiger Auf- und Abbau von elektrischem und magnetischem Feld statt. Eine vollständige Schwingung umfasst dabei das Entladen, entgegengesetzte Aufladen, Entladen und erneute Aufladen des Kondensators. Es findet eine Umwandlung von elektrischer Energie in magnetische statt, wobei die Summe aus elektrischer Energie und magnetischer Energie konstant ist.

Der Schwingkreis besitzt nach der Thomschen Schwingungsgleichung eine Eigenfrequenz f (vgl. Ref.1.4: Prof. Hoche et al., 2011, S. 251f):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

Bedingung: Widerstand $R = 0$

L: Induktivität einer Spule - Maß für die Fähigkeit mit Magnetfeld Spannungen zu erzeugen

C: Kapazität eines Kondensators - Maß für die Fähigkeit elektrische Energie zu speichern

(vgl. Ref.2.8: o.V., Elektronik Kompendium)

Aus dieser Formel ergibt sich: Je größer das Produkt aus L und C, desto kleiner ist die Frequenz f .

An einem solchen Schwingkreis können meist keine Radiowellen entstehen. Das liegt daran, dass die Induktivität einer Spule mit mehreren Windungen sowie die Kapazität eines "gewöhnlichen" Kondensators eher groß sind, weshalb nach der Thomschen Schwingungsgleichung keine Radiowellen mit ihren höheren Frequenzen entstehen und daran, dass das elektrische Feld vor allem zwischen den Kondensatorplatten aufgebaut wird, wodurch es kaum in den umgebenden Raum hineinreicht (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 360). Um die Unterschiede zwischen dem Schwingkreis und dem Hertzschen Dipol nachzuvollziehen, soll betrachtet werden, wie die Induktivität der Spule L und die Kapazität des Kondensators C berechnet werden.

Für die Induktivität einer Spule gilt:
$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

Die Permeabilität μ ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines Materials für magnetische Felder und ist materialabhängig, wobei auch dem Vakuum eine zugeschrieben ist (vgl. Ref.2.9: o.V., DocCheck Flexikon). Sie ist das Produkt aus der materialabhängigen Permeabilitätszahl μ_r , die im Vakuum 1 ist, was auch für Luft annähernd angenommen werden kann, sowie der magnetischen Feldkonstante μ_0 . Für ferromagnetische Stoffe wie Eisen läge der Wert der materialabhängigen Permeabilitätszahl deutlich höher. N gibt die Zahl der Windungen an, A die Oberfläche der Spule und l deren Länge. Um eine möglichst kleine Induktivität L der Spule für das Erzeugen hoher Frequenzen zu erreichen, wird eine Spule ohne ferromagnetischen Kern, eine Luftspule verwendet, die Zahl der Windungen N minimiert, was einem geraden Leiter entspricht, sowie die Spulenlänge l vergrößert und die Oberfläche A verkleinert (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 360).

Für die Kapazität des Kondensators gilt:
$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

Die Permittivität ε ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder und ist materialabhängig (vgl. Ref.2.9: o.V., DocCheck Flexikon), wobei wieder auch dem Vakuum eine zugeschrieben ist. Sie wird aus den Faktoren der materialabhängigen Permittivität ε_r , die im Vakuum und auch annähernd in Luft 1 ist, sowie der elektrischen Feldkonstante ε_0 gebildet. A gibt die Größe der Oberfläche der Kondensatorplatten an und d deren Abstand. Damit die Kapazität des Kondensators möglichst gering ausfällt, wird ein luftgefüllter Kondensator verwendet, der Abstand der Kondensatorplatten d vergrößert sowie deren Oberfläche A verkleinert. Genau wie bei der Induktivität entsprechen diese Veränderungen im Extremfall einem geraden Leiter.

Dieser gerade Leiter wird Hertzscher Dipol genannt und ist ein offener Schwingkreis (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 360).

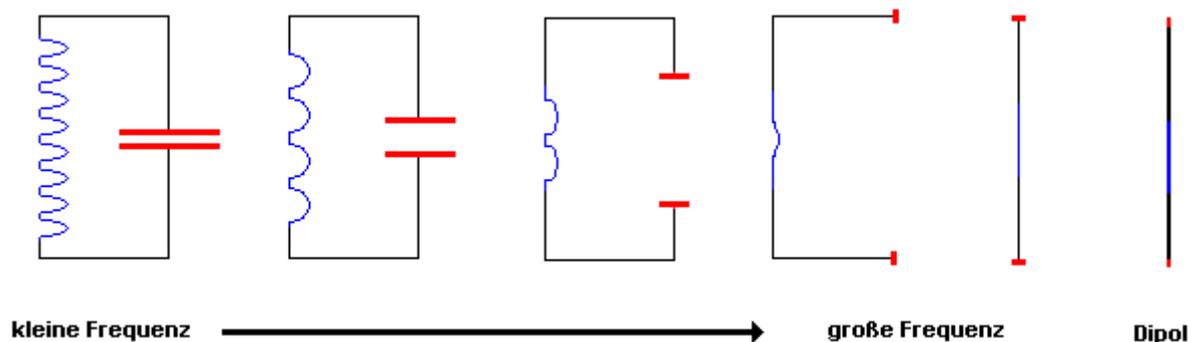


Abbildung 2: Vom Schwingkreis zum Hertzschen Dipol
(Ref.3.2: Landesbildungsserver Baden-Württemberg)

Auch am Hertzschen Dipol entstehen das elektrische und magnetische Feld zeitlich versetzt.

Die Grafik zeigt die Vorgänge während einer Schwingung:

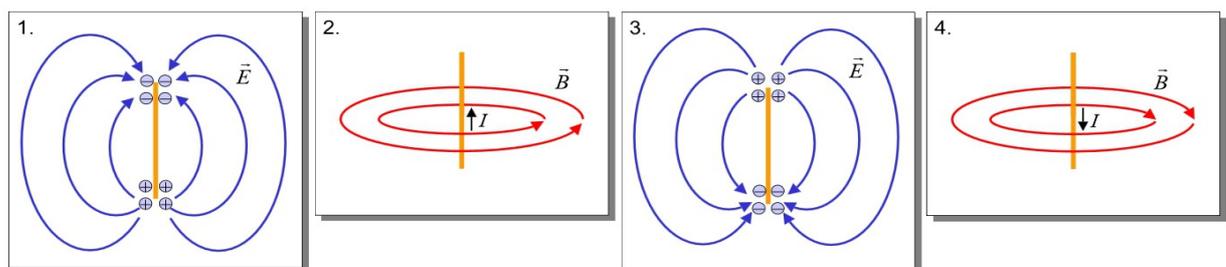


Abbildung 3: Entstehung elektrischer und magnetischer Felder am Hertzschen Dipol
(Ref.2.10: Uni Kassel)

Wenn der Kondensator aufgeladen ist, ist das elektrische Feld am stärksten und das magnetische Feld nicht vorhanden. Wenn der Kondensator entladen ist, fließt Strom im Leiter, das elektrische Feld am Kondensator ist am geringsten und das magnetische Feld um den Leiter am stärksten (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 360).

Durch die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes entstehen elektrische Wirbelfelder, die sich vom Dipol lösen, da sich ihre Feldlinien schließen, was der Dritten Maxwell'schen Gleichung entspricht, und durch die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes können auch ohne Leitungsströme magnetische Wirbelfelder entstehen, was der Vierten Maxwell'schen Gleichung entspricht. Das ist der Grund dafür, dass sich die Felder im Raum ausbreiten und nicht nur statische Felder um den Dipol bleiben (vgl. Ref.2.10: o.V., Uni Kassel).

3.2.2 Andere Entstehungsorte

Elektromagnetische Wellen entstehen allgemein beim Beschleunigen von Ladungsträgern (vgl. Ref.2.11: o.V., LernHelfer), wodurch diese Photonen abstrahlen. Die Photonen sind quasi die Bestandteile der elektromagnetischen Wellen. Elektronen in Atomen können verschiedene Energiestufen besitzen, wobei der Übergang zwischen verschiedenen Energiestufen mit der Aufnahme oder Abgabe von Energiequanten verbunden ist (vgl. Ref.2.12: o.V., Uni Ulm). Der dänische Physiker Niels Bohr (1885-1962) veröffentlichte 1913 seine Erkenntnisse über den Aufbau von Atomen in den Bohrschen Postulaten (vgl. Ref.1.2: Dombrowski et al. 2009, S. 233). Danach bewegen sich Elektronen auf Kreisbahnen um den Kern mit bestimmten Energiewerten auf ihren Schalen ohne Energieänderung (strahlungsfrei). Der Übergang von Elektronen zwischen verschiedenen Schalen, der Quantensprung, ist mit Absorption oder Emission von Energie verbunden, da Arbeit verrichtet wird, wenn durch die Positionsänderung des Elektrons die anziehende Kraft zwischen den verschiedenen elektrischen Ladungen von Proton und Elektron verändert wird. Photonen besitzen in Abhängigkeit von der Frequenz ein bestimmtes Maß an Energie. Elektronen können beim Sprung von einer inneren zu einer äußeren Schale nur Photonen einer Welle mit bestimmter Frequenz und Wellenlänge absorbieren, da keine "Zwischenstufen" zwischen den Schalen möglich sind. Umgekehrt strahlen Elektronen beim Übergang in eine Schale, die näher am Proton liegt, ein festes Maß an Energie als Photon ab, was einer elektromagnetischen Welle mit einer charakteristischen Frequenz entspricht. Die Eigenschaft der Elektronen, nur bestimmte Energieniveaus erreichen zu können, ist der Grund für die charakteristischen Absorptions- und Emissionsspektren der verschiedenen Elemente (vgl. Ref.2.12: o.V., Uni Ulm).

Ein Beispiel für das Auftreten elektromagnetischer Wellen in der Natur ist die Wärmestrahlung, die jeder Körper mit einer Temperatur über 0 Kelvin emittiert. Die elektromagnetischen Wellen entstehen hier aufgrund der Molekularbewegung von Teilchen des Körpers (vgl. Ref.2.13: Paal). Auch bei Funkenentladungen entstehen elektromagnetische Wellen, wenn z.B. Elektronen zwischen geladenen Kugeln "überspringen", was als Lichtbogen sichtbar ist, oder in der Natur in Form von Blitzen, die dadurch andere elektromagnetische Wellen störend beeinflussen können. Bei solchen Funkenentladungen entstehen nicht nur elektromagnetische Wellen einer Frequenz, sondern über einen breiten Frequenzbereich hinweg (vgl. Ref.2.14: Schmidt, Uni München).

3.3. Eigenschaften elektromagnetischer Wellen

3.3.1 Ausbreitung im Nah- und Fernfeld eines Hertzischen Dipols

Aus den Maxwell'schen Gleichungen geht hervor, dass es sich bei elektromagnetischen Wellen im Vakuum um Transversalwellen handelt, bei denen das elektrische Feld senkrecht auf dem magnetischen Feld und senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung x steht (vgl. Ref.2.15: Benson et al., HU Berlin).

Um den Hertz'schen Dipol herum bilden sich elektrische und magnetische Felder, die nicht in Phase sind, also unterschiedliche Achsenschnittpunkte in Ausbreitungsrichtung besitzen. Man spricht hier vom Nahfeld in unmittelbarer Umgebung des Dipols, in dem die Welleneigenschaften auch von den Ladungen und Strömen des Leiters abhängig sind (vgl. Ref.2.10: o.V., Uni Kassel).

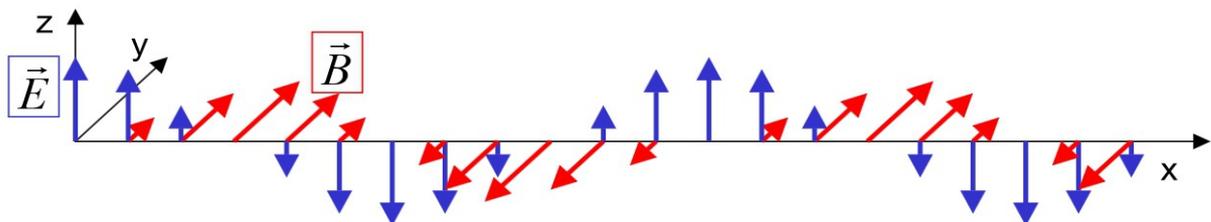


Abbildung 4: Schema der Wellenausbreitung im Nahfeld (Ref.2.10: Uni Kassel)

Diese Einflüsse durch Ladungen und Ströme nehmen mit zunehmendem Abstand vom Dipol exponentiell ab (vgl. Ref.2.16: Suter, Uni Dortmund). Im sogenannten Fernfeld sind die Ladungsdichte ρ und der Leitungsstrom Null, was die Maxwell'schen Gleichungen beeinflusst:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \quad \text{und} \quad \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Die Felder erzeugen sich hier gegenseitig nur aufgrund ihrer zeitlichen Änderung. Eine Lösung der Maxwell'schen Gleichungen ist eine Welle, bei der die Werte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte an gemeinsamen Punkten Null sind, was sie vom Nahfeld unterscheidet, damit die Welle sich auch im ladungsfreien Raum unabhängig vom Entstehungsort ausbreiten kann. Sie sind in Phase.

Die dargestellte Welle ist eine linear polarisierte Welle, weil ihre Ausbreitungsrichtung konstant ist (ebene Welle), die Amplitudenänderungen von \vec{E} und \vec{B} periodisch sind und sich \vec{E} und \vec{B} jeweils in einer konstanten Ebene befinden. Bei einer elektromagnetischen Welle im Vakuum handelt es sich immer um eine polarisierte Welle, weil \vec{E} senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht auf \vec{B} stehen muss (vgl. Ref.2.10: o.V., Uni Kassel).

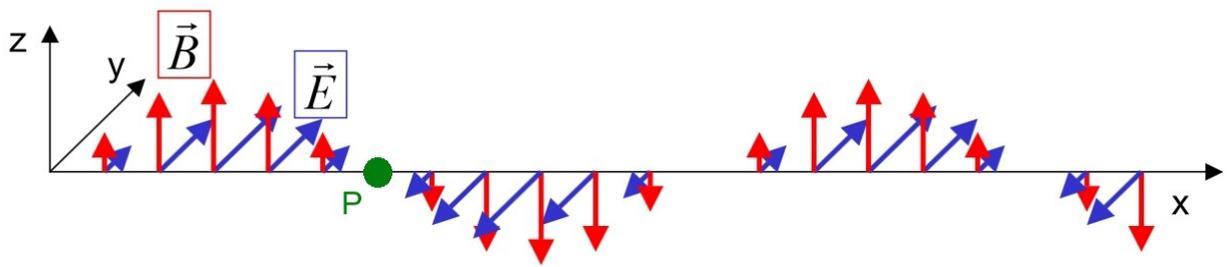


Abbildung 4: Schema der Wellenausbreitung im Fernfeld (nach Ref.2.10: Uni Kassel)

Dass \vec{E} und \vec{B} in Phase sein müssen, kann man sich wie folgt verdeutlichen: Am gemeinsamen Schnittpunkt P mit der Koordinatenachse in Ausbreitungsrichtung ist der Anstieg der elektrischen Feldstärke am geringsten (der Betrag am größten) und die zeitliche Änderung von \vec{E} (für $t \ll T$) am größten (\vec{E} wird "gleich" im selben Punkt deutlich größer sein als "jetzt" aufgrund der Ausbreitung der Welle in x-Richtung), was nach Maxwell bedeutet, dass auch der Betrag der Rotation der magnetischen Flussdichte, also deren räumliche Änderung am größten sein muss, weshalb auch bei ihr der Anstieg in diesem Punkt am geringsten (betragsmäßig am größten) sein muss. Das bedeutet, dass \vec{B} und \vec{E} im Fernfeld immer gemeinsame Schnittpunkte mit der Koordinatenachse in Ausbreitungsrichtung haben müssen, wenn kein Leitungsstrom vorhanden ist, der für eine Verschiebung des magnetischen Feldes in x-Richtung sorgt, was im Nahfeld der Fall ist.

Die Vorstellung der Ausbreitung von Wellen im Nah- und Fernfeld ist dabei nur eine modellhaft idealisierte Annahme, da der Übergang zwischen Nah- und Fernfeld fließend ist.

3.3.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit

Durch Umstellen der Maxwell'schen Gleichungen für das Vakuum und im Fernfeld erhält man die sogenannten Wellengleichungen, aus denen man die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle schlussfolgern kann.

Die Dritte Maxwell'sche Gleichung wird um den Operator der Rotation erweitert

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = -\operatorname{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{B}$$

Durch Einsetzen der Vierten Maxwell'schen Gleichung (ohne den Einfluss von Ladungen und Strömen im Fernfeld) für die Rotation von \vec{B} erhält man

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Ein Ausdruck für die zweimalige Verwendung des Rotationsoperators ist der negative Laplace-Operator, wenn die Divergenz Null ist, was im Fernfeld der Fall ist

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = -\Delta \vec{E}$$

Es ergibt sich eine Formel in Bezug auf die elektrische Feldstärke, die nicht mehr, wie in den Maxwell-Gleichungen, an die magnetische Flussdichte gekoppelt ist

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \Delta \vec{E} = \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Analog dazu kann eine Formel für die magnetische Flussdichte hergeleitet werden

$$\Delta \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \Delta \vec{B} = \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Die Formeln verknüpfen die Aussagen zur räumlichen und zeitlichen Änderung des \vec{E} -Feldes bzw. des \vec{B} -Feldes. Es lässt sich dabei der Faktor $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ erkennen. Die Wurzel ergibt sich aus der zeitlichen Änderung, die in quadratischer Form in der Gleichung vorkommt, sowie der zweimaligen Anwendung des Rotationsoperators für die räumliche Änderung als Laplace-Operator. Dieser Faktor entspricht der Phasengeschwindigkeit, der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle im Vakuum und beträgt dort rund 3×10^8 m/s (vgl. Ref.2.10: o.V., Uni Kassel).

3.3.3 Energiedichte

Bei elektromagnetischen Wellen wird in Ausbreitungsrichtung Energie transportiert. Die Energiedichte w gibt dabei die Verteilung von Energie beispielsweise auf das elektrische und magnetische Feld an. Bei elektromagnetischen Wellen besteht sie aus der Summe der elektrischen und magnetischen Energiedichte. Für die Ausbreitung im Vakuum gilt

$$w_{ges} = w_{El} + w_{Mag} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\vec{E})^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} (\vec{B})^2$$

Die Anteile der elektrischen und magnetischen Energiedichte müssen gleich groß sein, da am Dipol quasi eine gegenseitige Umwandlung von elektrischer und magnetischer Feldenergie stattfindet

$$w_{El} = w_{Mag} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\vec{E})^2 = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} (\vec{B})^2$$

Umgestellt ergibt sich ein Verhältnis von \vec{E} und \vec{B}

$$\frac{\vec{B}}{\vec{E}} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = konst.$$

Die Werte der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke bei elektromagnetischen Wellen sind proportional zueinander, wobei \vec{E} um die Ausbreitungsgeschwindigkeit c im Vakuum größer ist als \vec{B} (vgl. Ref.2.17: o.V., Uni Kaiserslautern).

3.3.4 Wellen- und Teilcheneigenschaften

Elektromagnetische Wellen besitzen sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften.

Aufgrund ihres Wellencharakters haben elektromagnetische Wellen folgende Eigenschaften:

- Brechung beim Übergang zwischen unterschiedlichen Medien
- Beugung an Hindernissen
- Interferenz von Wellen mit Bereichen der Verstärkung und Abschwächung möglich
- Absorption, Transmission oder Reflexion an Stoffen, was von der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle und dem Material des Stoffes abhängig ist
- Polarisation der Welle, "Ausrichtung" der Feldvektoren möglich
- Beschreibung mit "Wellengrößen" möglich, z.B. Frequenz und Wellenlänge

(vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 362f)

Zusätzlich können die Eigenschaften der einzelnen Photonen als Elementarteilchen (Quanten) einer elektromagnetischen Welle betrachtet werden. Ihre Eigenschaften werden in der Quantenphysik untersucht. Mit Hilfe der Teilcheneigenschaften lassen sich zum Beispiel Zusammenhänge zwischen der Energie und der Frequenz der Welle analysieren.

Da elektromagnetischen Wellen sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften zugeordnet werden können, spricht man vom Welle-Teilchen-Dualismus (vgl. Ref.2.18: Salzmann, Physik-Wissen).

4. Technische Nutzung von Radiowellen

4.1 Geschichte der Funktechnik

Der russische Physiker Alexander Popow (1859-1905) gilt als einer der Pioniere des Rundfunks, der seine Erfindung 1895 in St. Petersburg präsentierte, mit der man Signale mit elektromagnetischen Wellen über geringe Distanzen übertragen konnte. Nachdem seine Idee in russischer Fachliteratur publiziert worden war, kopierte ein Jahr später der Italiener Guglielmo Marconi (1874-1937) Popows Entwurf für einen Funkempfänger, ließ ihn sich patentieren und überarbeitete ihn (vgl. Ref.2.19: o.V., Kuriose Feiertage). Marconi zog nach England, errichtete ein Netz aus Funkstationen und entwickelte immer leistungsfähigere Sender und Empfänger. In Deutschland entstand, auch auf Drängen von Kaiser Wilhelm II, eine Konkurrenzfirma, Telefunken, da der Kaiser die moderne Funktechnik für seine Schiffsflotte nutzen wollte. Dabei kopierten in den Anfangsjahren die deutschen Wissenschaftler um Graf von Arco vor allem Marconis weiterentwickelte Technik (vgl. Ref.4.1: Terra X - Das unsichtbare Netz, 2011). Später entwickelte Ferdinand Braun in Deutschland den Funksender und -empfänger weiter und verbesserte die Sendeantennen, sodass ihm eine gerichtete Abstrahlung elektromagnetischer Wellen gelang (vgl. Ref.2.20: o.V., Universität Würzburg). In Telefunken wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse von Siemens und AEG vereint, um gemeinsam gegen Marconis wachsendes Monopol bestehen zu können. Entgegen der Meinung renommierter Wissenschaftler gelang es Marconi 1901, ein Signal über den Atlantik zu übertragen, da die Wellen teilweise an der Ionosphäre der Erde reflektiert werden und sich nicht, wie angenommen wurde, geradlinig in den Weltraum ausbreiten. Beim Untergang der Titanic 1912 sendeten die Funker Notrufsignale, was zur Rettung von 704 Menschen führte. Es war auch ein Durchbruch der Funktechnik, da ab jetzt vermehrt private und militärische Schiffe die Funkstationen verbauten.

Der heute oft verwendete Begriff der "Funktechnik" leitet sich dabei vom Funken ab, der als Überschlag elektrischer Ladungen bei Kugeln entstand und mit dem man in den Anfangsjahren des Funks elektromagnetische Wellen erzeugte (vgl. Ref.4.1: Terra X - Das unsichtbare Netz, 2011).

4.2 Unterschiedliche Frequenzbereiche von Radiowellen

Die Frequenzen von Hertzschen Wellen, die heute in der Technik, z.B. im Rundfunk verwendet werden, reichen von Längst- und Langwellen im Kilohertz-Frequenzbereich bis hin zu Zentimeterwellen mit Frequenzen im unteren Gigahertz-Bereich, die sich damit schon mit dem Frequenzspektrum von Mikrowellen überschneiden und unter anderem bei Fernsehsatelliten genutzt werden (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 368). In Deutschland wird die Vergabe von Frequenzen für private, militärische und behördliche Zwecke von der Bundesnetzagentur geregelt, wobei der sogenannte Frequenzplan öffentlich einsehbar ist (vgl. Ref.2.21: o.V., Bundesnetzagentur).

Bereich	Frequenz f	Wellenlänge λ	Anwendungen
Langwellen (LW oder LF)	148,5 kHz – 283,5 kHz 290 kHz – 527 kHz	2 km – 1 km 1000 m – 600 m	Rundfunk Schiffsfunk Funkpeilung
Mittelwellen (MW oder MF)	526,5 kHz – 1606,5 kHz	600 m – 200 m	Rundfunk
Kurzwellen (KW oder HF)	3,00 MHz – 27,5 MHz	100 m – 11 m	Rundfunk Flugfunk Amateurfunk CB-Sprechfunk
Meterwellen (VHF)	48,25 MHz– 62,25 MHz 87,5 MHz–108 MHz 175,25 MHz– 217,25 MHz	6,2 m – 4,8 m 3,4 m – 2,8 m 1,7 m – 1,4 m	Fernsehen VHF Band I UKW-Rundfunk Fernsehen VHF Band III
Dezimeterwellen (UHF)	0,3 GHz – 3 GHz 471,25 MHz – 599,25 MHz 607,25 MHz – 783,25 MHz	10 dm – 1 dm 6,3 dm – 5 dm 4,9 dm – 3,8 dm	Richtfunk auf der Erde, Radar Fernsehen UHF Band IV Fernsehen UHF Band V
Zentimeterwellen (Mikrowellen, SHF)	3 GHz – 30 GHz	10 cm – 1 cm	Richtfunk von Nachrichten-Satelliten Funkastronomie

Abbildung 5: Frequenzbereiche und -nutzung von Radiowellen
(Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 365)

Die Frequenzbereiche unterscheiden sich dabei in ihren Eigenschaften aufgrund der verschiedenen Wellenlängen. So werden beispielsweise Wellen in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge unterschiedlich gut von der Ionosphäre der Erde reflektiert (vgl. Ref.2.22: o.V., ITWissen) und auch die Art, wie Informationen auf den einzelnen Frequenzbändern mit elektromagnetischen Wellen übertragen werden, ist nicht einheitlich. Dies ist vor allem beim Radioempfang von Bedeutung. Es ist daher auch zu beachten, dass die Frequenzbereiche je nach Anwendung weltweit ähnlich vergeben werden, um Interferenzen von Wellen gleicher Frequenz zu vermeiden, die die Signalübertragung beeinflussen und stören würden. Dies regelt heute die Internationale Fernmeldeunion (ITU) mit Sitz in Genf (vgl. Ref.2.23: o.V., ITU).

4.3 Radio

Das Wort Radio verweist auf die geradlinige Ausbreitung elektromagnetischer Wellen vom Sendedipol (vgl. Ref.1.5: Jonis, Michaela et al., 1998, S. 689). Im deutschen Rundfunkgebührenstaatsvertrag wird ein Radio als Rundfunkempfangsgerät folgendermaßen definiert: "Rundfunkempfangsgeräte [...] sind technische Einrichtungen, die zur drahtlosen oder drahtgebundenen, nicht zeitversetzten Hör- oder Sichtbarmachung oder Aufzeichnung von Rundfunk-Darbietungen (Hörfunk und Fernsehen) geeignet sind" (§1, Abs.1, Satz 1 des RGebStV] (vgl. Ref.2.24: o.V., Internetratgeber Recht).

Damit eine elektromagnetische Welle vom Dipol abgestrahlt werden kann, muss ihre Frequenz hoch genug sein - mindestens im Bereich von 100 kHz. Wenn am Mikrofon beispielsweise Sprache in elektromagnetische Schwingungen umgewandelt wird, haben die Wellen eine Frequenz bis ca. 20 kHz und damit auch weniger Energie als andere Wellen des elektromagnetischen Spektrums. Um dennoch Sprache oder Musik mit Hilfe Hertzscher Wellen übertragen zu können, werden charakteristische Eigenschaften des niederfrequenten Signals auf eine hochfrequente Trägerschwingung übertragen, die dann vom Sendedipol abgestrahlt werden kann. Die Trägerschwingung wird moduliert (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 368).

Es lassen sich dabei zwei Modulationsverfahren bei Wellen zum analogen Radioempfang unterscheiden: Die Amplitudenmodulation (AM) und die Frequenzmodulation (FM). Bei der Amplitudenmodulation werden die Elongationen der hochfrequenten Trägerschwingung verändert. Hierbei wird das Superpositionsprinzip genutzt, nach dem eine ungestörte Überlagerung von Schwingungen stattfinden kann, die bei Wellen gleicher Frequenz auch als Interferenz bekannt ist (vgl. Ref.2.25: o.V., Physik im Unterricht). Bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz der Trägerschwingung verändert, während die Amplituden konstant bleiben. Dies geschieht achsensymmetrisch zur Zeitachse, also betragsmäßig gleichermaßen im positiven und negativen Amplitudenbereich (vgl. Ref.2.26: o.V., Deutscher Amateur-Radio-Club) und durch Beeinflussung frequenzbestimmender Bauteile in der Schaltung, z.B. einer Kapazitätsdiode, an die eine Wechselspannung in Form des zu übermittelnden Signals angelegt wird, wodurch sich die Frequenz des Schwingkreises ändert (vgl. Ref.2.27: Maurer, Funkservice).

Da das Verfahren der Amplitudenmodulation das einfacher umsetzbare und historisch ältere Verfahren ist, werden Informationen seit den Anfängen des Radios über Lang-, Mittel- und

Kurzwellen per Amplitudenmodulation der Trägerwelle (vgl. Ref.2.28: o.V., wabweb), also mit Frequenzen im Kilohertz- bis unteren Megahertz-Bereich übertragen (siehe Abb. 5, S. 20). Die Vorteile dieser Übertragungsweise liegen in der einfachen Modulierung und Demodulierung des Signals (vgl. Ref.2.26: o.V., Deutscher Amateur-Radio-Club) sowie der Eigenschaft von Kurzwellen, bei Auftreffen auf die Ionosphäre der Erde gut reflektiert werden zu können, weshalb eine weltweite Übertragung möglich ist (vgl. Ref.2.29: o.V., Hobbyfunk). Zudem benötigen AM-Wellen, anders als FM-Wellen, zum Übermitteln von Informationen nur einen geringen Frequenzbereich, da sich ihre Frequenz nicht ändert, um eine Interferenz mit anderen Signalen zu vermeiden. Ein Nachteil ist jedoch, dass amplitudenmodulierte Signale störanfälliger gegenüber Einflüssen wie Blitze sind, bei denen elektromagnetische Wellen entstehen, die durch Interferenz die Signale der AM-Welle beeinflussen können (vgl. Ref.2.26: o.V., Deutscher Amateur-Radio-Club). FM-Signale für Radios werden weltweit im Frequenzbereich um 100 MHz im UKW-Bereich gesendet, dem VHF-Bereich (Very High Frequency), meist 87,5-108 MHz (vgl. Ref.2.30: o.V., SRG). Sie liefern eine bessere Empfangsqualität, da sie weniger störanfällig sind und größere Bandbreiten nutzen können (vgl. Ref.2.26: o.V., Deutscher Amateur-Radio-Club). Ihre geringe Reichweite ist jedoch dadurch bedingt, dass sie von der Ionosphäre kaum reflektiert werden (vgl. Ref.2.29: o.V., Hobbyfunk), weshalb man bei der Grenze des Empfangsbereichs auch vom sogenannten Radiohorizont spricht. Er ist ca. 15% weiter entfernt als der optische Horizont, da Radiowellen von Schichten der Erdatmosphäre zur Erde hin gebrochen werden, wobei die genaue Entfernung von der Höhe der Antenne abhängig ist (vgl. Ref.2.31: o.V., Universal-Lexikon).

Um einen möglichst großen Empfangsbereich zu realisieren, werden Kurz- und Mittelwellen als Boden- und Raumwellen vom Sendedipol abgestrahlt. Sie sind dabei entweder in Richtung der Atmosphäre gerichtet und breiten sich geradlinig als Raumwelle aus, um von der Ionosphäre reflektiert zu werden, oder folgen der Erdoberfläche als Bodenwellen, die jedoch von Hindernissen beeinflusst und gedämpft werden. Bei FM-Wellen der UKW-Frequenzen sowie bei Langwellen wird nur die Ausbreitung per Bodenwelle genutzt, da eine Reflexion an der Ionosphäre nicht möglich ist (vgl. Ref.2.29: o.V., Hobbyfunk). Die Übertragung von Raumwellen ist sowohl von der Jahreszeit als auch von der Tageszeit abhängig. Besonders bei Mittelwellen schwankt dabei die Empfangsreichweite, die in der Nacht und im Winter besser ist als im Sommer und tagsüber, da die Sonne und ihre Aktivität das Reflexionsvermögen der Ionosphäre beeinflussen (vgl. Ref.2.32: o.V., wabweb).

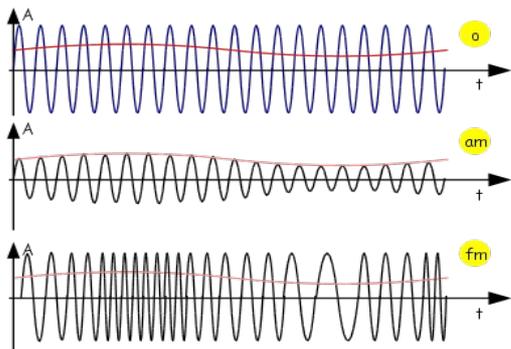


Abb. 6: Modulationsverfahren
(Ref.3.3: roro.muc.kobis)

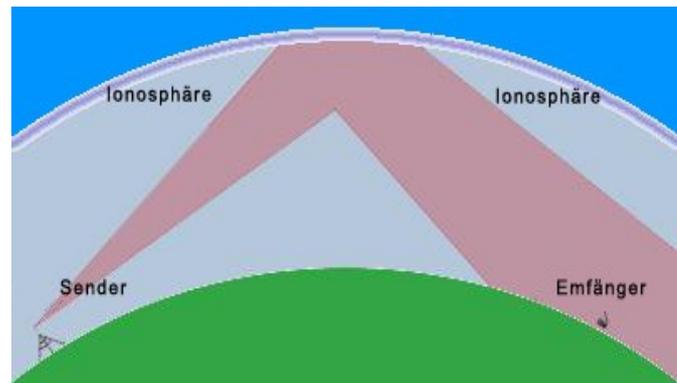


Abb. 7: Reflexion von Raumwellen an der Ionosphäre
(nach Ref.3.4: Funkfernsteuerungsindustrie)

Das Prinzip des Sendens und Empfangens von frequenz- und amplitudenmodulierten Schwingungen als Welle ist ähnlich. In einem Mischkreis werden Nieder- und Hochfrequenzschwingung zu einer modulierten Schwingung verknüpft, anschließend mit Hilfe eines Verstärkers intensiviert und über einen Schwingkreis mit Spule als Strom in die Antenne, den Sendedipol, induziert, von dem das Signal als Hertzsche Welle abgestrahlt wird. Bei gleicher Eigenfrequenz von Schwingkreis und Sendedipol tritt Resonanz auf, wodurch die Abstrahlung verbessert und besonders im Fall der Amplitudenmodulation auch das Signal verstärkt werden kann. Für das Empfangen wird eine ähnliche Schaltung verwendet: Das Signal wird von einer Antenne als Empfangsdipol aufgenommen und von einem Schwingkreis auf einen Demodulator und schließlich an einen Verstärker und Lautsprecher übermittelt, sodass die ursprüngliche Niederfrequenzschwingung hörbar gemacht werden kann (vgl. Ref.1.4: Prof. Hoche et al., 2011, S. 259f).

Im Vergleich zu diesen analogen Sendemethoden bieten Digitalradios gewisse Vorteile. Hier wird das Signal nicht permanent empfangen, sondern zeitdiskret (vgl. Ref.2.33: o.V., ITWissen), wodurch kurzzeitige Störungen weniger Einfluss auf die Empfangsqualität haben und der Frequenzabstand zwischen gleichzeitig sendenden Programmen auch dank neuer Modulationsverfahren verkleinert werden kann, mit denen gleichzeitig mehr Informationen übermittelt werden können. Das Signal wird auf Frequenzen im Megahertz- und unteren Gigahertz-Bereich gesendet, z.B. im sogenannten VHF-Band III (siehe Abb. 5, S. 20), wo der Übertragungsstandard DAB, Digital Audio Broadcasting, läuft. Die Übertragung kann sowohl terrestrisch erfolgen als auch über Satelliten, z.B. auf dem sogenannten L-Band im Bereich um 1,45 GHz (vgl. Ref.2.34 Poole, Radio-Electronics). Mittlerweile gibt es bereits Nachfolgeverfahren, wie DAB+ und DRM (vgl. Ref.2.35: o.V., Rettet unsere Radios), doch ist Digitalradio kaum etabliert.

4.4 Fernsehen

Auch für die Übertragung von Fernsehprogrammen werden Hertzische Wellen verwendet. Beim Empfang per Satelliten werden Radiowellen im Frequenzbereich um 12 GHz genutzt. Für den Empfang von Satellitenfernsehen in Deutschland sorgt der geostationäre Satellit Astra 1 auf einer Position von 19,2° östlicher Breite über dem Äquator. Terrestrisch können Programme z.B. über DVB-T, "Digital Video Broadcasting - Terrestrisch", übertragen werden, bei deren Empfang eine Zimmerantenne ausreicht und keine Satellitenschüssel mit LNB notwendig ist. DVB-T wird im VHF-Band III sowie im UHF-Band IV und V gesendet, bei denen die Sendefrequenzen im Megahertz-Bereich liegen (siehe Abb. 5, S. 20) (vgl. Ref.2.36: Grages, Laubach-Werra). Die parallele Übertragung von Bild- und Tonsignalen erforderte neue Modulationsverfahren, die mehr Informationen kodieren. Ein Beispiel ist die Quadratur-Amplituden-Modulation, QAM, bei der das Verfahren der Amplitudenmodulation mit der Phasenmodulation (Phasenverschiebung der Trägerschwingung) verknüpft wird (vgl. Ref.2.37: o.V., Elektronik Kompendium). Weltweit wird der terrestrische analoge Fernsehempfang derzeit vom digitalen ersetzt (vgl. Ref.2.39: o.V., Wikipedia), da, wie beim Radioempfang, so mehr Sender auf engeren Frequenzbereichen übertragen können. Zwar wird jedes kabellos übertragene digitale Signal als zeitkontinuierliche Welle gesendet, doch erfolgt beim Empfangen eine Umwandlung. Dabei spricht man von einer Abtastung des Signals, bei der nach einer definierten Zeit der Amplitudenwert gemessen wird. Nur dieser gemessene Wert wird dann als digitales, zeitdiskretes Signal empfangen (vgl. Ref.2.38: Prof. Weinzierl, Technische Universität Berlin).

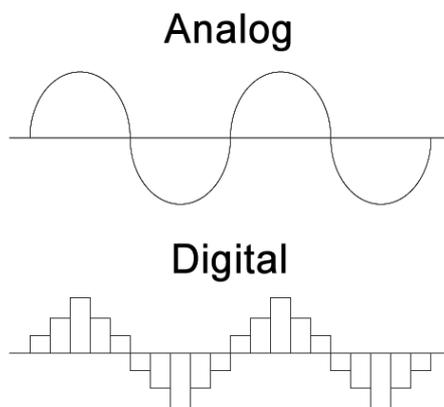


Abb. 8: Analoges und digitales Signal (nach Ref.3.5: coreypadveen)

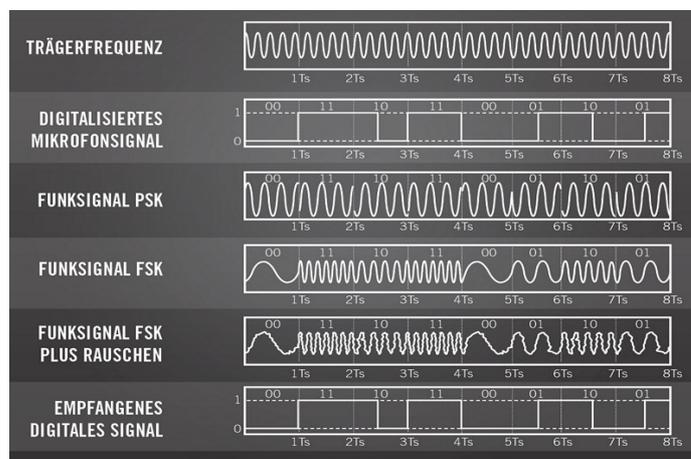


Abb. 9: Modulationsweisen von Signalen [Frequenzumtastung FSK (vgl. FM) und Phasenmodulation PSK] (Ref.3.6: shuredeutschland)

4.5 Radar

Das Radarverfahren ist ein Verfahren zur Ortung von metallischen Objekten. Bereits 1904 entwickelte der deutsche Erfinder Christian Hülsmeyer (1881-1957) in Düsseldorf ein Verfahren, um mit elektromagnetischen Wellen die Position von Objekten bestimmen zu können. Er nannte seine Anlage "Telemobiloskop" (vgl. Ref.2.40: Wießner, Deutsche Biographie). Erst mit Beginn des Zweiten Weltkrieges wurde man auf Hülsmeyers Technik aufmerksam und die Alliierten begannen das Verfahren weiterzuentwickeln und zu nutzen (vgl. Ref.2.41: o.V., Fraunhofer-Institut [...]). Als Akronym wurde das Wort "Radar" gebildet, kurz für "Radio Detecting and Ranging" (Radioortung und -entfernungsbestimmung) .

Ein Radargerät fungiert als Sender und Empfänger elektromagnetischer Wellen. Sie werden in kurzen Impulsen abgestrahlt, an metallischen Oberflächen reflektiert und gelangen so zum Radargerät zurück (vgl. Ref.2.42: Wolff, Radartutorial). Ähnlich dem Prinzip des Sonars lässt sich mit dem Radargerät bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen die genaue Position und Entfernung des Objekts bestimmen, an dem sie reflektiert wurden. Mit modernen Radargeräten lässt sich auch die Form und durch Zusammentragen mehrerer Messungen die Geschwindigkeit des Objekts abschätzen. Durch den Doppler-Effekt kommt es in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des georteten Objekts zu einer Abweichung der Frequenz des Echosignals (Sekundärsignal) vom ursprünglich gesendeten Primärsignal, woraus man dann die Geschwindigkeit des Objekts ermittelt (vgl. Ref.2.43 Weihard, FernUniversität Hagen). Das reflektierte Echosignal, das vom Radargerät empfangen wird, heißt auch "Backscatter" (vgl. Ref.2.42: Wolff, Radartutorial). In der Tarnkappentechnik wird vor allem für militärische Zwecke versucht, Objekte vor dem Radar zu verbergen, was sowohl durch die Form von Objekten, besonders durch Verzicht auf runde Oberflächenstrukturen und Ablenkung der Strahlung durch gerade Flächen, als auch durch das Anbringen strahlungsabsorbierender Materialien, beispielsweise bestimmter Harze, geschehen kann (vgl. Ref.2.44: o.V., Was ist Was). Die Frequenzen elektromagnetischer Wellen, die von Radargeräten genutzt werden, liegen im unteren Gigahertz-Bereich mit Wellenlängen von wenigen Dezimetern (siehe Abb. 5, S. 20). Dieser Frequenzbereich bildet damit den Übergangsbereich zwischen Radiowellen und den hochfrequenten Mikrowellen (vgl. Ref.1.4: Prof. Hoche et al., 2011, S. 261).

Alltägliche Anwendung findet dieses Prinzip in Radarfallen zur Geschwindigkeitskontrolle. Sie

nutzen ebenfalls den Dopplereffekt zur Geschwindigkeitsbestimmung der vorbeifahrenden Autos und lösen bei Überschreiten der vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit aus. Die Störanfälligkeit dieser Systeme ist jedoch sehr hoch, da sie in einem bestimmten Winkel zur Fahrbahn aufgestellt werden müssen und auch Objekte in der Umgebung durch Reflexion des Signals Fehlmessungen auslösen können. Heute werden diese Systeme zunehmend durch modernere Verfahren ersetzt (vgl. Ref.2.45: Pander, SpiegelOnline).

4.6 GPS

GPS steht für "Global Positioning System" und bezeichnet ein modernes, satellitengestütztes Ortungs- und Navigationsverfahren. Das System wurde vom US-Verteidigungsministerium entwickelt, 1995 offiziell in Betrieb genommen und später auch für die zivile Nutzung freigegeben. Die Erde wird dabei von durchschnittlich 24 aktiven Satelliten in einer Höhe von ungefähr 20.000 km umkreist (nicht geostationär). Zu jedem Empfangsgerät haben ca. 4 Satelliten Kontakt, die ihre exakte Position mit Uhrzeit übermitteln. Vom Empfänger kann dann daraus die Entfernung zu den Satelliten bestimmt und durch Auswertung der verschiedenen Signale die eigene Position ermittelt werden, wozu Signale von mindestens 3 Satelliten erforderlich sind. Durch Erweiterungssysteme wie das europäische EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), die unter anderem Korrektursignale senden, konnte die Genauigkeit des GPS von 10-20 m auf 1-3 m gesteigert werden (vgl. Ref.2.46: o.V. MagicMaps). Für GPS werden Hertzische Wellen mit Frequenzen um 1,5 GHz des sogenannten L-Bandes genutzt. Störungen des Empfangs von GPS-Signalen können durch Reflexion an Oberflächen, sodass der Empfänger mehrere leicht zeitversetzte Signale eines Satelliten erhält (Signal Multipath) (vgl. Ref.2.47: o.V. Garmin), durch Abschirmung, z.B. in Unterführungen, oder durch Ungenauigkeiten in der Zeitmessung bei Empfänger oder Satellit, da die Signale nur ca. 0,07 Sekunden unterwegs sind, hervorgerufen werden (vgl. Ref.2.46: o.V. MagicMaps). Bis zum Jahr 2000 sendete die US-Armee zusätzlich Störsignale (Selective Availability), um den zivil genutzten Frequenzbereich zu beeinflussen und die Bestimmungsgenauigkeit zu senken (vgl. Ref.2.47: o.V. Garmin).

4.7 Beispiele für weitere Anwendungen

Elektromagnetische Wellen kommen in vielen Bereichen der Technik und des alltäglichen Lebens vor. So nutzt auch das WLAN Hertz'sche Wellen zur Signalübermittlung in drei Frequenzbereichen um 2, 5 und 60 GHz (vgl. Ref.2.48: o.V., Elektronik Kompendium). Das Mobilfunknetz verwendet Wellen mit Frequenzen im Bereich von ca. 800 bis 2600 MHz für Telefon und Internet (vgl. Ref.2.49: o.V., Informationszentrum Mobilfunk). Warensicherungssysteme in Kaufhäusern verwenden ebenfalls elektromagnetische Wellen, indem beispielsweise im Radio-Resonanz-Verfahren das Etikett einen Schwingkreis bildet, der durch Resonanz seiner Eigenfrequenz und der ausgesendeten Welle von Detektoren am Ausgang deren Signal beeinflusst, was einen Alarm auslöst. Die Frequenz dieser Wellen liegt im Kurzwellenbereich, was sie auch sehr störanfällig gegenüber anderen Radioquellen macht (Ref.2.50: o.V. Wikipedia).



Abb. 11: Warensicherungsetikett mit Spule und Kondensator (Ref.3.7: Wikipedia)

4.8 Einflüsse nicht ionisierender Strahlung auf den Menschen

Das Spektrum elektromagnetischer Wellen lässt sich in die Bereiche der ionisierenden und nicht ionisierenden Strahlung unterteilen. Zu der nicht ionisierenden Strahlung (NIR - Non Ionizing Radiation) zählen die Wellen der unteren Frequenzbereiche, wobei die Grenze im Bereich der UV-Strahlung liegt, also oberhalb der Frequenzen des optisch sichtbaren Lichts. Die Energie der nicht ionisierenden Strahlung reicht nicht aus, um Atome zu ionisieren, da die Energie dieser Wellen mit großen Wellenlängen eher klein ist. Die Folgen dieser Strahlung beschränken sich fast ausschließlich auf die Wärme, die bei der Absorption dieser Wellen freigesetzt wird, da sie Moleküle zum Schwingen anregen kann. Dieser Effekt wird zum Beispiel im Mikrowellenherd (f ca. 2,5 GHz) verwendet. Für die Absorption gilt ein Grenzwert von 0,08 W pro Kilogramm Körpergewicht, wobei bis zu einer Schwelle von 2 W/kg, was zu einer Erhöhung der Körpertemperatur um ca. 1°C führt, keine thermischen Einflüsse

gesundheitliche Auswirkungen zeigen. Bei Überschreiten dieser Schwelle können z.B. das Nervensystem und der Stoffwechsel beeinflusst werden und ab einer Absorptionsrate über 4 W/kg treten irreversible Schädigungen auf. Der zulässige Grenzwert der Strahlung liegt damit um den Faktor 25 unterhalb der Schwelle, ab der Einflüsse festgestellt werden konnten.

Umstritten sind die athermischen Auswirkungen der nicht ionisierenden Strahlung. Untersucht werden dabei Zusammenhänge zwischen diesen Wellen und beispielsweise veränderten Enzymaktivitäten, Krebserkrankungen und neurophysiologischen Auswirkungen, wozu aber keine wissenschaftlich einheitlichen und gesicherten Resultate vorliegen. Dies ist auch der Grund, den Grenzwert für die Absorptionsrate für nicht ionisierende Strahlung deutlich unterhalb der Grenze zu definieren, ab der nachgewiesenermaßen Auswirkungen auf die Gesundheit auftraten (vgl. Ref.2.51: o.V., Landesverwaltung Bozen). Zusätzlich gelten verschiedene Grenzwerte für die zulässige Feldstärke von Bereichen mit elektromagnetischer Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz der Wellen (Ref.2.52: Wölfle, Elektrosmoginfo).

Die durch die Medien thematisierte Erkrankung von Radartechnikern des Militärs an Krebs ist jedoch vermutlich vor allem auf Röntgenstrahlung zurückzuführen und weniger auf die Radio- bzw. Mikrowellenstrahlung der Radargeräte, obwohl auch diese auf Grund der hohen Strahlungsintensität schädigend sein kann. Die Röntgenstrahlung entsteht in den Bauteilen zur Stromversorgung und den Modulatoren, die Mitte des 20. Jahrhundert unzureichend vor austretender Strahlung abgeschirmt wurden (vgl. Ref.2.53: Lehmacher, Strahlung-gratis).

5. Radiowellen in der Astrophysik - Die Radioastronomie

5.1 Kosmische Radioquellen

Die Radioastronomie ist eine relativ junge Wissenschaft, die ihre Anfänge in den 1930er Jahren hatte, als der amerikanische Radioingenieur Karl Guthe Jansky (1905-1950) nach Störsignalen für den Radioempfang suchte und ein periodisches Störsignal ermittelte, das die Dauer eines Sterntages hat (23h 56min) und nicht terrestrischen Ursprungs sein konnte. Später wurde die Quelle dafür im Sternbild Schütze lokalisiert, wobei sich in dieser Richtung das Zentrum der Milchstraße befindet. Janskys Erkenntnisse fanden allerdings zur damaligen Zeit wenig Beachtung. Erst in den 40er Jahren begannen dann immer mehr Astronomen selber im Radiobereich Messungen durchzuführen (vgl. Ref.2.54: Wiertzema, MPIfR). Mit Hilfe der Radioastronomie und der Beobachtung kosmischer Radiowellen kann in vielfacher Hinsicht ein neues Bild von unserem Universum geschaffen werden, da eine starke Radioquelle im Universum nicht immer auch in hohem Maße optisch sichtbares Licht aussendet und Radiostrahlung anders von Stoffen absorbiert wird als Licht, weshalb oft auch ein Blick tiefer ins Universum hinein möglich ist, wenn z.B. im optischen Beobachtungsbereich andere Himmelskörper die Objekte mit ihrer Helligkeit "überdecken" würden, die im Radiobereich "sichtbar" sind. Solche Objekte können z.B. Supernova-Überreste sein, wie sie in großer Zahl vom Effelsberger Radioteleskop erstmalig entdeckt wurden (nach Ref.5.1, MPIfR).

Im Universum gibt es verschiedene Radioquellen mit jeweils unterschiedlichen Ursachen für ihre Strahlung. Dabei kann man die thermische Radiostrahlung, die z.B. von einem Körper als Schwarzkörperstrahlung unter anderem im Bereich Hertzscher Wellen freigesetzt werden kann, von anderen Strahlungsquellen unterscheiden (vgl. Ref.2.55: Weber, MPIfR), wie beispielsweise der Bremsstrahlung, die beim Beschleunigen oder Abbremsen von Ladungsträgern auftritt, oder der Plasmastrahlung bei Bewegungen von Ladungsträgern im Plasma. Eine Form dieser nicht thermischen Bremsstrahlung ist auch die Synchrotronstrahlung, deren Name auf die Entdeckung in Teilchenbeschleunigern zurückgeht (vgl. Ref.2.56: o.V. Abenteuer Universum). Sie entsteht, wenn Teilchen, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, von Magnetfeldern beeinflusst werden, wobei durch die Lorentzkraft als Radialkraft eine Beschleunigung und Richtungsänderung der Bewegung herbeigeführt wird, bei der Energie über Photonen abgegeben werden und eine

elektromagnetische Welle im Radiobereich entstehen kann (vgl. Ref.2.55: Weber, MPIfR).

Sterne wie die Sonne strahlen neben sichtbarem Licht auch Radiowellen ab. Eine Ursache sind die Schwingungen von Ladungsträgern im Plasma, wobei die Frequenz der entstehenden Welle von der Schwingungsfrequenz der Teilchen abhängt und diese wiederum von der Teilchendichte. So lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Teilchendichte und der Frequenz der entstehenden elektromagnetischen Wellen feststellen, wonach Wellen höherer Frequenz, bzw. kleinerer Wellenlänge, näher am Sonnenkern entstehen, da die Teilchendichte der Sonnenschichten in Richtung des Kerns zunimmt (vgl. Ref.2.57: o.V., Cosmos Indirekt). Der Großteil der Radiostrahlung entsteht in der Sonnenkorona und Chromosphäre (vgl. Ref.2.58: o.V., Zentrale für Unterrichtsmedien), wobei in der Korona eine Brechung von Wellen aus tieferen Schichten in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge erfolgt. Die Sonnenaktivität beeinflusst zusätzlich die Strahlungsintensität, die zum Beispiel bei Flares oder hoher Fleckenaktivität nach dem 11-jährigen Schwabezyklus steigt (vgl. Ref.2.57: o.V., Cosmos Indirekt).

Radioquellen unseres Sonnensystems sind neben der Sonne auch einige Planeten, vor allem Jupiter. Dies liegt an Jupiters großem Magnetfeld, indem Elektronen "eingefangen" werden, weshalb es sich bei der Strahlung um Synchrotronstrahlung handelt. Alle Planeten unseres Sonnensystems, die ein Magnetfeld haben (Mars und Venus nicht), strahlen daher in unterschiedlichem Maße Radiostrahlung ab (vgl. Ref.2.59: Dambeck, Max-Planck-Gesellschaft). Ein wichtiger Faktor, der Jupiters Strahlung beeinflusst, ist sein Mond Io, der durch viele aktive Vulkane geladene Teilchen in Jupiters Magnetfeld schleudert. Die Strahlungsintensität Jupiters variiert größtenteils periodisch und hängt mit der Rotation von Jupiters Magnetosphäre und der Rotation Ios zusammen (vgl. Ref.2.60: Freistetter, ScienceBlogs).

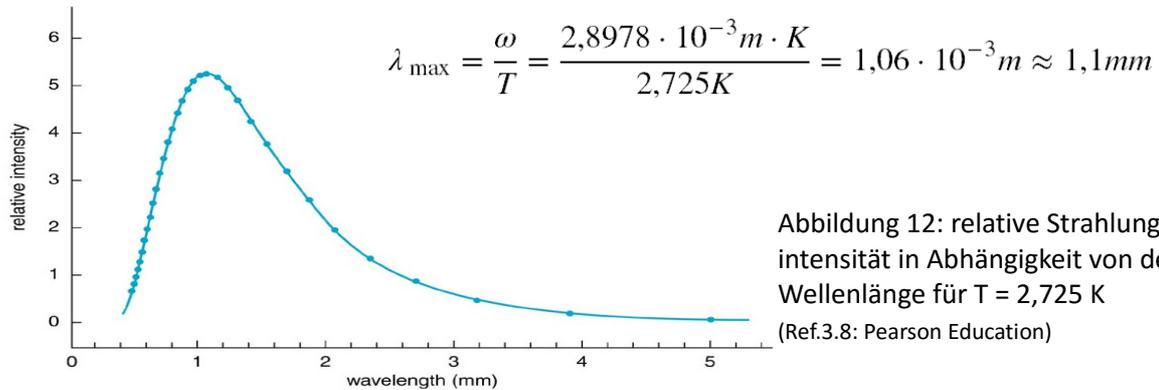
Außerhalb unseres Sonnensystems lassen sich beispielsweise Staub- und Gaswolken und deren Molekülzusammensetzung beobachten, wenn sich dahinter eine Radioquelle befindet, sodass ein stoffabhängiges Absorptionsspektrum entsteht, welches Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Wolken erlaubt (vgl. Ref.2.61: Menten, MPIfR). Hierbei spielt auch die 21 cm Wasserstofflinie eine wichtige Rolle, die einer für neutralen Wasserstoff charakteristischen Absorptionslinie einer Welle mit einer Wellenlänge von 21 cm und einer Frequenz von rund 1420 MHz im Radio-Frequenzbereich entspricht. Sie entsteht, wenn sich der Drehimpuls von Elektronen, ihr Spin, umkehrt, wobei 2 Zustände möglich sind, von denen einer ein wenig energiereicher ist als der andere (vgl. Ref.2.62: o.V., Uni Wuppertal).

Man spricht dabei von einem "Spin-Flip", der zum Beispiel thermische Ursachen haben kann (vgl. Ref.2.63: o.V., Chemie.de).

Starke bekannte Radioquellen sind Quasare, Quasi-Stellare Objekte, die Zentren von Galaxien sein können und in großem Maße Energie, z.B. in Form von Radiowellen, abgeben. Galaxien, die in hohem Maße Radiostrahlung aussenden, werden auch Radiogalaxien genannt. Neutronensterne bilden ebenfalls starke Radioquellen, die elektromagnetische Wellen eines breiten Spektrums in Form sehr kurzer periodischer Impulse abgeben, die auf die schnelle Rotation der Neutronensterne zurückzuführen sind (vgl. Ref.1.1: Bennett et al., 2010, S. 833ff und S. 941ff), die meist weniger als 5 Sekunden beträgt. Diese schnell rotierenden Sterne werden auch Pulsare genannt. Die hier entstehenden Wellen gehen vermutlich auch auf Synchrotronstrahlung zurück (Ref.2.64: o.V., Abenteuer Universum), die sich zudem auch bei Überresten von Supernovae finden lässt (nach Ref.5.1, MPIfR).

Große Bedeutung für die Radioastronomie hatte die Entdeckung der Kosmischen Hintergrundstrahlung im Wellenlängenbereich von Mikrowellen. Sie wird oft auch als CMB, Cosmic Microwave Background, bezeichnet. Bereits in den 1920er Jahren gab es theoretische Überlegungen von Physikern, die die Urknalltheorie unterstützten, ihre Existenz vermuteten und eine ungefähre Wellenlänge abschätzten, doch ging man davon aus, dass die Wellen von anderen Strahlungsquellen überlagert würden und daher nicht messbar seien. 1964 führten die amerikanischen Physiker Robert Wilson und Arno Penzias Messungen an einer alten Hornantenne durch, um Radioquellen im Universum zu untersuchen, doch trafen sie stets auf ein störendes Rauschen in den Messungen, das auch nach gründlicher Säuberung und Überprüfung der Antenne nicht verschwand und isotrop (in jeder Richtung gleich) ständig messbar war. Es handelte sich dabei um den ersten Nachweis der Kosmischen Hintergrundstrahlung, wofür die Physiker 1978 den Nobelpreis erhielten. Bei der Strahlung handelt es sich um Photonen, die sich seit der Abkühlung des Universums unter 3000 Kelvin ca. 380.000 Jahre nach dem Urknall bewegen können, ohne ständig auf andere Ladungsträger zu stoßen, da sich in dieser Zeit die Atome gebildet haben, sodass das Universum "durchsichtig" wurde. Da sich seither das Universum weiter abgekühlt hat, ist die heute messbare Strahlung auf eine Temperatur von ca. 2,725 Kelvin zurückzuführen und ein Indiz für das Zutreffen der Urknalltheorie. Es handelt sich quasi um die Schwarzkörperstrahlung des Universums (vgl. Ref.1.1: Bennett et al., 2010, S. 1006ff). Die Wellenlänge mit einem Maximum an Strahlungsleistung wurde in verschiedenen Messungen, z.B. vom COBE-Satelliten ab 1989 (vgl. Ref.2.65: Reitz, MPIfR), im Bereich von 1-2 mm

bestimmt, was einer Frequenz von ca. 160 GHz entspricht (vgl. Ref.2.66: o.V., National Radio Astronomy Observatory). Nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz kann die Wellenlänge im Bereich der größten Strahlungsleistung auch näherungsweise rechnerisch ermittelt werden, wobei die Werte mit den gemessenen übereinstimmen:



5.2 Beobachtungsmöglichkeiten

Die irdische Beobachtung kosmischer elektromagnetischer Wellen ist durch die Eigenschaften der Atmosphäre begrenzt, die die Wellen zu großen Teilen reflektiert oder absorbiert. Es existieren dabei nur zwei größere "Beobachtungsfenster" für Wellenlängen von elektromagnetischen Wellen, die durch die Atmosphärenschichten gelangen können: das optische Fenster für Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts im Mikrometerbereich sowie das Radiofenster für Wellenlängen im Zentimeter- und Millimeterbereich von Radio- und Mikrowellen. Dies ist der Grund, warum zur Beobachtung von Objekten im Universum mit Hilfe anderer Wellen, zum Beispiel im Infrarot- oder Röntgenstrahlenbereich, Weltraumteleskope eingesetzt werden müssen und warum satellitengestützte Funkssysteme, beispielsweise für Satelliten-Fernsehen oder zur GPS-Navigation im Gigahertz-Frequenzbereich arbeiten (vgl. Ref.1.3: Prof. Hoche et al., 2013, S. 365). Wellen mit Wellenlängen unter 2mm werden von Luftmolekülen der Erdatmosphäre absorbiert und Wellen mit Wellenlängen über 10m werden an der Ionosphäre reflektiert (vgl. Ref.2.67: o.V., MPIfR).

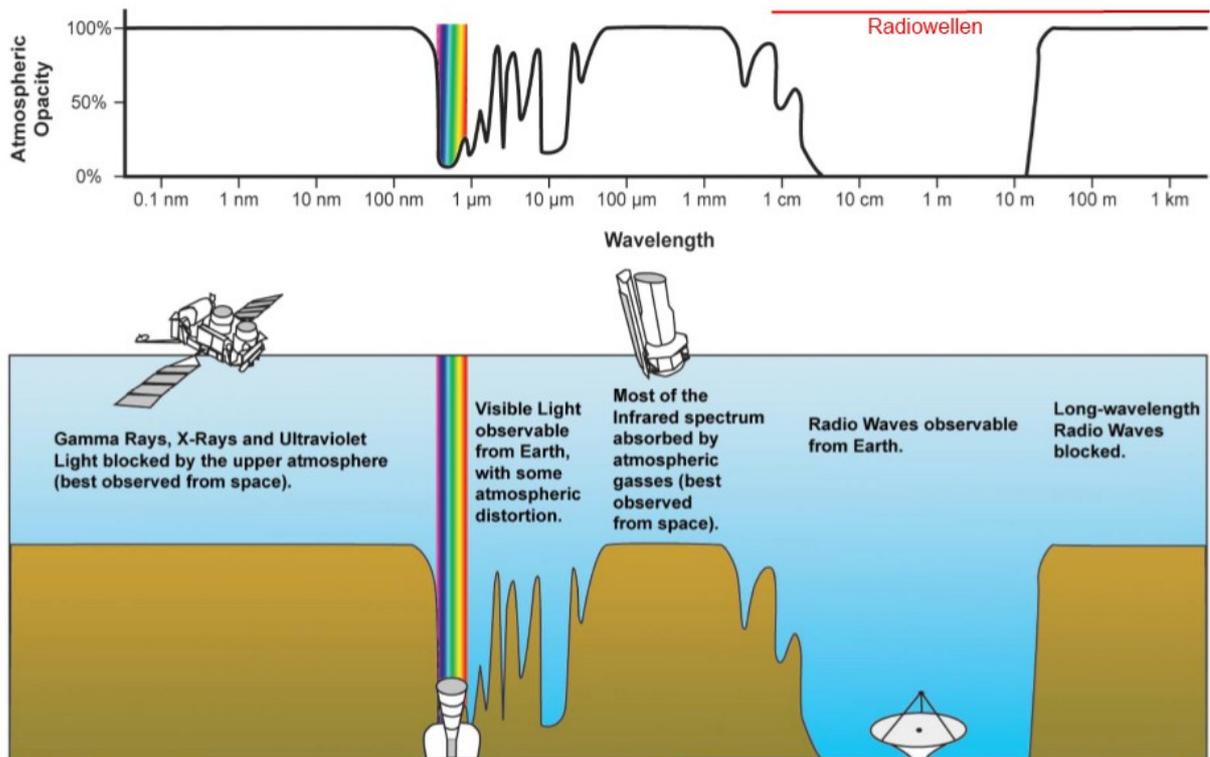


Abbildung 13: Grad der Absorption und Reflexion durch die Atmosphäre (Ref.3.9: MPA)

Doch auch für Beobachtungen von Wellen im Radiobereich ist die Erde kein idealer Beobachtungsstandort, da die Messungen stark von irdischen Radioquellen störend beeinflusst werden können (vgl. Ref.1.1: Bennett et al., 2010, S. 266f). Für die Zwecke der Radioastronomie wurden daher von der Internationalen Fernmeldeunion viele sehr schmale Frequenzbereiche, vor allem im Gigahertz-Bereich, zur Verfügung gestellt, sodass Beobachtungen von Wellen unterschiedlicher Frequenzen möglich sind (vgl. Ref.2.68: o.V.; Wikipedia).

Radioteleskope liefern, anders als optische Teleskope, nicht direkt "Bilder", sondern jede Messung nur ein einzelnes Signal. Dieses muss durch mehrere Messungen und Selektion von Strahlung der Umgebung dann zu einem "Bild" ergänzt und übersetzt werden (nach Ref.5.1, MPIfR). Hinzu kommt, dass die Winkelauflösung, die den kleinsten Winkel angibt, unter dem Objekte getrennt wahrgenommen werden können, von der Wellenlänge der Strahlung sowie dem Durchmesser des Teleskops, mit dem beobachtet wird, abhängt und mit größerer Wellenlänge steigt, weshalb Radioteleskope für das gleiche Auflösungsvermögen wie ein optisches Teleskop deutlich größere Durchmesser besitzen müssen. Bei Interferometern werden die Daten mehrerer einzelner Teleskope verknüpft, um ein möglichst gutes Auflösungsvermögen trotz geringer Durchmesser der einzelnen Teleskope zu erhalten (vgl.

Ref.1.1: Bennett et al., 2010, S. 267ff). Eines der modernsten Interferometer steht in der Atacama Wüste Chiles: das Atacama Large Millimeter and Submillimeter Array, kurz "ALMA", das aus 66 Antennen mit je 12 und 7 Metern Durchmesser besteht und eine internationale Zusammenarbeit vieler Forschungsinstitute ist, darunter die Europäische Südsternwarte ESO (vgl. Ref.2.69: o.V., ALMA Observatory). Ein anderes modernes Interferometer befindet sich im US-Bundesstaat New Mexico. Das Very Large Array (VLA) besteht aus 27 Einzelteleskopen mit einem Durchmesser von je 25 Metern, die Y-förmig angeordnet sind (vgl. Ref.2.70: o.V., National Radio Astronomy Observatory).

Der Aufbau von Radioteleskopen ist, egal ob als einzelnes Teleskop oder Interferometer, stets ähnlich. Es wird ein Parabolspiegel, meist aus Aluminium, verwendet, der die Radiowellen im Brennpunkt fokussiert oder bei besonders großen Teleskopen auf einen Primärfokus reflektiert, von dem aus sie erneut gebündelt an einen Empfänger (Sekundärfokus) reflektiert werden. Die Signale können dann durch Computer digitalisiert, gefiltert und zu "Bildern" zusammengetragen werden (nach Ref.5.1, MPIfR).

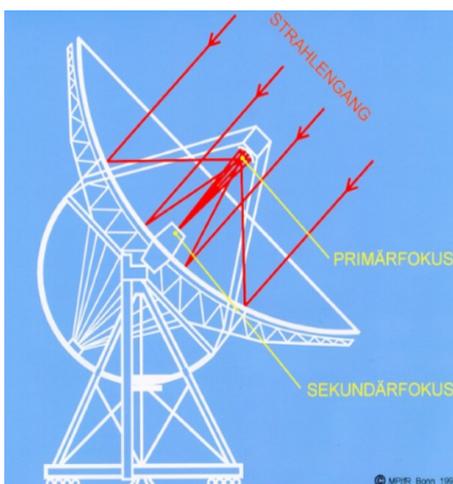


Abb. 14: Aufbau eines Radioteleskops am Beispiel des Radioteleskops von Effelsberg (Ref.3.9: MPA)

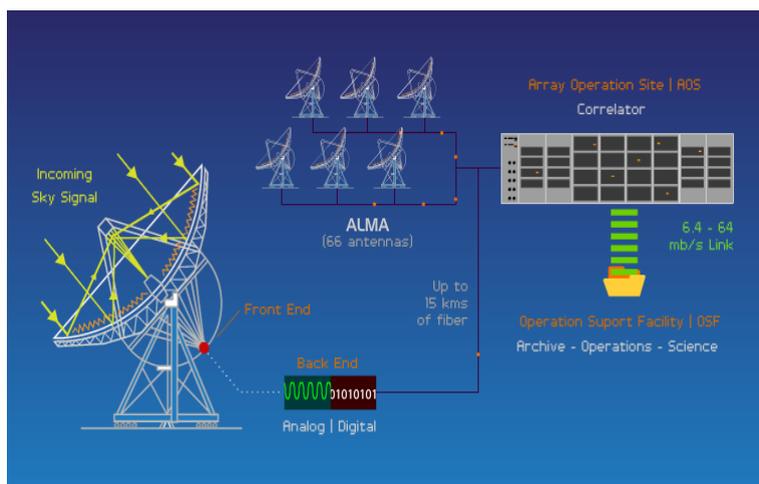


Abb. 15: Aufbau eines Interferometers am Beispiel des ALMA (nach Ref.2.69: ALMA Observatory)

5.3 Exkursion zum Radioteleskop Effelsberg

Das Radioteleskop von Effelsberg (Bad Münstereifel) ist das derzeit zweitgrößte bewegliche Radioteleskop der Erde mit einem Durchmesser des Parabolspiegels von 100 Metern. Es wird vom Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) betreut und ist in den Sommermonaten von April bis Oktober auch für Besucher zugänglich. Außerhalb dieser regulären Besucherzeiten wurde mir ermöglicht, am 29.01.2016 an einer Exkursion der Studenten der Hochfrequenztechnik der TU Dortmund unter der Leitung von Herrn Dr. Junkes, dem Leiter für Öffentlichkeitsarbeit des Bonner Max-Planck-Instituts, teilzunehmen, um die erhaltenen Eindrücke und Informationen für diese Arbeit verwenden zu können.



Abb. 16 und 17: Das 100m-Radioteleskop von Effelsberg

Das Teleskop liegt in einem Tal der ländlichen und gebirgigen Eifel, um es bestmöglich von "Strahlungsmog" abschirmen zu können, auch wenn offiziell der Radioastronomie mehrere Frequenzbänder zugeschrieben sind. Dies ist auch der Grund, warum Besucher bereits auf dem Parkplatz, der ca. 800 m vom eigentlichen Reflektor entfernt liegt, ihre elektronischen Geräte aus- oder in den Flugzeug-Modus schalten müssen, da insbesondere Geräte auf Netzsuche Störungen der Messungen hervorrufen können.

1972 wurde nach knapp vier Jahren Bauzeit der reguläre Messbetrieb am Radioteleskop Effelsberg aufgenommen. Es ist seither besonders aufgrund seiner Größe und damit verbundenen vergleichsweise hohen Winkelauflösung eine Anlaufstelle für Radioastronomen weltweit. Gefördert wurde der Bau des seinerzeit 34 Mio DM teuren Teleskops von der Volkswagen-Stiftung. Knapp 30 Jahre lang war es bis zur Fertigstellung des Green-Bank-

Teleskops in den USA im Jahr 2000 mit durchschnittlich 105 Metern Durchmesser, dessen 91 m (100 Yard) großer Vorgänger 1988 zusammenbrach, das größte Radioteleskop der Erde. Die Konstruktion des 100 m großen Reflektors besteht aus insgesamt 2352 einzelnen Paneelen und hat eine Oberflächengröße von ca. 9090 m². Die äußeren Paneele besitzen 6 mm große Löcher, sodass sie winddurchlässig sind, was einerseits den wirkenden Winddruck vermindert, andererseits diesen äußeren Bereich für Messungen von Wellen mit kleinen Wellenlängen nicht mehr vollständig nutzbar macht. Das gesamte Teleskop wiegt ca. 3200 Tonnen. Es ist möglich, in nur 12 Minuten den Spiegel um 360° seitlich und in ca. 6 Minuten um rund 90° in der Höhe zu verändern, wobei er insgesamt durch 16 Motoren seitlich um bis zu 480° und in der Höhe von 7,5°-94° Elevation drehbar ist. Zusätzlich wird die Erdrotation im Fahrprogramm einbezogen, sodass sich das Teleskop automatisch entgegen der Erde dreht, um ein Objekt längerfristig beobachten zu können. Da das 100m-Teleskop seit der Fertigstellung durch Umbauten stetig auf dem neuesten Stand der Technik gehalten wurde, zählt es auch heute noch zu den modernsten Radioteleskopen weltweit (nach Ref.5.1, MPIfR).

Bei der Konstruktion des Teleskops versuchte man Veränderungen in der Krümmung des Parabolspiegels aufgrund von Gravitationskräften durch dessen Eigengewicht zu minimieren. Anders als bei anderen Radioteleskopen, die damals im Einsatz waren, wurden dafür die Stützpunkte am Spiegel, die diesen mit dem Gestell verbinden, im Abstand von 63% des Spiegeldurchmessers, also 63 Metern gewählt, wodurch ein Verbiegen minimal ausfällt. Das Verfahren, die Stützpunkte so zu wählen, dass sie die wirkenden Kräfte in allen Ausrichtungspositionen des Teleskops bestmöglich umlenken, wird als Homologie bezeichnet und wurde im Effelsberger Teleskop perfekt angewendet (Ref.5.2: Kärcher, 2011, S. 42-52). Die Toleranz für Verformungen liegt im Bereich von unter einem Millimeter. Als Faustregel für exakte Messungen gilt dabei eine maximale Toleranz von einem λ -Zehntel, was bei einer minimal messbaren Wellenlänge von 3,5 mm (f ca. 90 GHz) 3,5/10 mm entspräche, doch so nicht eingehalten werden kann. Zusätzlich sind dafür die Paneele des Subreflektors am Primärfokus steuerbar, sodass rechnerisch die Krümmung der Spiegelpaneelle ermittelt und durch Veränderungen am Subreflektor korrigiert werden kann, da die Krümmungen auch vom Neigungswinkel, der Elevation des Teleskops, abhängig sind. Eine weitere bauliche Herausforderung stellen Temperaturunterschiede dar, die zu materialabhängigen Deformationen in der Konstruktion führen können. Ursprünglich waren die untersten Streben des Schienenkranzes, auf dem das Teleskop die Azimut-Ausrichtung durch Rotieren um die eigene Achse ändern kann, aus optischen Gründen blau gefärbt, doch absorbierten

sie aufgrund der dunkleren Färbung mehr Wärmestrahlung, weshalb sie später ebenfalls weiß gestrichen wurden. Eine Besonderheit der verwendeten weißen Farbe ist neben deren gutem Reflexionsvermögen auch deren selbstreinigende Eigenschaft, da sie bei Regen teilweise gelöst wird und so Schmutzpartikel abtransportiert, weshalb allerdings auch jährlich in den Sommermonaten nachgestrichen werden muss.

Anders als in der optischen Astronomie ist man in der Radioastronomie nicht auf die Nachtzeit angewiesen, um Objekte im Universum zu beobachten, sondern kann 24 h am Tag Messungen durchführen. Dabei ist das Radioteleskop für verschiedene Messungen unterschiedlicher Art einsetzbar: *Flussmessungen*, die die spektrale Flussdichte (als Leistung in Abhängigkeit von Frequenz und Fläche in Jansky) als Signalstärke von Wellen sowie deren Polarisation verfolgen, *Kontinuum-Messungen*, bei denen in einem Gebiet Messungen einer Wellenlänge, beispielsweise für Kartierungen durchgeführt werden, *Spektroskopie-Beobachtungen*, um mit Spektralanalysen Informationen über vorhandene Atome und Moleküle zu erhalten, *interferometrische Messungen* sowie *Pulsar-Messungen* über einen sehr kurzen Zeitraum hinweg, um insbesondere die Strahlung von Pulsaren mit extrem kurzen Rotationszeiten verfolgen und deren Struktur erforschen zu können.

Aktuell werden interferometrische Messungen mit anderen Radioteleskopen weltweit ("Very Long Baseline Interferometry", VLBI) und dem Weltraumteleskop des russischen RadioAstron-Satelliten durchgeführt, der sich auf elliptischen Bahnen um die Erde mit maximal "Mondentfernung" bewegt. Dieses Interferometer simuliert ein Radioteleskop von ca. 30-facher Erdgröße. Kürzlich wurde eine solche Messung der Radiowellen der 900 Millionen Lichtjahre entfernten Radiogalaxie "BL Lacertae" durchgeführt, aus deren Zentrum Energie in Jets, u.a. in Form von Radiowellen, abgegeben wird. Durch diese interferometrischen Messungen sind besonders gute Auflösungsvermögen realisierbar, die im Bereich von ca. 24 Mikro-Winkelsekunden liegen, was im Vergleich zum Auge mit einem Auflösungsvermögen von ca. einer Winkelminute einer Verbesserung um den Faktor 3 Millionen entspricht. Dem gegenüber steht das Auflösungsvermögen des Radioteleskops Effelsberg alleine von ca. 4 Winkelminuten bei rund 11 cm Wellenlänge, was um den Faktor 4 schlechter ist, als das menschliche Auge im Bereich des sichtbaren Lichts erreicht.

Die Zeiten für verschiedene Messungen sind im Beobachtungsplan auf der Seite des MPIfR einsehbar. Unterschiedliche Farben stellen verschiedene Messmethoden dar, die Zahlen innerhalb der Zeitbalken stehen für verschiedene Projekte. Am Tag meines Besuches wurden gegen 13:00 Uhr spektroskopische Messungen durchgeführt.

DATUM	--- MEZ ---																								Frontend	Back-end				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			24			
DI 26.1.	87-14							W																		>--- Kalibration S14 --->	RAKS03 = 19-15	59-15	SFK	B.E.A
MI 27.1.	59-15	RAKS03 = 19-15		>--- 59-15 --->		RAKS03 = 19-15		W	P210-7																		>--- 30-14 --->	SFK	SFK, P210-7	A.E.B
DO 28.1.	RAKS03 = 19-15		RAKS03 = 19-15		RAKS03 = 19-15		RAKS03 = 19-15		W																		Test, Kal.	>--- 86-15 --->	SFK	E.B
FR 29.1.	86-15							12:15							Test, Kal.							>--- 86-15 --->	S14	B						
SA 30.1.	86-15							41-14							86-15							S14	B							
SO 31.1.	86-15							41-14							41-14							S14	B							
MO 1.2.	41-14							W	PFK P210-7 → PM1							41-14							P180	RP024a = 14-16	S14, PM1	B.E				
DI 2.2.	RP024a = 14-16			NMZ, Kalibration, Filler				eVLBI = 05-16																	PM1	E				
MI 3.2.	eVLBI = 05-16																	SFK	06-16							PM1, SFK	E.C			
DO 4.2.	> 99-15 ->	RAKS03 = 19-15		99-15	P210-7		56-15							SFK	06-16							P210-7	> 56-15	SFK, P210-7	A.E.C					
FR 5.2.	56-15							30-14 / 27-13							SFK								P210-7	C.B						
SA 6.2.	06-16							60-15 (SFK)							SFK								SFK	C						
SO 7.2.	06-16							P210-7							60-15 (21cm)							SFK, P210-7	C							
MO 8.2.	60-15 (21cm)							SFK	06-16							NMZ, Kalibration, Filler							P210-7	26-14	P210-7, SFK	C.A.B				
UT	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23					
LST	08:38							15:39							01:40							07:41								

© 1. Feb 2056-17

Abb. 18: Beobachtungsplan A für das Radioteleskop Effelsberg, 26.01.-08.02.2016 (nach Ref.3.10: MPIFR) grün: Spektroskopie-Beobachtungen, orange: Flussmessungen, gelb: Pulsar-Messungen, blau: VLBI-Messungen

Durch Einsetzen verschiedener Empfänger am Primär- oder Sekundärfokus des Radioteleskops sind Messungen in unterschiedlichen Frequenzbereichen möglich. Allgemein stehen dabei Empfänger für den Bereich der Radiowellen mit Frequenzen ab 300 MHz bis hin zu 90 GHz zur Verfügung, was dem Mikrowellenfrequenzbereich entspricht. Von besonders großem Nutzen sind Empfänger, die einen möglichst breiten Frequenzbereich abdecken, um verschiedene Messungen durchführen zu können, ohne den Empfänger austauschen zu müssen. Ein Beispiel dafür ist der UWB-Empfänger, der Ultra-Breitband-Empfänger (ultra-wideband), des Max-Planck-Instituts. Er deckt einen Frequenzbereich von 600 MHz bis 3 GHz kontinuierlich ab. Zudem können "Multiboxen" im Primärfokus verwendet werden, in denen sich bis zu 4 Empfänger einsetzen lassen, die vom Kontrollraum aus umgeschaltet werden können, was einen ständigen Aus- und Einbau verschiedener Empfänger erspart.

Zu den Faktoren, die den Messbetrieb störend beeinflussen, zählen neben der genannten Radiostrahlung irdischer Quellen vor allem ungünstige Witterungsbedingungen. Dies sind starker Schneefall, Hagel und Blitze, wobei der Spiegel nicht nach oben ausgerichtet sein darf, da die Last des Schnees sowie der Aufprall von Hagelkörnern oder der Einschlag von Blitzen in den Primärfokus den Spiegel und dessen empfindliche Messinstrumente beschädigen könnten. Zudem muss der Messbetrieb bei Windstärken ab 15 m/s eingestellt und der Parabolspiegel entweder mit der Rückseite zum Wind gedreht oder das Teleskop nach oben ausgerichtet werden, damit der Wind möglichst gut abgelenkt wird, um eine Verformung der Spiegelkonstruktion zu verhindern. Zur Zeit meines Besuches musste eine laufende

spektroskopische Messung von Radiostrahlung aus dem Sternbild Adler unterbrochen werden, da die Windstärke zunahm.



Abb. 19: Ausricht. bei starkem Wind



Abb. 20: Radio-Observatorium mit dem 100m-Teleskop

Da der Messbetrieb angehalten werden musste und nach Rücksprache mit den anwesenden Wissenschaftlern, durften wir kurz in den Kontrollraum, in dem die Messungen überwacht werden können.



Abb. 21: Kontrollraum des Radioteleskops



Abb. 22: Kontrollmonitor um 13:34 Uhr geplante Ausrichtung ins Sternbild Adler (Azimut: 210°, Höhe: 13°)

Bei kurzweiliger Radiostrahlung im unteren Zentimeter-Wellenlängenbereich spielt die Absorption durch Wasserdampf in der Atmosphäre eine wesentliche Rolle. Daher existiert regelmäßig ein doppelter Beobachtungsplan, wobei es für Beobachtungen bei besonders kurzer Wellenlänge sehr guter Wetterbedingungen mit geringer Bewölkung bedarf. Für noch kürzere Wellenlängen im Submillimeterbereich sind Standorte wie die Atacama-Wüste Chiles in über 5000 m Höhe erforderlich, wo z.B. das 12 Meter große APEX-Teleskop (Atacama Pathfinder Experiment) errichtet wurde, das eine Zusammenarbeit des Max-Planck-Instituts mit der ESO und schwedischen Forschern darstellt.

Zur exakten Kalibrierung des Parabolspiegels für Messungen kosmischer Radiostrahlung werden Eichquellen verwendet, üblicherweise Quasare als Zentren aktiver Galaxien, deren Position genau bekannt ist. Um die Ergebnisse möglichst unverfälscht zu erhalten, werden Messinstrumente evakuiert und auf wenige Kelvin gekühlt und so das Eigenrauschen des Empfängers minimiert, um eine höhere Empfindlichkeit für schwache Radiosignale zu erzielen. Eine Filterung der Messsignale findet erst nach Verstärkung statt, um keine Informationen zu verlieren. Zu den bedeutendsten Entdeckungen des Radioteleskops von Effelsberg zählte 2008 der damalige Rekord für die am weitesten entfernte Messung von Wasser mit Hilfe der Spektroskopie, dessen Signal ca. 11 Mrd Jahre unterwegs war. Dies war durch einen glücklichen Zufall möglich gewesen: Eine Galaxie im Vordergrund hatte das Signal der Radioquelle durch ihre Gravitation umgelenkt und auf der Erde wie im Brennpunkt einer Linse gebündelt, was zu einer Verstärkung des Signals führte ("Gravitationslinse"). Außerdem wurden mit Hilfe spektroskopischer Messungen in Effelsberg erstmals Ammoniakmoleküle in fremden Galaxien sowie Ameisensäure im Universum entdeckt. Bei weniger guten Wetterbedingungen werden oft langfristige Beobachtungsprogramme angesetzt ("Plan-B"), die sehr viel Messzeit erfordern, wie z.B. ausgedehnte Kartierungen des Himmels, in denen viele einzelne Messungen zu einer Karte zusammengesetzt werden. So waren beispielsweise für eine Karte des Supernova-Überrests Cassiopeia A bei 11 cm Wellenlänge, der stärksten Radioquelle neben der Sonne, rund 40 Stunden Messzeit erforderlich. Außerdem wird das Teleskop bei der Untersuchung von Weltraumschrott eingesetzt, wobei vom Fraunhofer-Institut in Wachtberg-Berkum aus Radiosignale gesendet werden, die an den Metallteilen im All reflektiert und vom Effelsberger Teleskop empfangen werden.

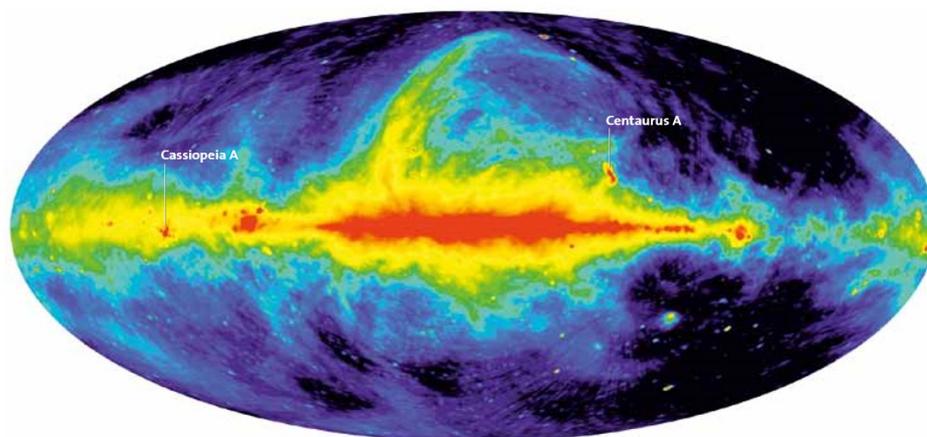


Abb. 23: Beispiel einer Kartierung des Himmels bei einer Wellenlänge von 73 cm mit der 12 Mio Lichtjahre entfernten Radiogalaxie Centaurus A und dem Supernova-Überrest Cassiopeia A unter Beteiligung des Radioteleskops Effelsberg bei der Kartierung des nördlichen Radiohimmels (nach Ref.5.2: Wielebinski et al., 2013, S. 42)

Zwischen 1981 und 1989 wurde eine Karte der Radiowellen des nördlichen Bereichs der Milchstraße bei 11 cm Wellenlänge in einem 10° breiten Band um deren Äquator erstellt, die aus 2,2 Millionen einzelnen Bildpunkten besteht, wobei unter anderem 42 vorher unbekannte Supernova-Überreste entdeckt wurden. Insgesamt wurden 20% aller damals bekannten Supernova-Überreste in der Milchstraße mit Hilfe des Effelsberger Radioteleskops entdeckt. Es werden aktuell auch Messungen durchgeführt, um Gravitationswellen zu erforschen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum bewegen und Abstände zwischen Objekten verändern, weshalb sie indirekt durch ihre Auswirkungen auf kosmische Objekte untersucht werden können. Im Rahmen des europäischen LOFAR-Projekts (Low Frequency Array) wurde am Effelsberger Radioteleskop 2007 ein Antennenfeld eingerichtet, um mit anderen Messstationen interferometrisch im Wellenlängenbereich von Meterwellen Messungen durchzuführen, z.B. für Strahlung von Elektronen in schwachen Magnetfeldern oder für stark rotverschobene Strahlung, doch erwies sich hier die ländliche Lage gelegentlich als Nachteil, da ein Bussard unter Verdacht steht, einzelne Antennen umgestürzt zu haben, da er ihre Spitze bereits als Landeplattform verwendete (nach Ref.5.1, MPIfR).



Abb. 24: LOFAR-Antennen auf dem Gelände des Radioteleskops Effelsberg



Abb. 25: Dr. N. Junkes, Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, mit dem Autor vor dem Radioteleskop Effelsberg

5.4 Eigenbau eines einfachen Radioteleskops zur Sonnenbeobachtung

5.4.1 Versuchsaufbau

Mit einem einfachen selbstgebautes Radioteleskop, im Internet oft "Itty Bitty Radio Telescope" genannt, das mit Hilfe einer Satellitenschüssel und LNB (Low Noise Block Converter) Radiowellen der Sonne im Frequenzbereich um 12 GHz empfangen kann, sollten eigene Messungen von Radiowellen vorgenommen werden. Die Ergebnisse sind ein Beweis für die Entstehung von Radiowellen in der Sonne, die allerdings nur relativ angezeigt werden können. Als Verarbeitungsgerät war ein Computer geplant. Die Signale des LNB sollten über einen TV-Stick digitalisiert und für den Computer auswertbar gemacht werden. Der TV-Stick benötigt dabei einen besonderen Chipsatz ("RTL2832" und "R820T") (vgl. Ref.2.71: Hamworth, Stargazing), damit nicht nur die mitgelieferten Programme digitalen Fernsehempfang verarbeiten können, sondern auch andere Programme den TV-Stick "steuern" und dessen Informationen auswerten können. Der LNB benötigt zudem eine Stromquelle, die mit Gleichspannung arbeitet, was normalerweise ein angeschlossener Receiver ist. Für diesen Versuch wurde ein Computernetzteil verwendet, das unter anderem einen 12 Volt Anschluss besitzt.

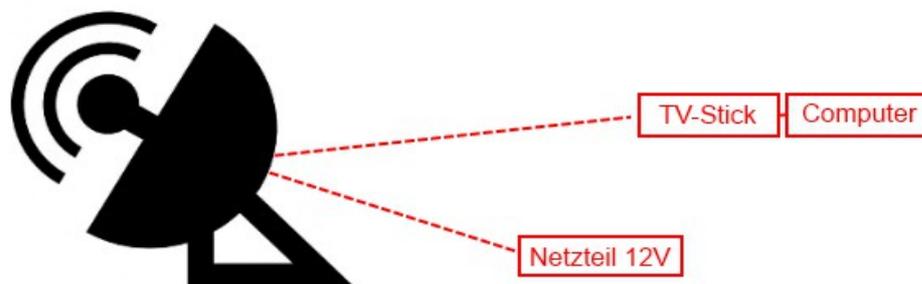


Abbildung 16: Skizze des geplanten Versuchsaufbaus
(Antennen-Icon nach Ref.3.11: freepik)

Die Satellitenschüssel hat einen Durchmesser von 62 cm und stammt von einem Recyclinghof in Halle. Erstaunlicherweise erwies sich sogar der LNB, der noch an der Schüssel befestigt war (Telestar Skyquad LNB), ein Quad-LNB zum Anschluss von bis zu vier Receivern, als funktionstüchtig. Ein moderner LNB übersetzt die Signale des Satelliten mit Frequenzen der Wellen um 12 GHz in Signale von Frequenzen um 1-2 GHz. Dies wird nötig, da Wellen großer Frequenzen nicht dämpfungsarm in Koaxialkabeln übermittelt werden können. Während früher alle Programme im Low-Band mit Frequenzen von 10,7-11,7 GHz analog gesendet und empfangen wurden, wurde mit der Umstellung auf digitalen Empfang ein weiteres

Frequenzband, das High-Band, für Satellitenfernsehen freigegeben für Wellen mit einer Frequenz von 11,7-12,75 GHz. Zusätzlich können Wellen horizontal oder vertikal polarisiert sein, was die "Anordnung" des elektrischen (und magnetischen) Feldes "innerhalb" der Welle beschreibt, wodurch insgesamt vier Schaltmöglichkeiten für moderne LNB aus der Kombination von High- und Low-Band mit den unterschiedlichen Polarisierungen der Wellen entstehen. Der LNB wird in seiner Ausrichtung durch die Höhe und "Art" der Spannung beeinflusst, die ihn erreicht. Bei 12 Volt Gleichspannung ist er auf das Low-Band für Wellen mit Frequenzen um 11,5 GHz ausgerichtet (vgl. Ref.2.72: Schneider, LNB-Test). Der verwendete LNB konnte nur Signale des Low-Bands empfangen, was vermutlich der Grund für die Entsorgung des funktionstüchtigen LNB war.

Die Sat-Schüssel habe ich mit einem Scharnier auf einem Holzbrett befestigt, an das vier um 360° drehbare Rollen montiert wurden. Am oberen Rahmen der Satellitenschüssel wurde eine Kordel befestigt, um den Neigungswinkel einstellen zu können und eine variable Ausrichtung auf verschiedene Höhen der Sonne über dem Horizont zu erreichen.

Für die Stromversorgung wurde ein Seasonic Computernetzteil mit einer Leistung von 200 Watt verwendet, das als Ersatzteil von einem defekten Computer vorhanden war. Da ein Netzteil nicht ohne Mainboard des Computers startet, an dem über den An-Aus-Schalter ein Startsignal ans Netzteil gegeben wird, musste dieses durch Anschluss des grünen Kabels vom Netzteil mit einem schwarzen Masse-Anschluss überbrückt werden und, weil es nicht ohne konstanten Verbraucher betrieben werden soll, wurde an einen roten +5V-Anschluss ein Keramik-Cement Widerstand von 10 Ohm angeschlossen und mit einem schwarzen Masse-Anschluss verbunden. Um das Netzteil mit dem LNB verbinden zu können, wurde ein Koaxialkabel halbiert und jeweils die Leiter in der Mitte mit einem gelben +12V-Anschluss des Netzteils und die geflochtenen Ummantelungen mit einem schwarzen Masse-Anschluss verbunden und alle gelöteten Anschlüsse mit Schrumpfschläuchen isoliert.

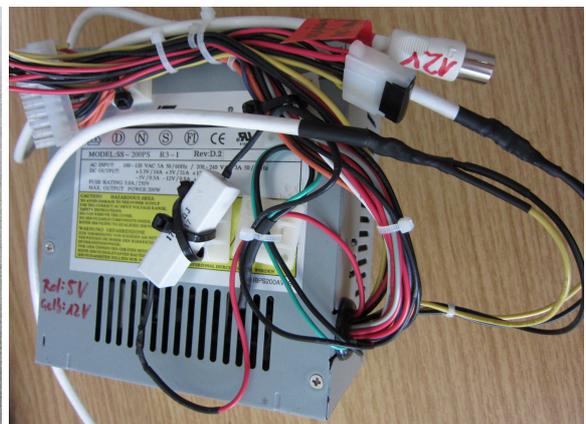


Abbildung 17 und 18: Satellitenschüssel und umgebautes Computer-Netzteil

Als TV-Stick wurde der "Salcar TStick+" verwendet, der ursprünglich für einen Empfang von DVB-T- und DAB- Kanälen konzipiert ist. Das kostenlose Computerprogramm "SDR#" sollte die Messergebnisse auswerten und qualitativ in ein "Waterfall-Diagramm" übersetzen, bei dem eine Veränderung der Signalstärke durch eine Farbänderung angezeigt wird und die Zeitachse nach unten "fließt" (siehe Abb. 19 und 20). SDR# wurde als Software für ein "Software Defined Radio" entwickelt, wobei man eine Antenne an den PC anschließen und mit Hilfe des Programms elektromagnetische Wellen verschiedener Frequenzen empfangen und demodulieren kann.

Nach ersten Tests mit "Zimmerantennen" schien die Technik wie geplant auch für die Sonnenbeobachtung einsetzbar zu sein, doch empfing ich auch nach mehreren Kontrollen aller Teile auf ihre Funktionstüchtigkeit keine Signale beim Anschluss des LNB. Dies könnte verschiedene Ursachen haben: 1. Möglichkeit: Das Signal des LNB ist zu schwach, um Veränderungen der Signalstärke am Computer anzeigen zu können. 2. Möglichkeit: Der LNB hat einen Defekt, sodass nur der Anschluss, auf dem Strom angeschlossen ist, Signale sendet. 3. Möglichkeit: Der verwendete TV-Stick kann die vom LNB gesendeten Frequenzen um 1,2 GHz nicht verarbeiten, da er für einen Frequenzbereich um 500 MHz konzipiert ist.

Screenshots von SDR#

Abb. 19:

Empfang von FM-Radio bei 104 MHz vor und nach Einschalten einer Zimmerantenne (farbliche Veränderung)

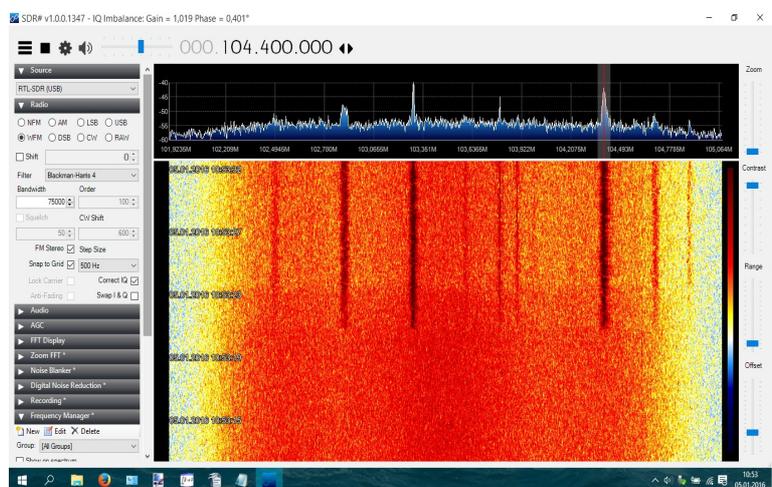
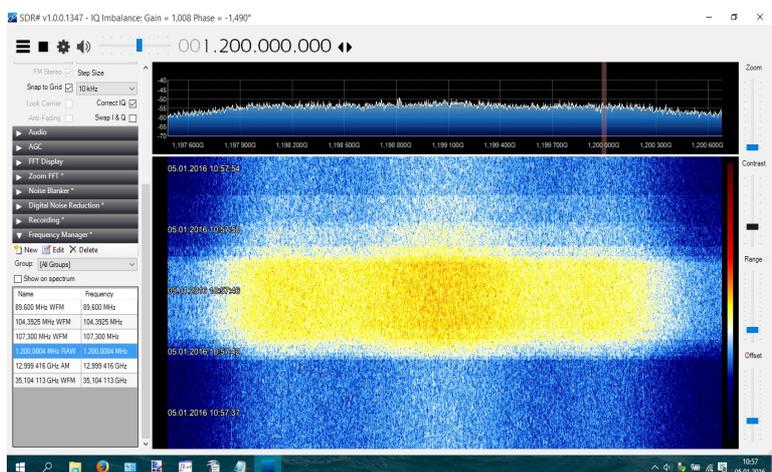


Abb. 20:

Messung bei 1,2 GHz (Farbliche Veränderung durch Änderung der Sensibilität) simuliert mögliche Messergebnisse für Sonnenbeobachtung



Da die Verarbeitung der Signale in einem "Waterfall-Diagramm" von SDR# ohnehin sehr ungenau wäre, entschied ich mich, einen Sat-Finder ("SF 2400") als Messinstrument zu verwenden, der für die Ausrichtung von Antennen zum Empfang von Satellitenfernsehen auf den Satelliten genutzt wird (Inspirationsquelle: vgl. Ref.2.73: Malański, Science in School). Er besitzt eine Anzeige der Signalstärke in Dezibel (dB), die über einen Stellknopf in der Sensibilität reguliert werden kann. Außerdem wird ein akustisches Signal ab einer gewissen Signalstärke ausgegeben, das mit zunehmender Signalstärke auch in der Tonhöhe steigt. Die Anzeige filmte ich während der Messungen, um in einem Video die Signalstärke in Abhängigkeit von der Zeit ablesen und in ein Diagramm übernehmen zu können.

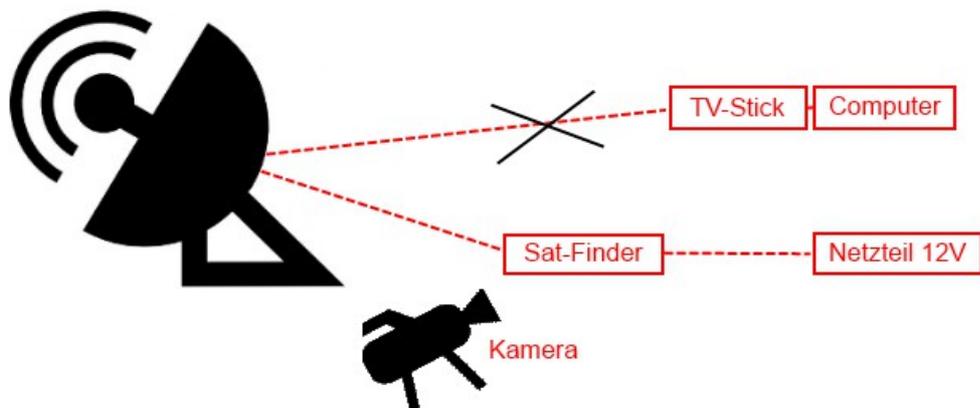


Abbildung 21: Skizze der verwendeten Versuchsanordnung
(Icons nach Ref.3.11: freepik und Ref.3.12: ctker)

Vor dem Start der Messung wird das Radioteleskop direkt auf die Sonne ausgerichtet, wobei das Display des Sat-Finders den höchsten Ausschlag zeigen sollte. Von dieser Position aus wird das Teleskop etwas nach Westen und minimal tiefer (für Messungen nach 12Uhr) gedreht, bis das akustische Signal des Sat-Finders verstummt. Über den Regler am Sat-Finder wird jetzt die Sensibilität verändert, bis das Display einen Wert der Signalstärke von ca. 3,6 dB anzeigt. Dies ist nötig, um für jede Messung konstante Werte zu erhalten und um die relativen Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Als Anhaltspunkt dient der Schatten des LNB auf der Sat-Schüssel, der sich bei einer direkten Ausrichtung auf die Sonne im Zentrum befindet. Auf der verwendeten Satellitenschüssel befinden sich zwei Nieten, die sich als ideale Ausrichtungshilfe erwiesen, da die Messung gestartet wurde, wenn der Schatten des LNB auf einer dieser Nieten stand und beendet wurde, als er die andere erreichte (siehe Abb. 23, S. 46). Der Winkel zwischen diesen beiden Nieten beträgt am LNB ca. 17°, was dem Winkel entspricht, den die Sonne während dieser Messung scheinbar weiterwandert. Da sich die Erde in 24 Stunden um 360° dreht und damit 15° pro Stunde, konnte eine Messdauer von

etwas über einer Stunde erwartet werden. Weil das Radioteleskop einen Stromanschluss für das Netzteil benötigt, waren nur Messungen am Fenster innerhalb der Wohnung möglich. In einem nach Süden gerichteten Fenster der Wohnung war in der Winterzeit die Messung nur in einem Zeitrahmen von ca. 3 Stunden (um 13 Uhr) durchführbar, da die Sonne sonst teilweise durch die Fensterrahmen verdeckt worden wäre. Außerdem war "schönes Wetter" mit Sonnenschein nötig, um das Teleskop exakt ausrichten zu können.



Abb. 22: Aufbau des Radioteleskops zur Messung am Fenster



Abb. 23: Nieten als Anhaltspunkte für Start- und Endpunkt der Messungen

5.4.2 Messungen und Auswertung

In den Herbstferien 2015 versuchte ich erste Messungen mit Hilfe des PC vorzunehmen, doch konnten keine Radiowellen gemessen werden, weshalb ich den Sat-Finder bestellte. In den Weihnachtsferien waren dann alle Teile vorhanden und das Radioteleskop einsatzfähig, doch war es hier aufgrund schlechten Wetters nur an zwei Tagen möglich, im beschriebenen Zeitfenster Messungen durchzuführen. Dabei war besonders der Wind ein großer Störfaktor, der die Sat-Schüssel drehte und so die Messungen beeinflusste. Die Messdauer betrug, wie zuvor geschildert, etwa eine Stunde, wobei die Frequenzen der gemessenen Wellen um 11,5 GHz lagen.

Die erste Messung war am 24.12.2015 ab 13:22 Uhr möglich, bei optimalen Witterungsbedingungen. Die originalen Filmaufnahmen des Displays des Sat-Finders (für beide Messungen) befinden sich auf der beiliegenden DVD.

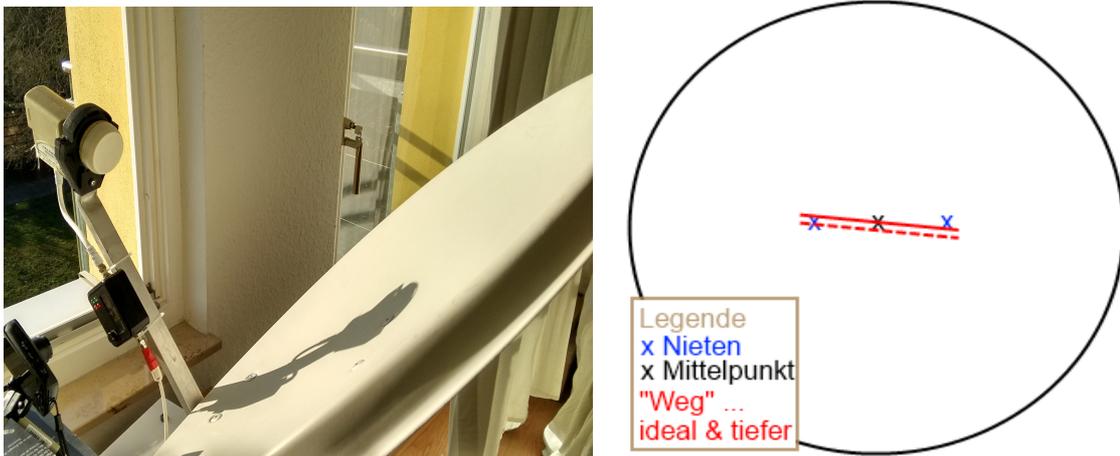


Abb. 24 (links): Messaufbau - Kamera filmt Sat-Finder

Abb. 25 (rechts): Skizze - "Weg" des LNB-Schattens auf Sat-Schüssel

(durchgehend: ideal, gestrichelt: minimal zu tief // für einen Messbeginn nach 12 Uhr)

Die Auswertung des Films durch Anhalten und Ablesen des Sat-Finders nach je 60 Sekunden ergab folgende Messwerte und Grafik für die erste Messung:

Zeit in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Signalpegel in dB	3,6	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	4,0	4,2	5,0	5,0	4,2	5,2	5,2	5,2	5,0	4,2			
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
4,8	5,0	5,3	5,5	5,5	5,4	5,6	5,3	5,2	5,1	5,1	5,1	5,2	5,4	5,4	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
5,3	5,3	5,2	5,2	5,2	5,1	4,9	5,0	5,2	5,2	5,4	5,5	5,5	5,4	5,2	5,1	5,1	3,6	3,6	

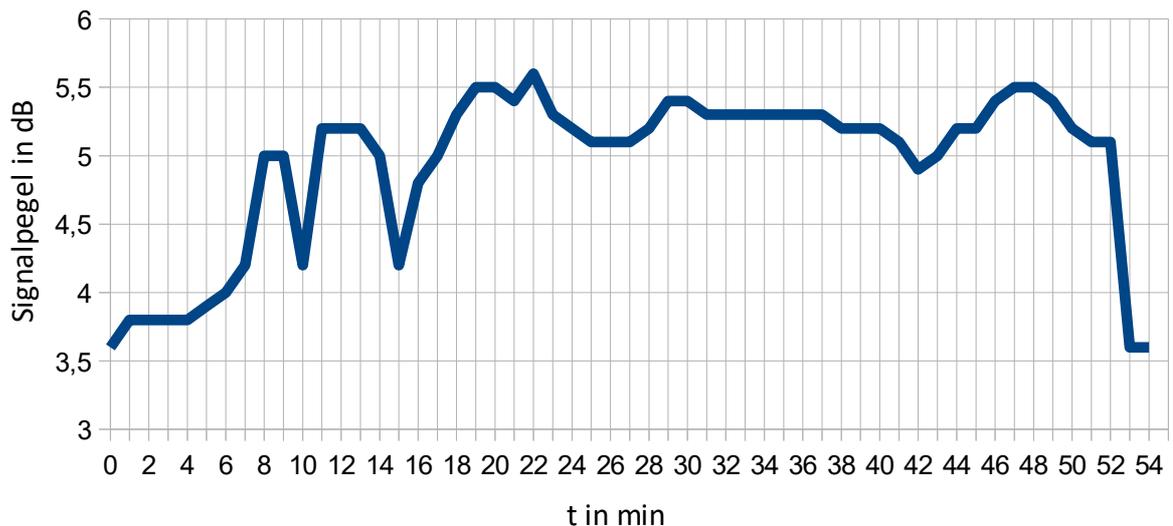


Diagramm 1: Erste Messung solarer Radiowellen (bei ca. 11,5 GHz)
am 24.12.2015 ab 13:22 Uhr in Halle (Saale)

Nach Einstellung auf einen Signalpegel von ca. 3,6 dB außerhalb des direkten Einflussbereiches der Sonne wurde die Messung gestartet. Zu Beginn ist ein kontinuierlicher Anstieg des Signalpegels bis in die 8. Minute hinein erkennbar, ab der die Werte bis zur 15. Minute stark zu schwanken beginnen. Dies ist auf Windstöße in dieser Zeit zurückzuführen, die auch im Video erkennbar sind, die das Radioteleskop leicht drehen und so für Abweichungen sorgten. Es folgt ein erneuter Anstieg der Signalstärke mit weniger extremen Schwankungen bis zu einer Plateau-Phase mit einer Signalstärke um 5,3 dB um die 34. Minute. Nach circa 34 Minuten könnte eine Symmetrieachse parallel zur y-Achse gesehen werden, die näherungsweise den Graphen symmetrisch teilt. Von hier an beginnt ein leichter Rückgang der Signalstärke mit kurzzeitigen Schwankungen bis zu einem Signalpegel von ca. 5,1 dB in der 52. Minute. Ab hier ist ein steiler Abfall der Signalstärke auf die anfänglichen 3,6 dB erkennbar, der ebenfalls auf einen heftigen Windstoß zurückgeführt werden kann, der die Sat-Schüssel leicht aus der Sonne drehte und so die Messung vorzeitig beendete. Verfolgt man den Graphen bis zur 34. Minute und danach, legt dies eine solche Symmetrieachse in der 34. Minute und einen erwartbaren Abfall des Graphen bis etwa zur 70. Minute nahe, falls kein Wind die Messung beeinflusst hätte. Diese Zeit entspricht auch der erwarteten Messdauer, die aus dem ermittelten Winkel zwischen dem Start- und Endpunkt der Messung (als LNB-Schatten auf der Sat-Schüssel) am LNB berechnet wurde und dem scheinbaren Weg und zurückgelegten Winkel der Sonne in dieser Zeit entspricht.

Durch Aktivieren der Option "Kurvenglättung" wurden vom Computer rechnerisch Schwankungen nicht berücksichtigt und ein idealisierter Graph konstruiert:

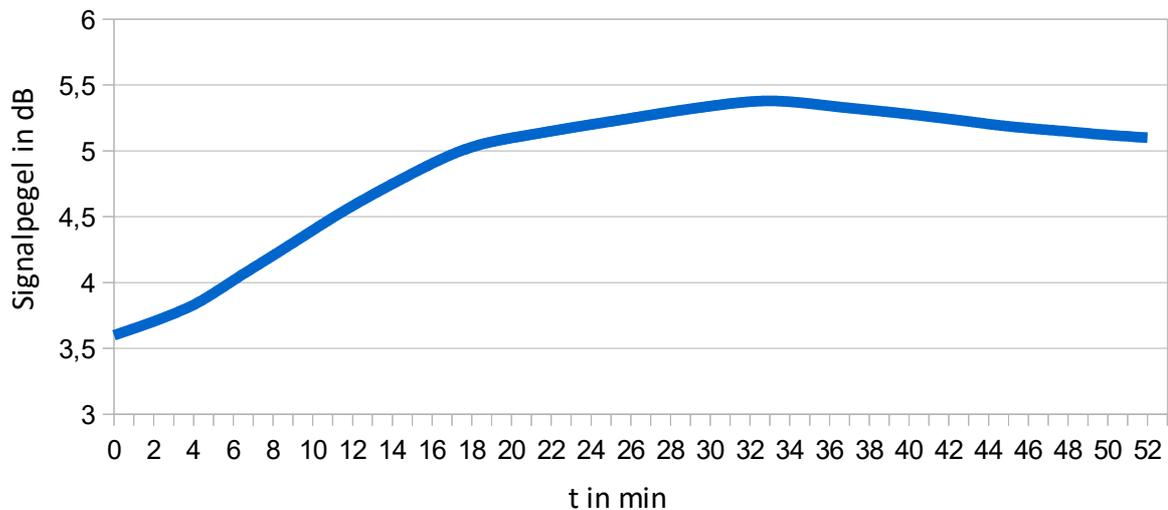


Diagramm 2: Glättungskurve der ersten Messung (vgl. Diagramm 1)

Der Verlauf des Graphen in Diagramm 2 ähnelt dabei einer "Glockenkurve". Nach kontinuierlichem Wachsen des Anstiegs des Graphen zu Beginn ist ein Wendepunkt bei ca. 11 Minuten zu sehen, von dem aus sich der Anstieg des Graphen bis zum Extrempunkt bei etwa 34 Minuten mit einem Signalpegel von rund 5,4 dB verringert. Von hier aus verhält sich der Graph symmetrisch zu einer gedachten Symmetrieachse parallel zur y-Achse. Dies bestätigt die vermutete Symmetrie bereits im ersten Graphen.

Da die Dezibel-Skala logarithmisch eingeteilt ist, wurden die Messwerte durch Umrechnen in ein Diagramm mit linearer Skala und Einteilung in Skalenteilen (SKT) in Abhängigkeit von der Zeit t in Minuten eingetragen. Die Umrechnung der Funktionswerte der logarithmischen Skala in eine lineare kann mit folgender Formel durchgeführt werden:

$$(10)^{\frac{y[\text{in dB}]}{10}} = a$$

Y entspricht dabei dem in dB abgelesenen Wert auf dem Sat-Finder und a dem ermittelten Funktionswert für eine lineare Skala.

Die Einteilung in Dezibel bedeutet "Zehntel Bel", weshalb der Exponent beim Umwandeln in eine lineare Skala durch 10 geteilt werden muss (vgl. Ref.2.74: Pfeiffer, Universität der Bundeswehr München).

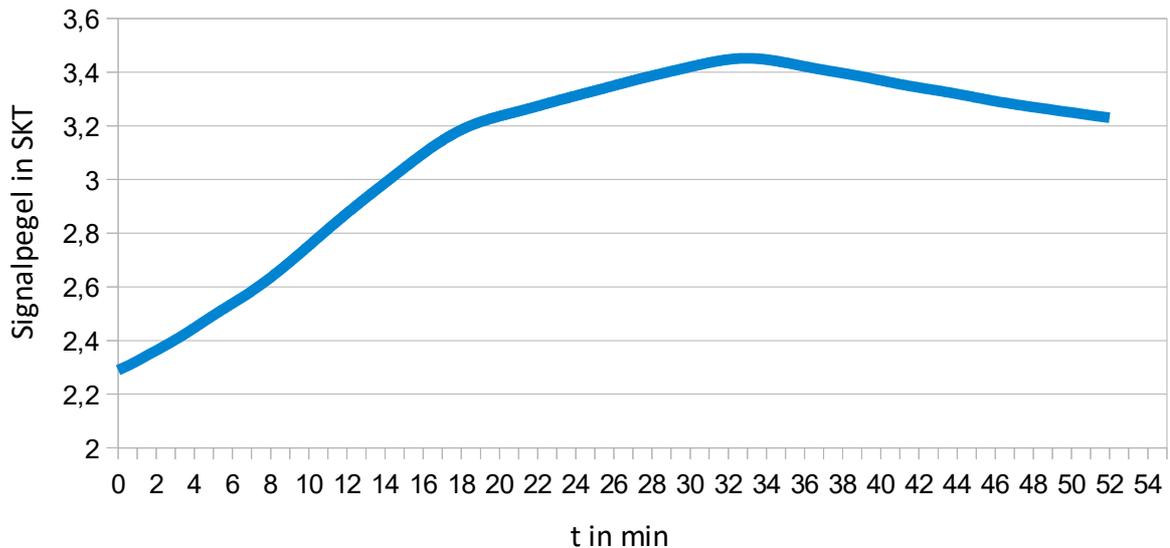


Diagramm 3: Glättungskurve der ersten Messung mit Angabe des Signalpegels in linearen Skalenteilen (SKT) (vgl. Diagramm 1 und 2)

Die Umwandlung zeigt dabei besonders für kleinere Funktionswerte steilere Anstiege, weshalb der Graph noch stärker einer Glockenkurve ähnelt. Bei mehreren Graphen aus Astronomieforen im Internet, in denen Hobby-Astronomen ihre Messwerte vorstellten, ergaben sich für ähnliche Versuchsaufbauten zum Messen solarer Radiowellen vergleichbare Glockenkurven.

Diese sind durch die Form der Sonne als Kugel erklärbar, die von der Erde aus als "Scheibe" sichtbar, scheinbar in den Empfangsbereich der Sat-Schüssel wandert. Beim Eintritt in den Empfangsbereich steigt die Signalstärke mit zunehmender "Fläche" der Sonne in diesem Bereich, die im Signalstärkemaximum das Zentrum der Sat-Schüssel bestrahlt und anschließend scheinbar wieder aus dem Empfangsbereich des Radioteleskops hinauswandert.

Eine zweite Messung am 01.01.2016 ab 11.57 Uhr wurde zur Kontrolle der Messergebnisse durchgeführt. Nach 27 Minuten stellte ich fest, dass die Werte für die Signalstärke allgemein zu klein waren und der Graph bereits nach dieser relativ kurzen Zeit, die der erwarteten Messdauer widersprach, auf die Werte der "Umgebungsstrahlung" und des Eigenrauschens der Bauteile ohne solare Einflüsse abfiel. Die Ursache hierfür war, dass die Höhe des Radioteleskops minimal tiefer eingestellt war als optimal. Dies ist auch in der Abbildung 25 (S. 47) dargestellt (rot gestrichelt: "Weg - tiefer"). Nach dieser Korrektur und erneuten Einstellung des Radioteleskops auf den Startpunkt sollte die Messung fortlaufend in einem Video festgehalten werden. Mir war vorher nicht bekannt, dass meine Digitalkamera, mit der

das Video aufgenommen wurde, nach einer Stunde automatisch den Film beendet. Vier Minuten nach Abbruch bemerkte ich dies, las noch einen Wert für den Signalpegel vom Sat-Finder ab und beendete dann die Messung. Die eigentliche Messung, die mit Messung 1 vergleichbar ist, beginnt daher erst bei Minute 28. Die Auswertung des Videos ergab folgende Daten:

Zeit in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Signalpegel in dB	3,6	3,7	4,6	4,9	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1	5,0			
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27								
4,8	4,9	4,9	4,9	5,0	5,0	4,7	4,9	5,0	5,0	4,6	3,8								
28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
4,0	4,5	4,8	4,5	4,7	4,9	4,9	5,0	4,8	5,1	5,1	5,3	5,1	5,2	5,5	5,2	5,0	5,0	5,1	5,2
48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	//	64					
5,3	5,2	5,3	5,5	5,1	5,5	5,6	5,8	5,9	5,8	5,8	5,9	5,9	//	5,6					

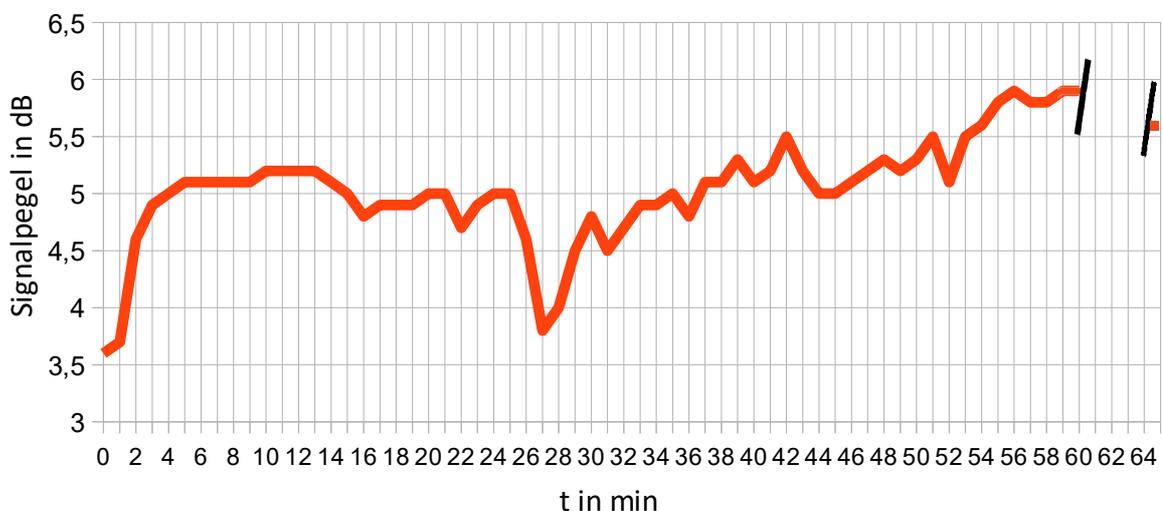


Diagramm 4: Zweite Messung solarer Radiowellen (bei -11,5 GHz)
am 01.01.2016 ab 11:57 Uhr in Halle (Saale)

Im ersten Abschnitt des Graphen bis in die 27. Minute ist bereits gut der scheinbare Sonnendurchlauf durch den Empfangsbereich des Radioteleskops sichtbar. Quasi im kleinen Maßstab - in kürzerer Zeit und mit kleineren Funktionswerten des Signalpegels - ist hier deutlich der solare Einfluss auf die Signalstärke erkennbar. Der Graph verläuft bis zur 13. Minute monoton steigend und fällt von dort bis zur 27. Minute mit kleineren "Schwankungen" als erneute Ausschläge des Signalpegels ab.

Nach neuer, korrigierter Ausrichtung des Radioteleskops sollte die Messung fortlaufend durchgeführt und dokumentiert werden, weshalb auch das Video nicht angehalten wurde. Im folgenden Diagramm sind die Messwerte ab der 27. Minute dargestellt, die mit den Werten der ersten Messung vergleichbar sind, da sie unter ähnlichen Bedingungen und Ausrichtungen des Teleskops erfolgten:

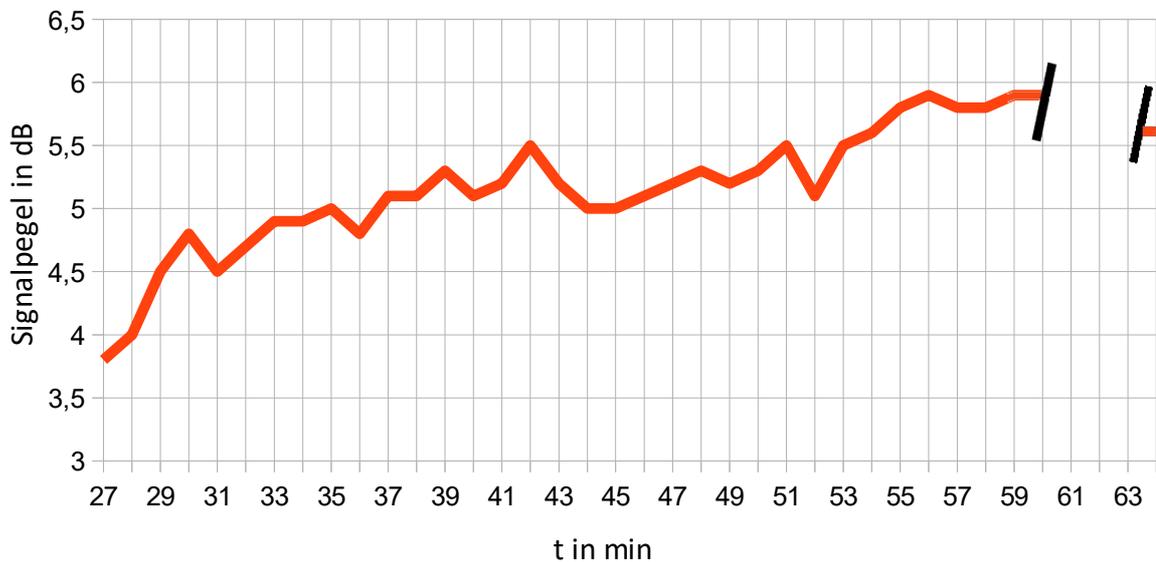


Diagramm 5: Verkürzte Darstellung des Diagramms der zweiten Messung (vgl. Diagramm 4)
Signalpegel in Abhängigkeit von der Zeit ab der 27. Minute der Messung

Bis in die 60. Minute hinein (ab der 27. Minute) ist ein Ansteigen des Signalpegels bis zu einer Signalstärke von 5,9 dB erkennbar. Ohne größere Abweichungen von einem gedachten, stetig steigenden Graphen konnte hier die Zunahme der Signalstärke dokumentiert werden. Im Verlauf des Graphen der ersten Messung (siehe Diagramm 1) und insbesondere dem der "Glättung" (siehe Diagramm 2) wurde idealisiert eine Symmetrieachse in der 34. Minute angenommen, was im Graphen des zweiten Teils der zweiten Messung (siehe Diagramm 5) einer idealisierten Symmetrieachse nach circa 61 Minuten entspräche. In der 59. und 60. Minute ist dabei auch im Graphen der zweiten Messung ein Höchststand des Signalpegels erkennbar, wobei bereits seit der 56. Minute der Signalpegel um Werte von 5,8 dB bis 5,9 dB schwankt, weshalb man für die Zeit um die 60. Minute auch für die zweite Messung einen Höchststand annehmen kann, wodurch die Vermutung einer idealisierten Symmetrieachse in beiden Graphen bei ca. 34 Minuten nach Messbeginn bestätigt wird. Ein weiteres Indiz hierfür ist der nach 64 Minuten abgelesene Wert des Signalpegels von 5,6 dB, was zeigt, dass die Signalstärke bereits zurückgegangen ist (vorausgesetzt es handelt sich nicht um eine Schwankung, die durch Störfaktoren initiiert ist).

Das Zusammenfügen der Graphen der ersten Messung sowie dem des zweiten Teils der zweiten Messung ab der 27. Minute in einem Diagramm und Kürzung auf 37 Minuten ermöglicht einen leichteren Vergleich der Messergebnisse:

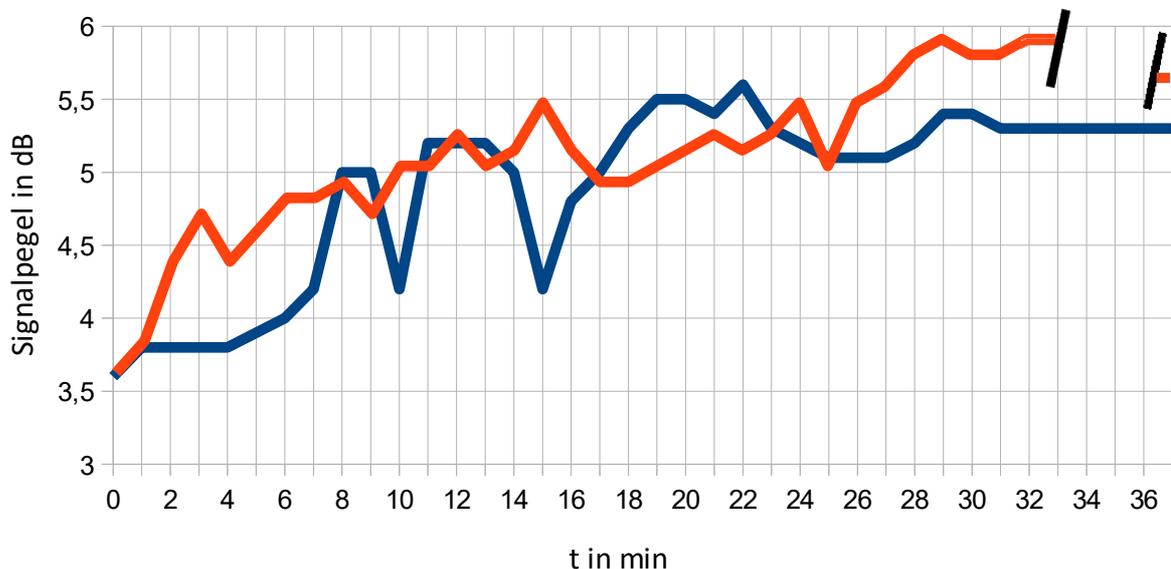


Diagramm 6: Ergebnisse der ersten (*blau*) und des zweiten Teils der zweiten (*orange*) Messreihe (Kürzung des Graphen der ersten Messung bis Minute 37)

Deutlich erkennbar ist hier der ähnliche Verlauf der Graphen, wobei die orange Funktion der zweiten Messung gegenüber dem Graphen der ersten Messung im Durchschnitt höhere Funktionswerte annimmt. Dies könnte dem manuellen Einstellen der Sensibilität des Sat-Finders geschuldet sein, wenn diese in der zweiten Messung minimal zu hoch kalibriert wurde.

Ein störender Faktor war neben starker Bewölkung, die eine Ausrichtung des einfachen Radioteleskops an vielen Tagen unmöglich machte, besonders der Wind, der für deutliche "Ausreißer" in den Ergebnissen der Signalstärke verantwortlich war. Hinzu kommen die Ungenauigkeiten beim manuellen Ablesen der Werte für die Signalstärke sowie Ungenauigkeiten bei der geschilderten Kalibrierung der Sensibilität auf einen Wert des Signalpegels von 3,6 dB ohne direkte solare Einflüsse. Zudem wurden die Werte nur jede volle Minute erhoben, sodass Schwankungen in der Zwischenzeit in den Diagrammen nicht berücksichtigt werden.

Die durchgeführten Messungen beweisen eindeutig die Existenz solarer Radiowellen und die des "Radiofensters", da die Signalstärke sich bei Ausrichtung des Teleskops auf die Sonne deutlich und reproduzierbar veränderte und somit die Radiostrahlung durch die Erdatmosphäre hindurch messbar war.

6. Schlussbemerkungen

Und Gott sprach ...

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

... und es ward Licht!

Während meiner Recherchen zu Beginn der Arbeit stieß ich im Internet auf dieses Zitat (vgl. Ref.2.75: Urban, HIB Wien), welches die Bedeutung von Maxwells Gleichungen hervorhebt, da er erkannte, wie und warum sich elektromagnetische Wellen und damit auch das Licht ausbreitet. Elektromagnetische Wellen und insbesondere Radiowellen werden heute in unterschiedlichsten Bereichen verwendet und sind aufgrund ihrer alltäglich großen Bedeutung nicht mehr wegzudenken.

Persönlich hat mich die Exkursion zum Effelsberger Radioteleskops fasziniert, bei dem ich einen umfangreichen Einblick in dessen Geschichte und Messtechnik erhalten durfte und erfuhr, wie die Störfaktoren meines Experiments auch dort beachtet werden müssen. Die Möglichkeit, mit einfachen Mitteln selber Radiowellen messen zu können, ist ebenfalls bemerkenswert.

Zukünftig wird vermutlich die Radioastronomie, die ja noch nicht alt ist, noch viel von sich hören lassen, da von Radioastronomen an Radioteleskopen wie dem Effelsberger und mit Interferometern ständig neue wissenschaftliche Daten und Erkenntnisse publiziert werden. Dies gilt besonders für Resultate aus spektroskopischen Analysen, bei denen möglicherweise eines Tages tatsächlich vollständige Aminosäuren als Grundbausteine für Organismen im All entdeckt werden könnten.

Quellenverzeichnis

1. Gedruckte Literatur (alphabetisch nach Autor)

- Ref.1.1 Bennett, Jeffrey et al.
Astronomie - Die kosmische Perspektive, Pearson Deutschland
Prof. Harald Lesch (Hg.), 5. Auflage, München 2010
- Ref.1.2. Dombrowski, Ralf et al.
Sie prägten unsere Welt, Reader's Digest
1. Auflage, Stuttgart 2009
- Ref.1.3 Prof. Hoche, Detlef et al.
Physik Gymnasiale Oberstufe, Duden Paetec Schulbuchverlag
Prof. Lothar Meyer et al. (Hg.), 1. Auflage, Berlin 2013
- Ref.1.4 Prof. Hoche, Detlef et al.
Schulwissen Physik, Duden Schulbuchverlag
Prof. Lothar Meyer et al. (Hg.), 2. Auflage, Berlin 2011
- Ref.1.5 Jonis, Michaela et al.
Grosses Universallexikon, Compact Verlag
Sonderausgabe, München 1998

2. Internetliteratur (chronologisch)

- Ref.2.1 o.V.; dibb Biographien, "James Clerk Maxwell"
<http://dibb.de/biographie-james-maxwell.php>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 12:38 Uhr
- Ref.2.2 o.V.; LernHelfer, "Hertzsche Wellen"
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/hertzsche-wellen>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 13:03 Uhr
- Ref.2.3 Noack, Cornelius; Theor. Physik für Lehramtsstudenten, "Die mikroskopischen Maxwell-Gleichungen"
<http://www.itp.uni-bremen.de/~noack/phenom-2.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 13:37 Uhr
- Ref.2.4 Dr. Bäker, Martin; ScienceBlogs, "Die Maxwellgleichungen (fast) ohne Formeln"
<http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2010/08/24/die-maxwellgleichungen-ohne-formeln-1-felder/>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 13:49 Uhr
- Ref.2.5 Dr. Leisen, Josef; Gutenberg-Universität Mainz, "Die Maxwell-Gleichungen verstehen"
<http://www.josefleisen.de/uploads2/03%20Fachdidaktik%20Physik/21%20Elementarisierung%20der%20Maxwell%20Gleichungen.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 14:16 Uhr
- Ref.2.6 o.V.; Engineering and Technology History Wiki, "Maxwell's Equations"
http://ethw.org/Maxwell's_Equations
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 14:47 Uhr
- Ref.2.7 o.V.; Spektrum, "Lexikon der Physik - Verschiebungsstrom"
<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/verschiebungsstrom/15191>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 15:16 Uhr

- Ref.2.8 o.V.; Elektronik Kompendium, "Spule" und "Kondensator"
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 15:28 Uhr
- Ref.2.9 o.V.; DocCheck Flexikon, "Permeabilität" und "Permittivität"
<http://flexikon.doccheck.com/de/>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 16:03 Uhr
- Ref.2.10 o.V.; Uni Kassel, "Elektromagnetische Wellen"
<https://www.uni-kassel.de/fb10/fileadmin/datas/fb10/physik/oberflaechenphysik/exp2/Lehre/ExpPhysII/Elektromagnetische-Wellen.pdf>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 16:28 Uhr
- Ref.2.11 o.V.; LernHelfer, "Elektromagnetische Wellen"
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/elektromagnetische-wellen>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 16:41 Uhr
- Ref.2.12 o.V.; Uni Ulm, "Bohrsches Atommodell"
https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/quantenchemie/html/bohrAtom.html
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 16:56 Uhr
- Ref.2.13 Paal, Gabor; SWR, "Wie entsteht Wärmestrahlung?"
<http://www.swr.de/blog/1000antworten/antwort/19734/wie-entsteht-waermestrahlung-was-passiert-dabei-auf-atomarer-ebene/>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 17:12 Uhr
- Ref.2.14 Schmidt, Kersten; Uni München, "Ortung und Analyse von Blitzentladungen [...]"
https://edoc.ub.uni-muenchen.de/6925/1/schmidt_kersten.pdf
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 17:39 Uhr
- Ref.2.15 Benson, O. et al.; HU Berlin, "Experimentalphysik für Biologen und Chemiker"
<https://www.physik.hu-berlin.de/de/nano/lehre/WS10-11/experimental2/skript8>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 17:49 Uhr
- Ref.2.16 Suter, Dieter; Uni Dortmund, "Elektromagnetische Wellen"
https://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Physik_B2_SS_01/5.4_Elektromagnet_Wellen.pdf
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 17:57 Uhr
- Ref.2.17 o.V.; Uni Kaiserslautern, "Elektromagnetische Schwingungen und Wellen"
<http://www.physik.uni-kl.de/ziegler/Skripte/Exphys-BC-11.pdf>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 19:37 Uhr
- Ref.2.18 Salzmann, Wiebke; Physik-Wissen, "Beugung und der Welle-Teilchen-Dualismus"
http://www.physik.wissenstexte.de/unschaerfe_II.htm
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 19:49 Uhr
- Ref.2.19 o.V.; Kuriose Feiertage, "Radiotag oder der Tag des Radios in Russland"
<http://www.kuriose-feiertage.de/07/05/radiotag-oder-der-tag-des-radios-in-russland/>
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 21:00 Uhr
- Ref.2.20 o.V.; Universität Würzburg, "Karl Ferdinand Braun"
https://www.uni-wuerzburg.de/ueber/universitaet/wissenschaftsmeile_roentgenring/die_nobelpreistraeger/karl_ferdinand_braun_1909/
 Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 21:29 Uhr

- Ref.2.21 o.V.; Bundesnetzagentur, "Frequenzplan"
[http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/
Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Grundlagen/Frequenzplan/frequenzplan-node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Grundlagen/Frequenzplan/frequenzplan-node.html)
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 21:34 Uhr
- Ref.2.22 o.V.; ITWissen, "Ionosphäre"
<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Ionosphaere-ionosphere.html>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 22:12 Uhr
- Ref.2.23 o.V.; ITU, "Standardization"
<http://www.itu.int/en/ITU-T/about/Pages/default.aspx>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 22:08 Uhr
- Ref.2.24 o.V.; Internetratgeber-Recht, "Rundfunkgebührenstaatsvertrag"
<http://www.internetratgeber-recht.de/Rundfunkgebuehren/rfg1.htm>
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 22:23 Uhr
- Ref.2.25 o.V.; Physik im Unterricht, "Die drahtlose Übertragung von Sprache und Musik"
<http://sandphysik.de/pdf/well5.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 09:58 Uhr
- Ref.2.26 o.V.; Deutscher Amateur-Radio-Club, "Modulation, Demodulation"
<http://dh2mic.darc.de/afu-kurs/pdf/files/modulation.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 09:50 Uhr
- Ref.2.27 Maurer, Gerhard; Funkservice, "FM-Modul"
http://funkservice.at/dokus/FM_Modul.pdf
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 09:52 Uhr
- Ref.2.28 o.V.; wabweb, "Der erste UKW-Sender in Europa"
<http://www.wabweb.net/radio/radio/fm1eu.htm>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 10:18 Uhr
- Ref.2.29 o.V.; Hobbyfunk, "Ausbreitung von Funkwellen"
<http://www.hobbyfunk.de/grund/funkwellen.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 10:45 Uhr
- Ref.2.30 o.V.; SRG, "Was ist UKW?"
https://www.broadcast.ch/whatis_fm.aspx
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 10:51 Uhr
- Ref.2.31 o.V.; Universal-Lexikon, "Radiohorizont"
http://universal_lexikon.deacademic.com/289571/Radiohorizont
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 11:01 Uhr
- Ref.2.32 o.V.; wabweb, "Über die Ausbreitung von Lang- und Mittelwellen "
<http://www.wabweb.net/radio/radio/grundl1.htm>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 11:14 Uhr
- Ref.2.33 o.V.; ITWissen, "Digitalsignal"
<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Digitalsignal-DS-digital-signal.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 12:06 Uhr
- Ref.2.34 Poole, Ian; Radio-Electronics, "What is DAB [...]"
<http://www.radio-electronics.com/info/broadcast/dab/what-is-digital-audio-broadcasting-tutorial.php>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 11:53 Uhr

- Ref.2.35 o.V.; Rettet unsere Radios, "Der technische Hintergrund zum analogen und digitalen Radio [...]"
<http://www.rettet-unsere-radios.de/7.html#>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 12:01 Uhr
- Ref.2.36 Grages, Ernst; Laubach-Werra, "Verkehrsweg Luft"
<http://www.laubach-werra.de/trommel/2005/26/ts26-04.htm>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 12:54 Uhr
- Ref.2.37 o.V.; Elektronik Kompendium, "QAM"
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1304151.htm>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 12:42 Uhr
- Ref.2.38 Prof. Weinzierl, Stefan; Technische Universität Berlin, "Einführung in die digitale Signalverarbeitung"
<https://www.ak.tu-berlin.de/fileadmin/a0135/Unterrichtsmaterial/Weinzierl/EDS%20Skript.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 13:08 Uhr
- Ref.2.39 o.V.; Wikipedia, "Analoges Fernsehen"
https://de.wikipedia.org/wiki/Analoges_Fernsehen
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 13:16 Uhr
- Ref.2.40 Wießner, Adolf; Deutsche Biographie, "Hülsmeier, Christian"
<http://www.deutsche-biographie.de/sfz34215.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 13:55 Uhr
- Ref.2.41 o.V.; Fraunhofer-Institut [...], "1904-2004: Ein Jahrhundert Radargeschichte"
<http://www.100-jahre-radar.fraunhofer.de/>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 13:50 Uhr
- Ref.2.42 Wolff, Christian; Radartutorial, "Das Prinzip von Radargeräten"
<http://www.radartutorial.eu/01.basics/Das%20Prinzip%20von%20Radarger%C3%A4ten.de.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 13:59 Uhr
- Ref.2.43 Weihard, Sebastian; FernUniversität Hagen, "Radarsensorik in der Fahrzeugtechnik"
http://www.fernuni-hagen.de/imperia/md/content/fakultaetfuermathematikundinformatik/agjob/vortrag_weihard.pdf
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 14:11 Uhr
- Ref.2.44 o.V.; Was ist Was, "Warum sind Stealth-Bomber auf dem Radar unsichtbar"
<http://www.wasistwas.de/archiv-technik-details/warum-sind-stealth-bomber-auf-dem-radar-unsichtbar.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 14:20 Uhr
- Ref.2.45 Pander, Jürgen; SpiegelOnline, "[...] Die Techniken für die Jagd auf Temposünder"
<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/geschwindigkeitskontrolle-so-funktionieren-die-blitzer-der-polizei-a-926918.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 14:35 Uhr
- Ref.2.46 o.V.; MagicMaps, "Wie funktioniert GPS?"
<http://www.magicmaps.de/produktinfo/anwendung/wie-funktioniert-gps.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 14:42 Uhr
- Ref.2.47 o.V.; Garmin, "What is GPS?"
<http://www8.garmin.com/aboutGPS/>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 14:45 Uhr
- Ref.2.48 o.V.; Elektronik Kompendium, "WLAN-Frequenzen und -Kanäle"
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1712061.htm>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 14:59 Uhr

- Ref.2.49 o.V.; Informationszentrum Mobilfunk, "Welche Frequenzen nutzt der Mobilfunk in Deutschland?"
<http://informationszentrum-mobilfunk.de/welche-frequenzen-nutzt-der-mobilfunk-deutschland#header>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 15:03 Uhr
- Ref.2.50 o.V.; Wikipedia, "Warensicherungsetikett"
<https://de.wikipedia.org/wiki/Warensicherungsetikett>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 15:08 Uhr
- Ref.2.51 o.V.; Landesverwaltung Bozen, "Die biologische Wirkung elektromagnetischer Strahlung"
http://www.provinz.bz.it/umweltagentur/2908/elektro/download/broschuere_15-28_d.pdf
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 15:28 Uhr
- Ref.2.52 Wölfle, Ralf; Elektrosmoginfo, "Grenzwerte in Deutschland"
http://www.ralf-woelfle.de/elektrosmog/allgemein/grenzw_m.htm
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 15:35 Uhr
- Ref.2.53 Lehmacher, Stefan; Strahlung-gratis, "Krebs durch Radar?"
<http://www.strahlung-gratis.de/Krebs%20durch%20Radar.htm>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 15:38 Uhr
- Ref.2.54 Wiertzema, Holger; Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR),
"Geschichte der Radioastronomie [...]"
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/582352/einfuehrung>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 16:26 Uhr
- Ref.2.55 Weber, Michael; Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR),
"Galaktische und Extragalaktische Radiokontinuumstrahlung"
http://www.mpifr-bonn.mpg.de/412794/michael_weber
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 17:06 Uhr
- Ref.2.56 o.V.; Abenteuer Universum, "Synchrotronstrahlung"
<http://abenteuer-universum.de/diverses/synchro.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 17:37 Uhr
- Ref.2.57 o.V.; Cosmos Indirekt, "Solare Radioastronomie"
http://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Solare_Radioastronomie
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 17:48 Uhr
- Ref.2.58 o.V.; Zentrale für Unterrichtsmedien, "Die elektromagnetische Strahlung der Sonne"
<http://www.zum.de/Faecher/A/Sa/LB3/A11G31.HTM>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 17:54 Uhr
- Ref.2.59 Dambeck, Thorsten; Max-Planck-Gesellschaft, "Schutzschilde im Sonnensystem"
https://www.mpg.de/8938697/F001_Fokus_018-025.pdf
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 18:31 Uhr
- Ref.2.60 Freistetter, Florian; ScienceBlogs, "Radio Jupiter sendet Mysteriöses"
<http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2010/03/30/radio-jupiter-sendet-mysterioses/>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 18:33 Uhr
- Ref.2.61 Menten, Karl; Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR),
"Die Suche nach Biomolekülen in interstellaren Wolken"
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/3051561/Die-Suche-nach-Biomolekuelen-in-Interstellaren-Wolken>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 18:37 Uhr

- Ref.2.62 o.V.; Uni Wuppertal, "Die 21cm-Wasserstofflinie"
<http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/quantum/h21.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 18:44 Uhr
- Ref.2.63 o.V.; Chemie.de, "Spin-Flip"
<http://www.chemie.de/lexikon/Spin-Flip.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 18:49 Uhr
- Ref.2.64 o.V.; Abenteuer Universum, "Pulsare"
<http://abenteuer-universum.de/stersterne/pulsar.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 19:04 Uhr
- Ref.2.65 Reitz, Björn-Eric; Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR),
"Kosmische Hintergrundstrahlung"
http://www.mpifr-bonn.mpg.de/412991/bjoern_eric_reitz_b
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 19:40 Uhr
- Ref.2.66 o.V.; National Radio Astronomy Observatory, "Cosmic Microwave Background Radiation"
<http://www.cv.nrao.edu/course/ast534/CMB.html>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 19:42 Uhr
- Ref.2.67 o.V.; Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR),
"Funktionsweise von Radioteleskopen und LOFAR"
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/530192/functionPDF-Radioastronomie>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 20:22 Uhr
- Ref.2.68 o.V.; Wikipedia, "Radioastronomiefunkdienst"
<https://de.wikipedia.org/wiki/Radioastronomiefunkdienst>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 20:31 Uhr
- Ref.2.69 o.V.; ALMA Observatory, "How does ALMA work?"
<http://www.almaobservatory.org/en/about-alma/how-does-alma-work>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 20:36 Uhr
- Ref.2.70 o.V.; National Radio Astronomy Observatory, "Welcome to the Very Large Array!"
<http://www.vla.nrao.edu/>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 20:41 Uhr
- Ref.2.71 Hamworth, David; Stargazing, "Itty Bitty Radio Telescope"
http://www.stargazing.net/david/radio/itty_bitty_radio_telescope.html
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 09:25 Uhr
- Ref.2.72 Schneider, Lars; LNB-Test, "Wie funktioniert ein LNB?"
<http://www.lnb-test.de/knowhow/wie-funktioniert-ein-lnb>
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 09:36 Uhr
- Ref.2.73 Malański, Bogusław; Science in School, "Ein Radioteleskop im Eigenbau"
<http://www.scienceinschool.org/node/4105>
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 09:26 Uhr
- Ref.2.74 Pfeiffer, Roland; Universität der Bundeswehr München,
"Umrechnung dB-linear leicht gemacht?!"
https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d351120/db1_new.pdf
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 10:18 Uhr
- Ref.2.75 Urban, Wolfgang; HIB Wien, "Die Schöpfung nach Maxwell"
<http://www.hib-wien.at/leute/wurban/physik/schoepfung.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 18:43 Uhr

3. Bildquellen (chronologisch)

- Ref.3.1 diybook, "Wie funktioniert eine Infrartheizung?"
https://diybook.de/sites/default/files/styles/article_galleryimage/public/01-wie-funktioniert-infrartheizung-em-spektrum.jpg?itok=anRnQqMb
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 13:14 Uhr
- Ref.3.2 Landesbildungsserver Baden-Württemberg, "Der hertzsche Dipol"
http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/wellen/em_wellen/dipols0.gif
Zuletzt aufgerufen: 01.02.2016 um 16:10 Uhr
- Ref.3.3 roro.muc.kobis, "Modulationen"
http://www.roro.muc.kobis.de/img/amplituden__und_frequenzmodulation283.png
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 11:31 Uhr
- Ref.3.4 funkfernsteuerungsindustrie, "Propagatie"
<http://www.funkfernsteuerungsindustrie.de/tyropedia/wp-content/uploads/2011/01/Propagatie.jpg>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 11:34 Uhr
- Ref.3.5 coreypadveen, "analog-digi"
<http://www.coreypadveen.com/wp-content/uploads/2015/01/Analog-digi.png>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 12:20 Uhr
- Ref.3.6 shuredeutschland, "Digitalfunk [...]"
https://shuredeutschland.files.wordpress.com/2013/07/digitalfunk_psf_fsk_empfang_tn.jpg
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 12:22 Uhr
- Ref.3.7 Wikipedia, "RF-Etikett"
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/Ws_rfrp.jpg/220px-Ws_rfrp.jpg
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 15:07 Uhr
- Ref.3.8 Pearsons Education, "CMB"
<http://www.physast.uga.edu/~rls/1020/ch23/23-07.jpg>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 20:49 Uhr
- Ref.3.9 Max-Planck-Institut für Astronomie (MPA), "Radioastronomie"
<http://www.mpia.de/homes/liefke/teaching/multiwavelength/radioastronomie.pdf>
Zuletzt aufgerufen: 02.02.2016 um 20:25 Uhr
- Ref.3.10 Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR), "Beobachtungsplan A" 26.01 - 08.02.2016
https://eff100mwiki.mpifr-bonn.mpg.de/lib/exe/fetch.php?media=a_2016_01_26.pdf
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 09:10 Uhr
- Ref.3.11 freepik, "Mediensatellitenschüssel mit Signal"
https://image.freepik.com/freie-ikonen/mediensatellitenschussel-mit-signal_318-38422.jpg
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 09:45 Uhr
- Ref.3.12 clker, "TV-Camera-Icon"
<http://www.clker.com/cliparts/y/F/2/g/b/G/tv-camera-icon-md.png>
Zuletzt aufgerufen: 03.02.2016 um 09:54 Uhr

4. Film- und Videoquellen

- Ref.4.1 Terra X: Das unsichtbare Netz, ZDF
<http://www.zdf.de/terra-x/das-unsichtbare-netz-funktechnik-pionier-der-drahtlosen-kommunikation-5364048.html>
Axel Engstfeld (Reg.), 2011
Letzter Aufruf der Bezugsquelle: 01.02.2016 um 21:41 Uhr

5. Mündliche Quellen und anderes Informationsmaterial

- Ref.5.1 Vortrag und Informationsmaterial von Dr. Norbert Junkes,
Leiter für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn (MPIfR)
am 29.01.2016 beim Besuch des Radioteleskops Effelsberg
- Ref.5.2 Kärcher, Hans Jürgen
Spektrum der Wissenschaft - Sterne und Weltraum,
3/2011, S. 42-52, "Wie entwirft man ein Radioteleskop?"
Bezugsmöglichkeit:
<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wie-entwirft-man-ein-radioteleskop/1064254>
- Ref.5.3 Wielebinski, Richard et al.
Spektrum der Wissenschaft - Sterne und Weltraum,
9/2012, S. 36-45, "Radioteleskop Effelsberg"

Danksagung

Vordergründig möchte ich Herrn Talanow für die Betreuung dieser Besonderen Lernleistung sowie für den stets interessant gestalteten Physik- und Astronomieunterricht danken, was maßgeblich entscheidend war, mich an diesen Fächern bei einer Suche nach einem geeigneten Thema zu orientieren.

Herrn Dr. Junkes gilt mein Dank besonders für die Möglichkeit, außerhalb der regulären Besucherzeiten im Rahmen einer Exkursion das Radioteleskop von Effelsberg zum Abschluss meiner Arbeit besuchen zu können und das Interesse, diese Besondere Lernleistung auf der Internetseite des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie Bonn zu veröffentlichen.

Auch meinen Eltern danke ich für ihr Verständnis hinsichtlich zurückgestellter familiärer Interessen in den Ferien.

Eigenständigkeitserklärung

Ich, Clemens Wolf, erkläre hiermit, dass ich diese Besondere Lernleistung selbstständig angefertigt und nur die im Quellenverzeichnis angeführten Bezugsnachweise verwendet habe.

Ort und Datum, Unterschrift

