Waves in Motion:

Exploring the Forces behind Sound, Light, and more!

Shane Wilmes
2024/25
6C2

Waves in Motion -

Exploring the Forces behind Sound, Light, and more!

Shane Wilmes
2024/25
6C2

© Shane – Picture generated by ChatGPT

1.Prolog

Für meine diesjährige persönliche Arbeit habe ich mich für ein spannendes und faszinierendes Thema entschieden: **Wellen**.
Viele Menschen denken bei diesem Wort wahrscheinlich an Meereswellen am Strand. Doch Wellen sind viel mehr – sie kommen in vielen Bereichen unseres Lebens vor, sogar im Weltall und spannenderweise sind die meisten eigentlich unsichtbar für das menschliche Auge.

Auf das Thema bin ich zum ersten Mal im letzten Jahr bei meinem TraPe mit dem Titel ‚Black Hole Hunters - Die Jagd nach unsichtbaren Giganten im Universum' gestoßen. Der Begriff „Wellen" kam öfters darin vor, doch das Verständnis dieses Phänomens war relativ komplex. Viele Fragen blieben offen und meine Neugierde war geweckt.

Ein weiterer Grund für mein Interesse waren diverse Erlebnisse mit meiner Mutter. Während den Autofahrten beklagte sie sich regelmäßig über Kopfschmerzen, besonders wenn mehr als ein Handy in Betrieb war. Auch dies weckte meine Neugierde und ich habe mich gefragt, ob es einen Zusammenhang gibt zwischen Handys und den Strahlen, welche diese aussenden.

Bei meinen Recherchen habe ich viel über unterschiedliche Wellen erfahren können und setzte dies in den Mittelpunkt meines diesjährigen TraPes. Folgenden Fragen will ich besonders auf den Grund gehen:

- Was sind eigentlich Wellen?
- Ist Welle gleich Welle?
- Wo gibt es Wellen?
- Existieren sie auch im Weltall?
- Wie breiten sie sich aus und können sie durch Medien ‚fließen'?
- Können diese unsichtbaren Wellen für das menschliche Auge sichtbar werden?

Ich bin mir bewusst, dass dies ein sehr umfangreiches Thema ist, aber ich habe mir die Wellenarten ausgesucht, die ich am spannendsten finde. Denn Wellen sind heutzutage ein bedeutsamer Bestandteil unseres Lebens, sie umgeben uns auf Schritt und Tritt. Vom Licht, das wir zum Sehen brauchen, zum Schall, den wir zum Hören brauchen und sogar das Internetsignal, welches wir zum Benutzen des Internet brauchen.

Wellen begegnen uns im Alltag somit viel öfter, als wir denken – doch wir nehmen nur einen kleinen Teil davon wirklich wahr.

In meiner Arbeit möchte ich euch jetzt auf eine spannende Reise über Wellen mitnehmen.

Viel Spaß beim Lesen – und bleibt immer auf der Wellenlänge der Wissenschaft!

https://www.youphysics.education/wp-content/uploads/Ondas-Featured.jpg

Inhaltsverzeichnis

1. Prolog ……..… 4

2. Was ist eigentlich eine Welle? Definition ……..… 9

3. Welle ist nicht gleich Welle -
Diverse Arten von Wellen ……..… 12
a) Mechanische Wellen ……..… 12
b) Elektromagnetische Wellen ……..… 13
c) Gravitationswellen ……..… 14

4. Ausbreitungsarten von mechanischen Wellen ……..… 15
a. Transversale Wellen ……..… 15
b. Longitudinale Wellen ……..… 16
c. Ständige Wellen …….. 16
d. Stehende Wellen ……. 17

4.1. Erstaunliches zur Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen
in unterschiedlichen Medien ……..……..…….. 18
(a) Schallwellen ……..……..... 18
(b) Lichtwellen ……..…… 20
(c) Die ‚schnellen' Wellen! ……..…… 21

5. Die Unendlichkeit der Wellen im Weltraum ……..…… 22
A. Arten von Wellen im Weltall ……..…… 22
A.A. Elektromagnetische Wellen ……..…… 22
A.B. Gravitationswellen ……..…… 24
B. Nutzung von Wellen im Weltraum ……..…… 25
B.A. Infrarotstrahlung ……..…… 25
B.B. Mikrowellenhintergrundstrahlung ……..…… 25

C. Messung von Wellen im Weltall ……. 25
C.A. Elektromagnetische Wellen ……. 25
C.B. Die Gravitationswellen-Detektoren Ligo und Virgo ……. 27

30
30
36

6. **Visualisierung von Wellen anhand diverser Experimente** ……..…
   I. Experiment: Die Musik wird zum Spektakel für unsere Augen ……..
   II. Experiment: Unsere Augen sehen den Sound ……...…….…
   III. Experiment: Wellen für Augen und Ohren ……...…….

7. **Schlusswort und meine persönlichen Erkenntnisse** ……..…

8. **Bibliografie** ……..…

2. Was ist eigentlich eine Welle?

Eine Welle definiert sich durch eine **räumliche und zeitliche Zustandsänderung** von physikalischen Größen, welche periodisch verlaufen. Es handelt sich um eine

Ausbreitung/**Transport von Energie** in Form von Schwingungen, welche sich durch ein Medium oder Vakuum überträgt, ohne dass dabei die Materie selbst bewegt wird.

Eine Welle kann somit als eine **Störung** in einem Medium angesehen werden.

Zur Veranschaulichung kann man sich eine Welle in Form von Auf- und Ab Elementen vorstellen, welche in ihrer Form und Anordnung nicht zufällig schwingen, sondern einem **festgelegten Muster** folgen. Und dieses Muster zeigt uns, wie die Teilchen des spezifischen Mediums, in dem sich die Welle ausbreitet, auf und ab schwingen.

Merkmale einer Welle

a) **Energieübertragung**: Eine Welle transportiert Energie von einem Ort zum anderen, aber nie Material.
b) **Schwingung:** Eine Welle entsteht durch die Schwingung von Teilchen oder Feldern, die sich im Raum ausbreiten.
c) **Ausbreitung**: Wellen breiten sich in alle Richtungen oder entlang bestimmter Richtungen aus (z. B. im Fall von Wasserwellen).
d) **Medium oder Vakuum**: Wellen können sich in verschiedenen Medien (z. B. Luft, Wasser, Feststoffe) oder im Vakuum (z. B. Lichtwellen) fortbewegen.

Eigenschaften einer Welle

Die Eigenschaften der Welle werden durch ihre Amplitude, ihre Periode/Schwingungsdauer, ihre Frequenz, ihre Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit definiert:

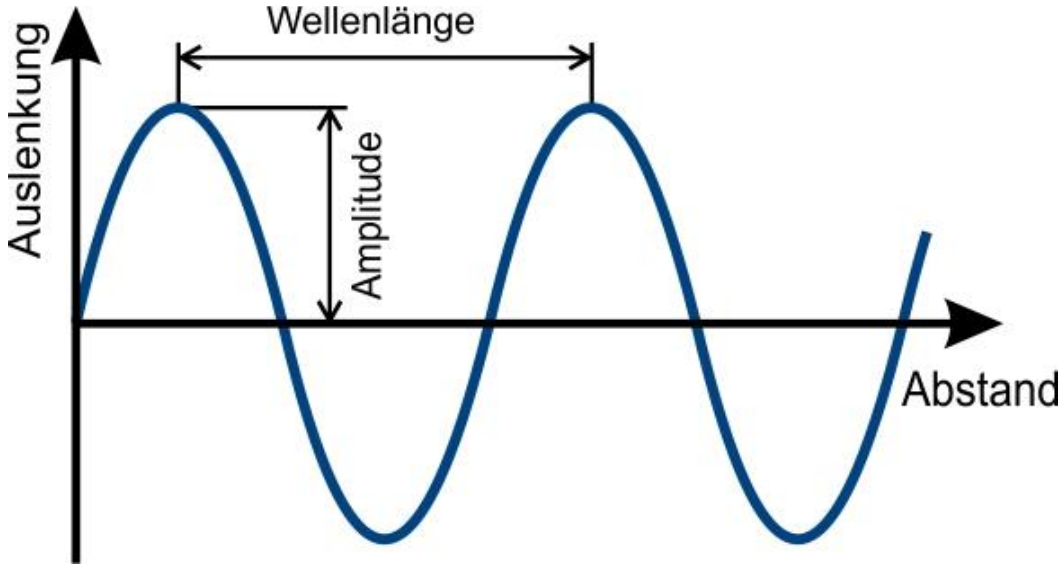
a. Frequenz
Die Frequenz einer Welle gibt an, wie oft eine Schwingung in einer bestimmten Zeitspanne (meist pro Sekunde) auftritt. Sie wird in Hertz (Hz) gemessen.
Eine höhere Frequenz bedeutet mehr Energie, während eine niedrigere Frequenz weniger Energie trägt

b. Wellenlänge
Die Wellenlänge gibt die räumliche Periode der Welle an. Sie ist der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen. Sie wird in Metern oder Nanometern gemessen und ist umgekehrt proportional zur Frequenz: Je kürzer die Wellenlänge, desto höher die Frequenz und damit auch die Energie der Welle.

c. Amplitude
Die Amplitude einer Welle beschreibt die maximale Auslenkung der Welle während ihres Ruhezustands. Sie gibt somit den vertikalen Abstand zwischen Hoch- oder Tiefpunkt der Welle, vom Nullpunkt aus gesehen, an. Die Amplitude legt eine Grenze fest, in welcher die Auf- und Ab-Elemente der Welle gefangen sind.

d. Periode oder Schwingungsdauer
Dies stellt die Zeit dar, welches jedes einzelne Teilchen der Welle für eine volle Schwingung benötigt. Das beschreibt die zeitliche Periode einer Welle oder ihren Kehrwert Frequenz.

e. Ausbreitungsgeschwindigkeit
Sie gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich die Störung über den Wellenträger ausbreitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle hängt mit ihrer Wellenlänge und der Frequenz zusammen.



Bildquelle:https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d10693/Wellenl%c3%a4nge-Wellenl%c3%a4nge.jpg
©https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d13802-2/*/*/Wellenl%c3%a4nge?op=Wiki.getwiki&search=MPP

Einige Größen zur Beschreibung einer Welle:

Symbol	Wissenschaftlicher Begriff	Bedeutung/Erklärung	Formel
f	Frequenz	Anzahl (N) von Wiederholungen der Schwingungsperioden pro Zeiteinheit (t), also pro Sekunde	$f = \frac{N}{t}$

T	Periode oder Schwingungsdauer	Zeitdauer einer Wiederholung einer Schwingung	
Hz	Hertz	Maßeinheit der Frequenz, also die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde (s)	$1\,Hz = \frac{1}{s}$
		Frequenz und Periode (T) sind jeweils Kehrwerte	$f = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$
λ v	Wellenlänge Ausbreitungs-geschwindigkeit	Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich durch Wellenlänge mal Frequenz	$v = \lambda \cdot f$

Wissenswertes…

Scanne den nachfolgenden QR-Code für zusätzliche Informationen und schau dir das detaillierte Video und die aufschlussreiche Animation, welche du selbst manipulieren kannst, zu den Größen einer Welle an. (LEIFIphysik 2025)

3. Welle ist nicht gleich Welle – Diverse Arten von Wellen

a) Mechanische Wellen

Diese benötigen ein Medium (z. B. Luft, Wasser oder Feststoffe, wie Metall, Holz etc.), um sich auszubreiten.

- **Schallwellen:**
  Eine **Schallwelle** ist die Ausbreitung von Druckschwankungen im Raum, ausgelöst durch ein Schallereignis. Es handelt sich um eine Welle die sich in der Luft, im Wasser und in Festkörpern ausbreiten kann. In bestimmten Fällen kommt es zur Reflexion, zum Beispiel an einer Wand, die als Echo oder auch als Verstärkung des Schalls wahrgenommen werden kann. Schallwellen werden durch die Vibration der Luftteilchen erzeugt, deshalb können sie sich z.B. in einem Vakuum nicht ausbreiten.

- **Wasserwellen:**
  Meereswellen entstehen normalerweise durch Wind, der übers Wasser weht und ihm dadurch Energie zuführt. Die Energie versetzt Wassermoleküle in Bewegung und breitet sich in Wellenform im Wasser aus.

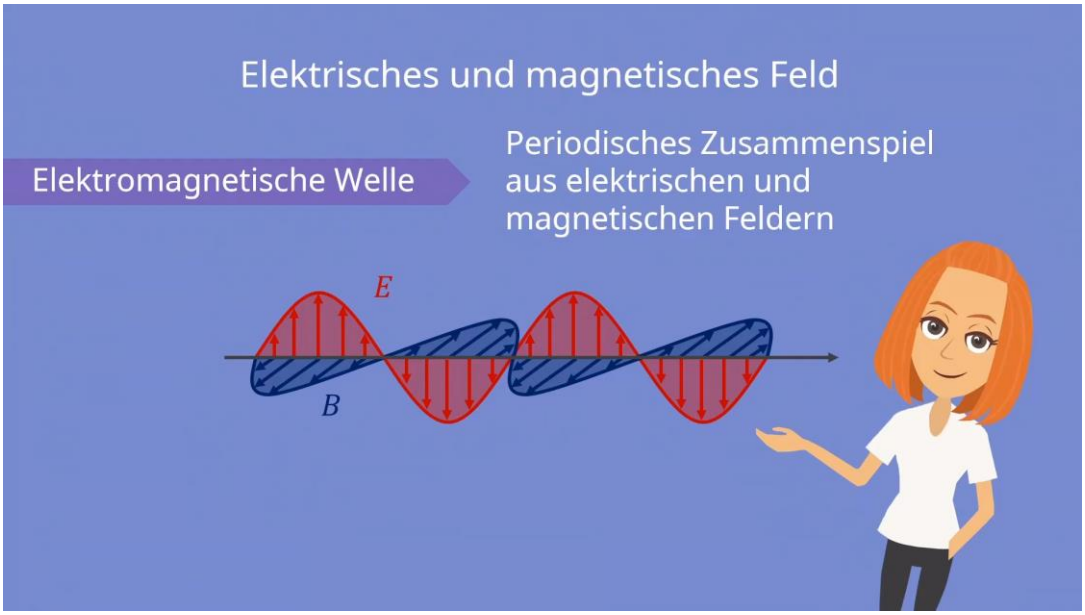
- **Erdbebenwelle:**
  Ein Erdbeben besteht aus einer Welle, welche sich durch die Erde ausbreitet.

Bei der Erzeugung einer mechanischen Welle wird die periodische Bewegung des Teilchens im Medium auf die benachbarten Teilchen übertragen. Die Teilchen sind somit ‚mechanisch' verbunden.

b) Elektromagnetische Wellen

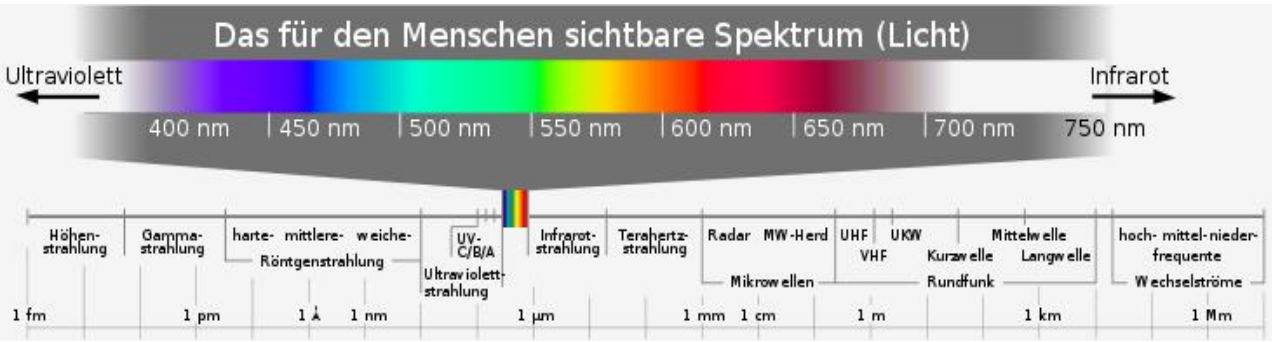
Diese können sich sowohl in einem Medium wie **Gase, Flüssigkeiten und Festkörpern** (z.B. Glasfasern) ausbreiten, als auch im **Vakuum**. Sie bestehen aus sich gegenseitig bewirkenden elektrischen und magnetischen Feldern und breiten sich nur im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ($3\ x\ 10^8\ \frac{m}{s}$) aus.

Bei der Erzeugung einer elektromagnetischen Welle führt ein elektrisches Feld, welches sich periodisch ändert, zu einem magnetischen Feld, welches sich gleichermaßen periodisch ändert und umgekehrt.



Video-Screenshot ©https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/elektromagnetische-wellen-2131?timestamp=0 (2025)

- **Licht:**
  Mit Licht wird die Strahlung des gesamten **elektromagnetischem Spektrums** bezeichnet, die mit dem menschlichen Auge wahrnehmbar ist. Jede elektromagnetische Welle besitzt eine Wellenlänge, zu der eine bestimmte Farbe assoziiert ist. Diese Beziehung zwischen Wellenlänge und Farbe wird durch das elektromagnetische Spektrum illustriert:



Spektrum elektromagnetischer Wellen. Der Bereich des für uns sichtbaren Lichts stellt lediglich einen winzigen Ausschnitt dar und reicht von Rot (750 nm) bis Violett (400 nm).
Bildquelle: https://www.sonnentaler.net/dokumentation/wiss/optik/weiter/spektrum/images/spektrum-3.jpg
© https://www.sonnentaler.net/dokumentation/wiss/optik/weiter/spektrum/ (November 2023)

- **Radiowellen:**
  Diese Wellen werden für die leitungslose **Übertragung von Sprache, Bildern und anderen Daten** wie z.B. zur Ortung (Radar), zur Navigation (GPS) oder beim Surfen im Internet verwendet. Sie breiten sich im Raum bei einer bestimmten Frequenz und Wellenlänge aus.

- **Mikrowellen:**
  Sie basiert auf elektromagnetischen Wellen **mit hohen Frequenzen**, welche die Moleküle anregen und so Erwärmung erzeugen.
  Diese Wellen ermöglichen es uns auch zu telefonieren und im Internet zu surfen.

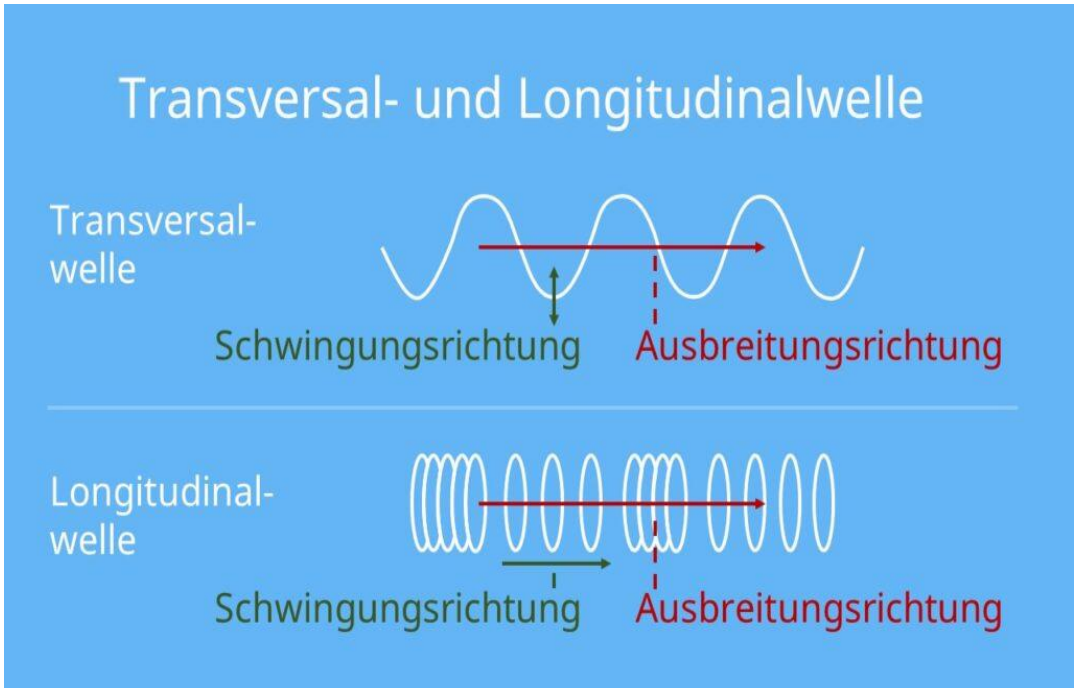
- **Röntgenstrahlung:**
  Sie sind elektromagnetische Strahlen, die mithilfe einer **Röntgenröhre** (hier bewegen sich Elektronen sehr schnell und treffen auf ein Metall, welches sie stark abbremst) technisch erzeugt werden können. Die Röntgenstrahlen fallen durch den Körper. Sie werden meistens in der Medizin zur Untersuchung eines Bruchs oder ähnlichem verwendet.

c) Gravitationswellen

Gravitationswellen sind Wellen in der **Raumzeit,** die durch beschleunigte Massen, besonders durch kollidierende Schwarze Löcher, erzeugt werden. Sie breiten sich mit **Lichtgeschwindigkeit** aus und können durch Krümmung der Raumzeit, die sie verursachen, gemessen werden.

4. Ausbreitungsarten von mechanischen Wellen

Mechanische Wellen sind entweder transversal oder longitudinal. Transversalwellen sind stets langsamer als Longitudinalwellen.



Video-Screenshot © https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/transversalwelle-6799

a. Transversale Wellen

Transversale Wellen sind Wellen, bei denen sich die **Teilchen senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung** bewegen.

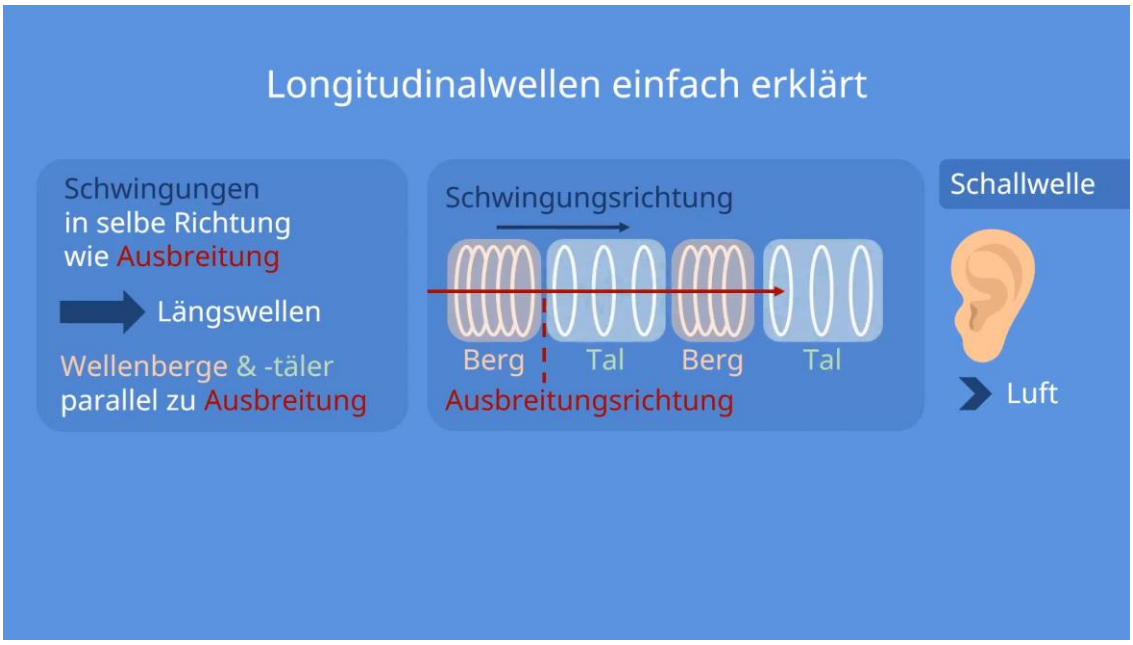
In der Natur entstehen sie ausschließlich an Oberflächen, also in zwei Dimensionen, wie z.B. Wasserwellen, Lichtwellen, Erdbeben, u.ä., während sie sich innerhalb von Gasen und Flüssigkeiten nie ausbreiten können.

b. Longitudinale Wellen oder Längswellen

Eine longitudinale Welle, ist eine Welle, bei der die **Schwingungen des Mediums parallel zur Ausbreitungsrichtung** der Welle verläuft und die Verschiebung des Mediums in die gleiche Richtung wie die Ausbreitungsrichtung der Welle erfolgt.

In der Natur entstehen sie in drei Dimensionen, wie z.B. Schallwellen in der Luft, eine unterirdische Erdbebenwelle, und können sich auch in Flüssigkeiten oder Gasen ausbreiten. Innerhalb eines Festkörpers sind die **Längswellen sogar schneller als die Transversalwellen**.

Die Wellenberge und -täler verlaufen in Ausbreitungsrichtung. An den Wellenbergen entsteht somit eine Verdichtung des Mediums, während es an den Wellentälern zu einer Verdünnung des Mediums kommt. Deshalb spricht man bei einer Längswelle auch von einer **Druckwelle.**



©https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/longitudinalwelle-6802 (2025)

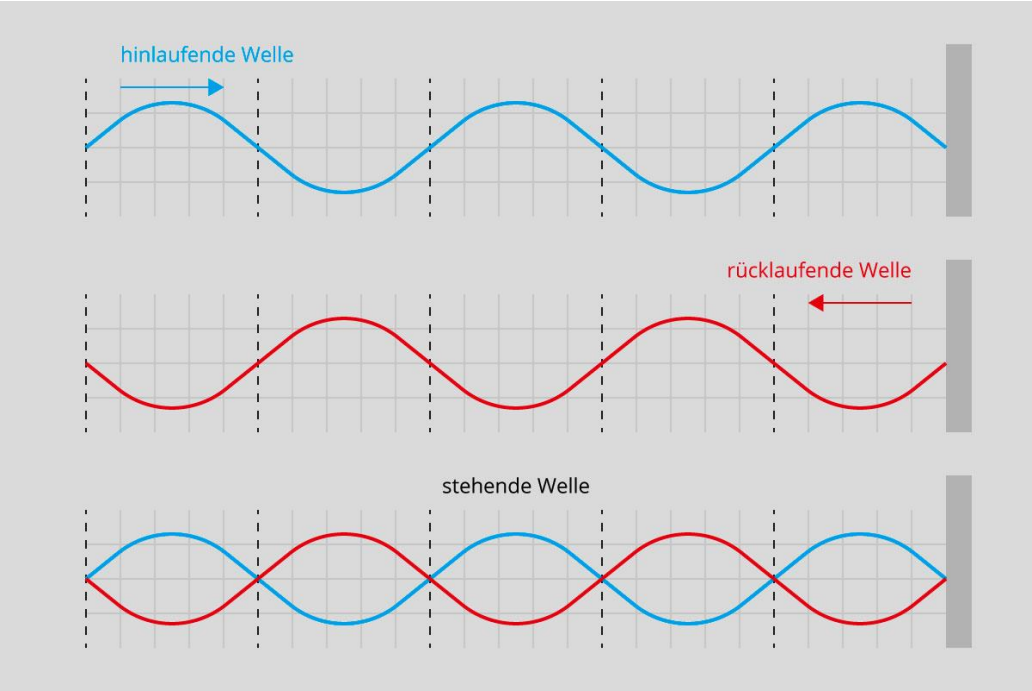
c. Ständige Wellen

Wellen, die **ohne Veränderung ihrer Form** über längere Distanzen fortschreiten.

d. Stehende Wellen

Sie können bei **Überlagerung** von zwei Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude entstehen, welche sich in entgegengesetzter Richtung bewegen. Die resultierende Welle schwingt zwar noch auf und ab, aber scheint sich nicht mehr von links nach rechts oder umgekehrt zu bewegen. Dies erweckt den Schein, als ob sie im Raum ‚stehen' würde.
Mikrowellen, Laser und Musikinstrumente gehören zu den Stehenden Wellen.

Bei der **Musik** versetzen diese Stehenden Wellen die umgebende Luft in Schwingung, wodurch Schallwellen entstehen, welche von unseren Ohren erfasst werden.



Bildquelle:https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ8mpgPAu_CZqP_7-VJ1tQEnpVwW64lkfVbMw&s
© https://www.monacor.de/magazin/raummoden

4.1. Erstaunliches zur Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen in unterschiedlichen Medien

(a) Schallwellen

Schall ist eine Vibration. Schallwellen breiten sich durch ein Medium aus, indem sie Moleküle des Mediums in Schwingung versetzen.
Ihre Geschwindigkeit hängt stark von diversen Faktoren wie Dichte, Luftdruck, Temperatur und Dehnbarkeit des Mediums ab.

Bei Festkörpern spielt die Elastizität eine wichtige Rolle, während bei Gasen und Flüssigkeiten die Viskosität/Zähigkeit ausschlaggebend ist.

- **Luft:** Schall breitet sich im Durchschnitt mit etwa 343 m/s aus, bei einer Temperatur von 20^0 C und trockener Luft. Jedoch gilt es zu bemerken, dass die Temperatur die Geschwindigkeit des Schalls deutlich verändert.

- **Wasser:** Im Wasser ist die Schallgeschwindigkeit schneller, etwa 1.480 m/s, weil Wasser dichter ist als Luft.

- **Wasser bei 0^0C (Eis):** 1407 m/s

- **Wasserdampf: 477 m/s**

- **Glas:** In einem festen Glas breiten sich Schallwellen mit etwa 5.000 m/s aus, da Glas eine höhere Dichte und Stabilität hat.

- **Metall (z.B. Eisen oder Stahl):** Schall breitet sich mit ca. 5.100 m/s aus, da Metalle sehr dicht sind.

- **Holz:** Die Schallgeschwindigkeit im Holz variiert, je nach Art und Richtung, aber liegt normalerweise bei etwa 1.500 bis 4.500 m/s.

Fazit: Schallwellen bewegen sich **schneller in dichteren und elastischeren Medien**.

Anmerkung:

Faszinierendes…

Hier noch eine interessante Anekdote aus der Geschichte des 2. Weltkrieges.

(b) Lichtwellen

Licht breitet sich in unterschiedlichen Medien mit verschiedenen Geschwindigkeiten aus, da die Lichtwellen durch das Medium hindurch "verlangsamt" werden, je nachdem, wie das Medium die Lichtstrahlen durchlässt.

- **Luft:** In Luft bewegt sich Licht fast mit der maximalen Geschwindigkeit von ca. 299.792 km/s.

- **Wasser:** Die Lichtgeschwindigkeit im Wasser beträgt etwa 225.000 km/s, da Wasser eine höhere Brechzahl hat, die das Licht langsamer macht.

- **Glas:** Im Glas liegt die Lichtgeschwindigkeit bei etwa 200.000 km/s, abhängig von der Art des Glases und seiner Brechzahl. Bei Milchglas ist die Brechzahl größer, also dringt weniger Licht durch als normalerweise.

- **Metall:** In Metallen wie Kupfer oder Eisen wird das Licht extrem abgebremst, da Licht Metall nicht durchdringen kann.

Fazit:

- **Licht** bewegt sich langsamer in dichteren Medien mit höherer Brechzahl und in Metallen aufgrund der starken Wechselwirkungen mit Elektronen.
- **Schallwellen** sind in festen Medien (z.B. Glas, Metall) deutlich schneller als in Luft, während Licht in diesen Medien stark verlangsamt wird, besonders in Metallen.
- Die **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum** ist die höchste bekannte Geschwindigkeit und wird nur durch spezielle Materialien, wie Metalle, stark reduziert.

Anmerkung:

Die **Brechzahl** oder der Brechungsindex ist ein Maß dafür, wie stark ein Medium das Licht verlangsamt, wenn es hindurchgeht.

Ein **Vakuum** ist ein Raum, in dem sich keine Teilchen befinden. Dort gibt es keine Gase, keine Flüssigkeiten und keine Feststoffe. In einem Vakuum herrscht ein sehr niedriger Druck. Vakuum kann sowohl in einem geschlossenen Raum als auch im Weltraum existieren.

km/s = Kilometer pro Sekunde

(c) Die ‚schnellen' Wellen!

Die Brechung von Wellen beim Übergang in ein anderes Medium kann durch das **Fermat-Prinzip**, oder Minimalprinzip, beschrieben werden, das besagt, dass Wellen immer den Weg nehmen, bei dem die benötigte Zeit minimal ist.
Dies ist auch die Grundlage des **Gesetzes der Lichtbrechung** z.B.**,** welches die Änderung der Richtung von Licht beschreibt, wenn es von einem Medium in ein anderes übergeht.

Zur Veranschaulichung hier zwei Beispiele:

1.Beispiel : ein Auto, welches auf einer asphaltierten Straße in einer Wüste fährt, und vom Weg abkommt

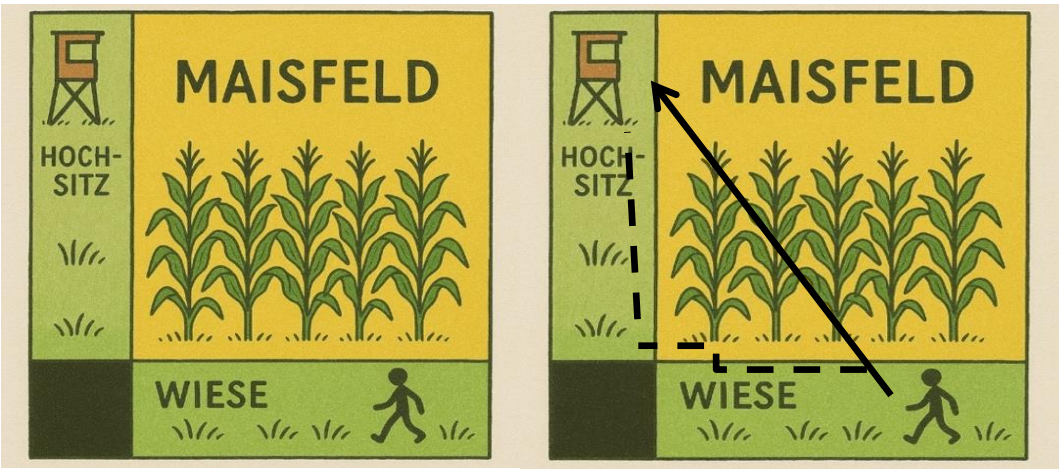
Wenn das Auto mit gleicher Geschwindigkeit die Grenze zwischen der asphaltierten Straße und dem sandigen Wüstenuntergrund mit einem Rad überschreitet, dreht dieses durch. Und aufgrund der Änderung des Widerstands wird es eine andere Richtung einschlagen und das zweite Rad nachziehen.

2.Beispiel : ein Mann will zu seinem Freund auf dem Hochsitz

Abb.1: Der Mann möchte zu seinem Freund auf dem Hochsitz gehen. Er ruft: „ Ich bin bald bei dir.“

Abb. 2: Der Mann geht Querfeld ein durch das Maisfeld. (schwarzer Pfeil), während die Schallwellen seines Rufes sich den kürzesten und hindernislosesten Weg aussuchen (gestrichelte Linie).

Abb. 1 Abb. 2



© Shane - generated by ChatGPT

5. Die Unendlichkeit der Wellen im Weltraum

Wellen im Weltall: Arten, Nutzung und Messung

Wellen im Weltraum spielen eine entscheidende Rolle für das **Verständnis des Universums**. Sie sind nicht nur ein Werkzeug der Astronomie und der modernen Physik. Von elektromagnetischen Wellen bis hin zu Gravitationswellen – die Vielfalt und Bedeutung dieser Wellen ist enorm.

A. Arten von Wellen im Weltall

Im Universum existieren unterschiedliche Arten von Wellen, die sich durch den Raum ausbreiten. Die bekanntesten und am intensivsten untersuchten Wellenarten sind:

A.A. Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen sind die häufigsten Wellen im Weltall. Sie sind die **Träger von Licht** und anderen Formen von Strahlung. Diese Wellen breiten sich mit **Lichtgeschwindigkeit** durch den Raum aus und umfassen:

- **Sichtbares Licht**:
  Dies ist der Bereich des elektromagnetischen Spektrums, den das menschliche Auge wahrnehmen kann. Es hat Wellenlängen von etwa 400 nm (violett) bis 700 nm (rot).

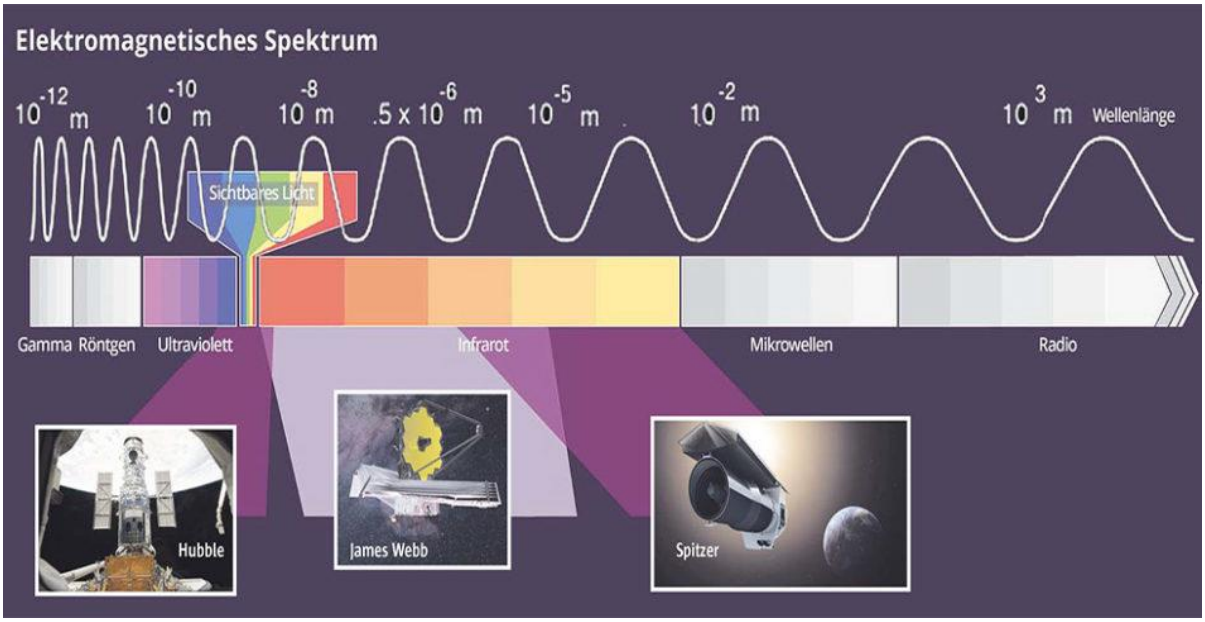
- **Ultraviolett (UV)**:
  Diese Wellenlängen sind kürzer als sichtbares Licht und reichen nur von 10 nm bis 400 nm.

- **Infrarot:**
  Hier findet man längere Wellenlängen als sichtbares Licht, von etwa 700 nm bis 1 mm. Infrarotstrahlung wird oft genutzt, um die Temperatur von Objekten zu messen.

- **Röntgenstrahlen und Gamma-Strahlen**:
  Diese Wellen haben sehr hohe Frequenzen und werden von heißen, energiereichen Himmelskörpern wie Schwarzen Löchern und Neutronensternen emittiert.

- **Radiowellen**:
  Diese langwelligen Strahlen haben Wellenlängen von mehreren Millimetern bis zu vielen Kilometern. Sie werden häufig verwendet, um Signale aus fernen Galaxien zu empfangen.

Die Wellenlänge bestimmt, welche Objekte ein Teleskop im Weltraum beobachten kann. Als Faustregel gilt: Je größer die Wellenlänge - oder je weiter im roten Farbbereich– desto älter sind die beobachteten Objekte.
Das **James-Webb-Teleskop** misst im nahen Infrarotbereich, **Spitzer** war ein Infrarotteleskop der NASA, **Hubble** misst vor allem sichtbares Licht.



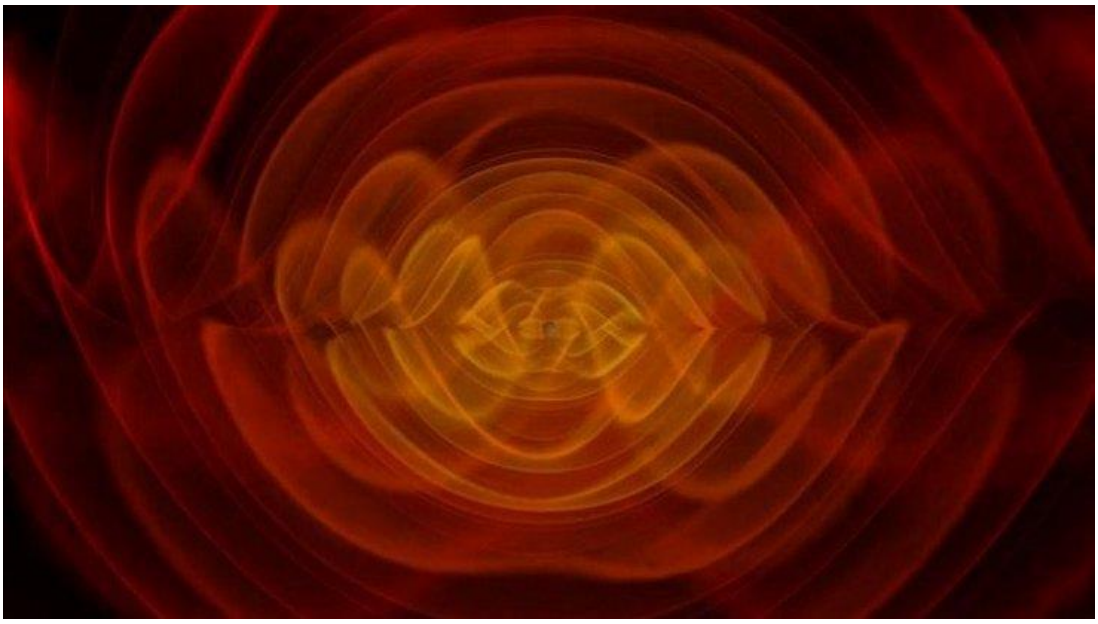
Bildquelle: https://www.vdi-nachrichten.com/wpcontent/uploads…tromagnetischesSpektrumVDIn2021no37_980x500px.jpg
© Foto: NASA/JPL/Caltech/Northrop Grumman (2021)

Anmerkung:

Nm = Nanometer

A.B. Gravitationswellen

Gravitationswellen sind eine besondere Form von Wellen, die durch die Verzerrung der Raumzeit entstehen. Diese Wellen werden durch **extreme Ereignisse** wie die Kollision von Schwarzen Löchern oder Neutronensternen erzeugt. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und **transportieren Informationen** über die Quellen ihrer Entstehung. Gravitationswellen wurden erstmals 2015 direkt nachgewiesen und bieten eine neue Möglichkeit, das Universum zu erforschen.



Simulation von Gravitationswellen
Bildquelle:
https://www.weltderphysik.de/fileadmin/_processed_…ckbild_BlackHoleMerger_NASA_Henze_39b79d06b4.webp
© NASA

B. Nutzung von Wellen im Weltraum

Die verschiedenen Wellenarten im Universum haben mehrere Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere in der Astronomie und Astrophysik.

B.A. Infrarotstrahlung

Infrarotstrahlung wird zur **Messung der Temperatur** von Objekten im Universum verwendet.

B.B. Mikrowellenhintergrundstrahlung

Besonders bekannt ist die kosmische **Mikrowellenhintergrundstrahlung** (CMB), die als **Überbleibsel des Urknalls** gilt. Diese Strahlung, die im Mikrowellenbereich des Spektrums liegt, enthält wichtige Informationen über die Frühgeschichte des Universums und ermöglicht es, das Alter und die Entwicklung des Kosmos zu bestimmen. Mikrowellenhintergrundstrahlung ist der Überrest des ersten Lichts, das sich jemals durch das Universum bewegen konnte. Diese „fossile“ Strahlung, die ein Teleskop sehen kann, wurde kurz nach dem Urknall freigesetzt.

C. Messung von Wellen im Weltall

Die Messung von Wellen im Weltraum erfolgt mit speziellen **Instrumenten und Detektoren**.

C.A. Elektromagnetische Wellen

- **Radioteleskope**:
  Sie messen Radiowellen und andere Strahlungen. Sie sammeln Signale von fernen Galaxien und Sternen und werten sie anschließend aus.

- **Optische Teleskope**:
  Sie messen sichtbares Licht. Sie analysieren das Licht von Sternen und Planeten, um deren Zusammensetzung und Bewegung zu bestimmen.

- **Infrarot-Teleskope**:
  Sie erfassen Infrarotstrahlung, die von warmen Objekten oder hinter Staubwolken im Universum ausgestrahlt wird.

- **Röntgen- und Gamma-Teleskope**:
  Sie messen hochenergetische Strahlung von heißen und energiereichen Objekten wie Schwarzen Löchern und Neutronensternen.

Radioteleskope des Very Large Array in den USA. Mit diesen Teleskopen werden Radiowellen aus dem Weltraum untersucht.
Bildquelle:https://www.leifiphysik.de/sites/default/files/ima…d5ee92f755aa632489a1a4656a1546e/992VLA_KLEIN.webp

C.B. Die Gravitationswellen-Detektoren Ligo und Virgo

LIGO (‚Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory') und **Virgo** sind beide hochpräzise Gravitationswellen-Detektoren. Sie dienen der Messung winziger Raumzeit-Verzerrungen, die durch gewaltige kosmische Ereignisse wie die Verschmelzung Schwarzer Löcher oder Neutronensterne entstehen.

- **LIGO** betreibt zwei Observatorien in den USA (Hanford & Livingston), **Virgo** steht nahe der Stadt Pisa in Italien.

- Beide Detektoren arbeiten seit 2023 im Rahmen der **LIGO-Virgo-KAGRA-Kollaboration** mit internationalen Partnern, wie dem japanischen **KAGRA,** zusammen.

- Ziel ist es, Gravitationswellen zu erfassen und ihren Ursprung im Universum zu lokalisieren.

- Die erste direkte Messung gelang 2015 Wissenschaftlern an der Caltech (USA), wofür 2017 LIGO der **Nobelpreis für Physik** vergeben wurde.

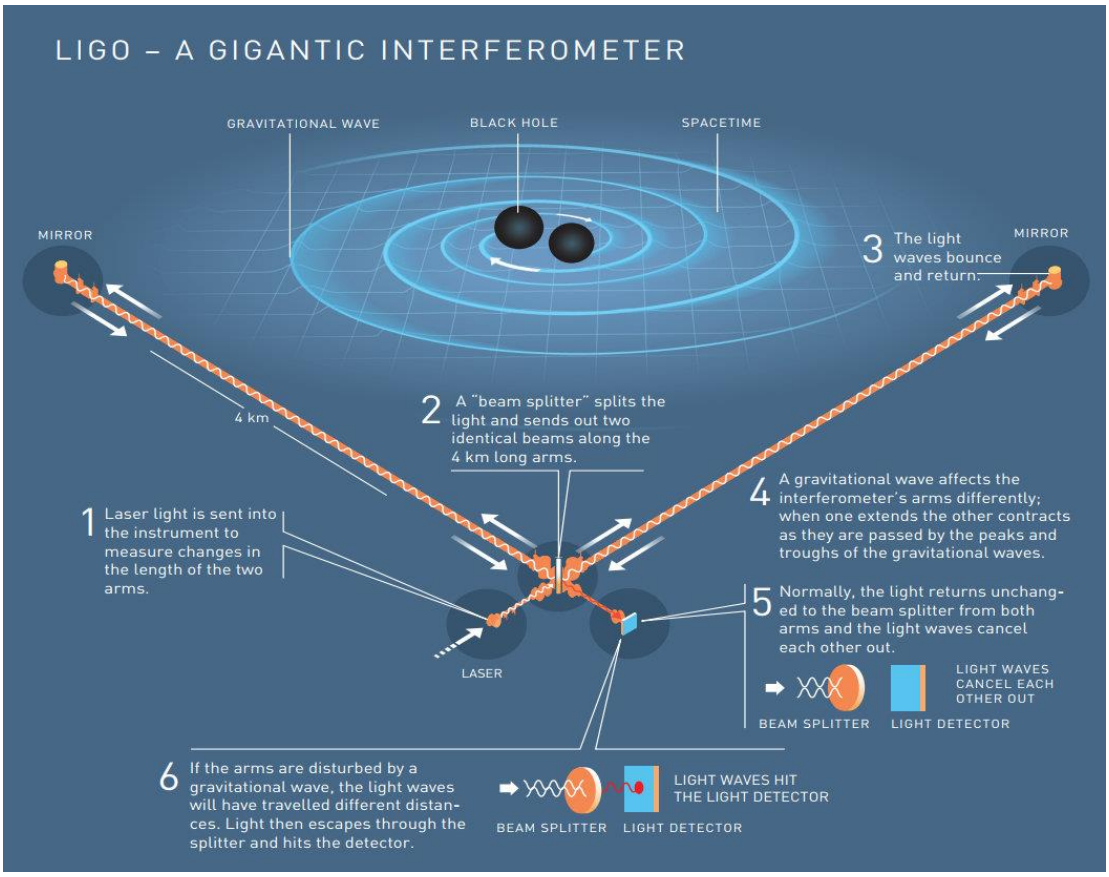
- Sie eröffnen eine neue Ära der Astronomie – die **Gravitationswellenastronomie**.

Bilder der Instrumente des aktuellen weltweiten Netzwerks der Gravitationswellen-Detektoren. Von oben nach unten und von links nach rechts: Ligo Hanford, Ligo Livingston, Virgo, Kagra, Geo600
© LIGO Hanford, LIGO Livingston, Virgo, KAGRA, GEO600
Bildquelle:https://www.mpg.de/20359840/original-1687358755.we…0MH0%3D--804c7813e0c5af3992e84d327f08589327eb05f8

Wie messen diese Detektoren die Gravitationswellen?

LIGO und Virgo arbeiten mit dem Prinzip der **Laserinterferometrie, d.h.** ein Laserstrahl wird in zwei Richtungen geschickt und in langen Vakuumröhren (3–4 km) an Spiegeln reflektiert. Diese Strahlen werden anschließend wieder zusammengeführt. Wenn eine Gravitationswelle die Raumzeit verändert, ändern sich minimal die Laufzeiten der Strahlen. Diese winzige Differenz verursacht ein verändertes **Interferenzmuster**, das gemessen werden kann.

Die gemessenen Längenänderungen sind extrem klein – weniger als ein Bruchteil eines Atomkerns. Um diese Präzision zu erreichen, müssen externe Störungen wie seismische Vibrationen oder thermisches Rauschen nahezu vollständig ausgeschaltet werden.



Bildquelle:https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSaq5vqlhuTrcJYaLnp6jwuKjyLZqsgzO_OAA&s
© https://phys.org/news/2019-05-ligo-virgo-neutron-star-smash-ups.html

Anmerkung:

Laserinterferometrie misst kleinste Längenänderungen, indem überlagerte Laserstrahlen Interferenzmuster erzeugen.

Interferenzmuster entstehen, wenn zwei oder mehr Wellen sich überlagern und dabei Verstärkungen oder Auslöschungen erzeugen.

Fazit:

Wellen im Weltraum sind nicht nur faszinierend, sondern auch extrem wichtig für die Erforschung des Universums.
Sie ermöglichen es uns, die Zusammensetzung von Himmelskörpern zu analysieren, die Temperaturverteilung im Kosmos zu messen und sogar die frühesten Momente des Universums zu verstehen und zu erforschen.
Ob es sich um elektromagnetische Wellen oder Gravitationswellen handelt – die Messung und Analyse dieser Wellen eröffnet ständig neue Einblicke und Perspektiven auf das Universum und sein Geheimnis.

6. Visualisierung von Wellen anhand diverser Experimente

I.Experiment: Die Musik wird zum Spektakel für unsere Augen

Benötigtes Material:

- ein Laserpointer
- ein Messbecher
- ein mittelgroßer Luftballon

- ein Spiegel von 2 cm²
- 1 langes Holz Brett (60 cm)
- 4 kleine Holz Bretter (21cm)
- grüne Farbe
- 1 Pinsel
- 1 Hammer
- 8 Nägel
- 5 Gummibänder
- ein doppelseitiges Klebeband
- ein Metermaß
- eine Musikbox
- ein Cutter
- eine Schere
- Schleifpapier
- weißes Laken (3x3m)
- C-Schraubzwinge
- 2 Stühle
- Holzblock

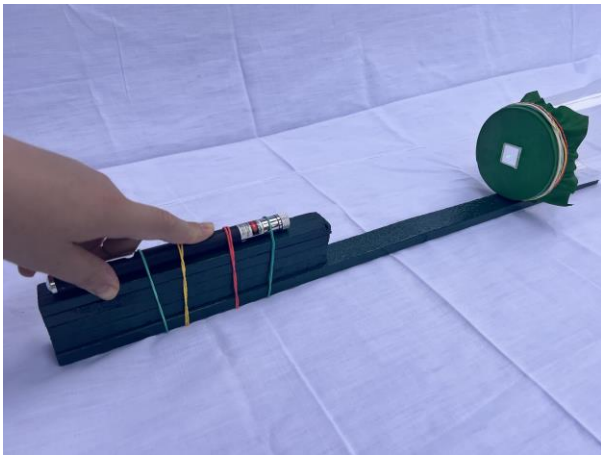
©Shane

Vorbereitung des Materials:

1. Ich platziere jeweils ein kleines Holzstück an einem Ende des langen Holzbrettes und befestige es mit Nägeln. Dies wiederhole ich, bis ich alle 4 kleinen Holzstücke aufeinander befestigt habe.

2. Jetzt streiche ich das ganze Holzteil mit grüner Farbe an.

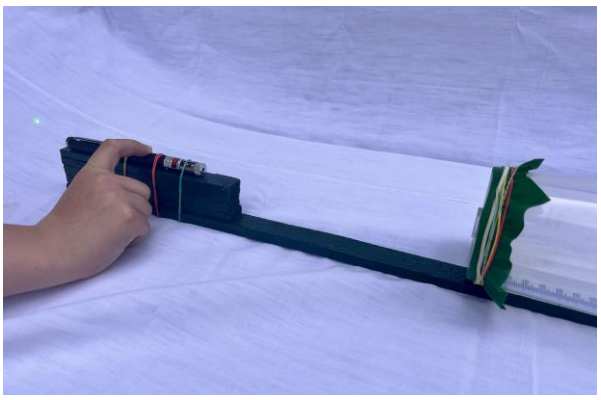
3. Anschließend schneide ich das untere Ende des Messbechers mit einem Cutter ab und halbiere den Luftballon längsseits mit einer Schere. Sodann stülpe ich den halben Luftballon über das abgeschnittene Ende des Messbechers und befestige ihn mithilfe der Gummibänder. Zuletzt ziehe ich den Luftballon noch so stramm wie möglich, ohne ihn auseinanderzureißen, und erhalte eine elastische Oberfläche. Nun befestige ich den Messbecher mit Nägeln am


©Shane

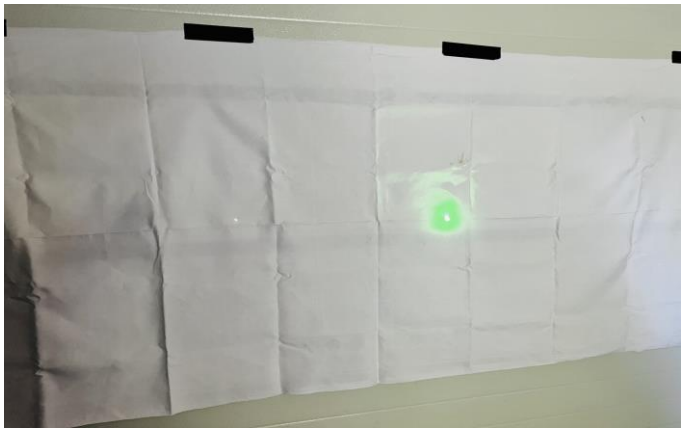
gegenüberliegenden Ende des langen Holzbrettes.

4. Im Anschluss klebe ich den Spiegel mit doppelseitigem Klebeband in die Mitte der elastischen Oberfläche.

5. Zuletzt lege ich den Laserpointer auf die Holzstücke, befestige ihn mit Gummibändern und zentriere ihn so lange bis der Laser die Mitte des Spiegels trifft.



6. Zur Kontrolle beobachte ich, ob der Spiegel den Laser auf das weiße Tuch reflektiert. Ich erkenne den grünen Punkt oben links im Bild und weiß somit, dass die Spiegelreflektion funktioniert.



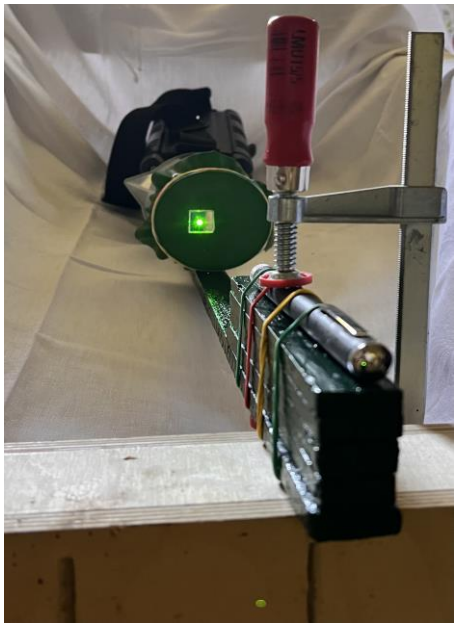
©Shane

Vorbereitung des Experiments:

7. Ich hänge ein weißes Laken an eine Wand und befestige es mit Klebeband.

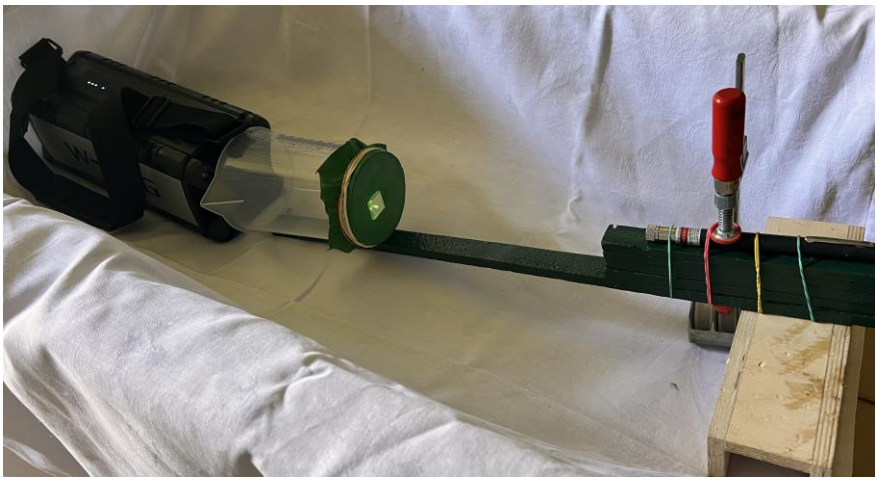
8. Ich platziere meine Laserkonstruktion auf 2 Stühlen und stelle das Ende mit dem Laser auf einen Holzblock, damit die Laserspiegelung in der Mitte des Lakens erscheint. Die Entfernung zwischen Laken und Stühlen beträgt 10m.

9. Nun stelle ich die Musikbox gegen die Öffnung des Messbechers.



©Shane

10. Damit der Laser angeschaltet bleibt befestige ich ihn mit einer C-Schraubschwinge.



©Shane

Ablauf des Experiments:

11. Ich starte mit ein paar Liedern mit einem durchdringenden Bass, wie z.B.: **We will rock you** (1977) und **Bohemian Rhapsody** (1975) von Queen.

12. Zum Vergleich höre ich mir noch 10 weitere Songs an und beobachte die Laserprojektionen auf dem Laken.

13. Anschließend versuche ich noch auf der App ‚Garage Band' ein paar Töne zu erstellen, welche expressivere Laser-Formen projizieren.

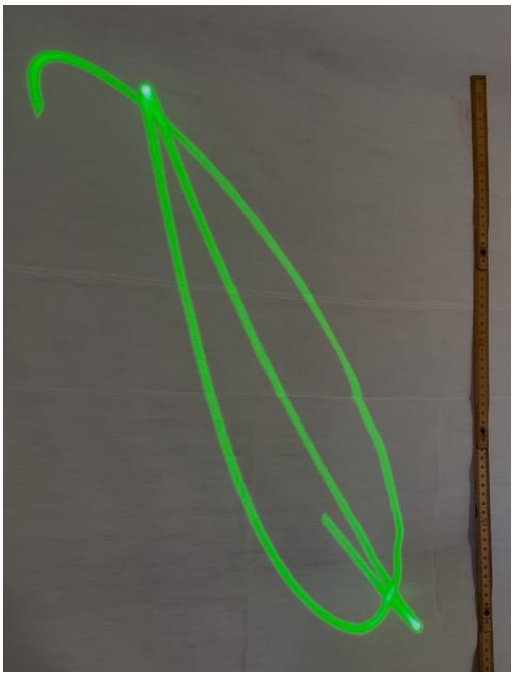
Beobachtungen während des Experiments:

14. Bei Gesang, bei der Snare-Drum und bei den Becken (Cymbals), sieht man nur geringe Laser-Formationen auf dem Laken, mit einem Durchmesser von ungefähr 3-5 cm.

15. Bei der Bass-Drum und dem Floor-Tom sieht man größer Figuren mit einem Durchmesser von ungefähr 20-50 cm. (siehe nebenstehendes Foto)

16. Je weiter die Entfernung des Lasers vom Laken, je größer die Projektionen. Umgekehrt heißt dies, je näher ich meinen Laser am Laken positioniere, je kleiner werden die Projektionen.

17. Bei meinen Versuchen auf der App ‚Garage Band' experimentiere ich mit den Noten ‚Re bemol, ‚Mi', ‚Re dim' und ‚Fa'. Die Projektionen sind sehr markant und herausstechend. (siehe nebenstehendes Foto) Diese Figur misst ungefähr 65 cm.



©Shane

18. Mithilfe einer App auf meinem Handy habe ich die Frequenzen zu verschiedenen Tönen gemessen. Bei den Frequenzen 262 Hz und 306 Hz sieht man folgende Formen:

262 Hz

306 Hz

©Shane

Erklärung des Experiments:

Die Schallwellen verlassen die Lautsprecherbox und treffen auf die Membran des Luftballons. Der Spiegel, welcher an der Membran befestigt ist, fängt an zu vibrieren. Da der Laserstrahl auf den Spiegel zentriert ist, projiziert dieser anschließend seine Vibrationen auf das Laken und diverse Figuren entstehen.

Schlussfolgerung:

Ich bin beeindruckt über den einfachen und problemlosen Verlauf des Experiments. Der Zusammenbau der ganzen Anlage hat mir viel Freude bereitet und als ich das Resultat sah, war ich einfach nur erstaunt. All diese unsichtbaren Schallwellen sind wahrlich ein Spektakel für die Augen.

II.Experiment: Unsere Augen sehen den Sound

Für dieses Experiment habe ich mich an den Chladni-Figuren vom deutschen Physiker und Astronom Ernst Florens Friedrich Chladni inspiriert.

Benötigtes Material:

- 1 Frequenzgenerator
- 2 große Nachttischlampen
- ein Becherglas
- Wasser
- 2 Stativstangen
- 2 Stativklemmen
- ein quadratisches weißes dickes und dünnes Stück Papier
- eine Lautsprecherbox mit einem roten und schwarzen Anschlusskabel
- 4 Hebeplatten
- 2 Stativfüße
- 2 Doppelmuffel
- 1 Handy

Vorbereitung des Experiments:

1. Zuerst fülle ich ein Becherglas zu einem Drittel mit Wasser.

2. Dann schließe ich die blaue Lautsprecherbox an den gelben Frequenzgenerator.

©Shane

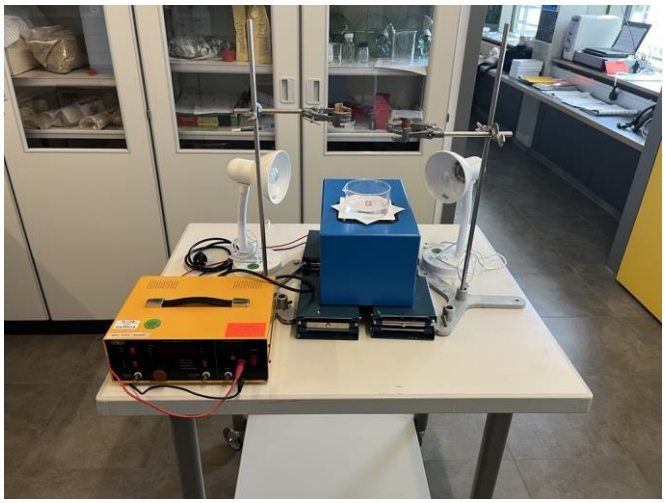
3. Nun lege ich ein dickeres Blatt auf dünnes Blatt und platziere beide auf den Lautsprecher.

4. Das Becherglas stelle ich auf das Papier.

5. Jetzt nehme ich die Stativstangen und befestige sie an den Stativfüßen. Ich wiederhole diesen Vorgang noch einmal.

6. Die Doppelmuffel fixiere ich auf mittlerer Höhe an den beiden Stativstangen.

7. Anschließend bringe ich jeweils zwei Stativklemmen an den beiden Doppelmuffel an.

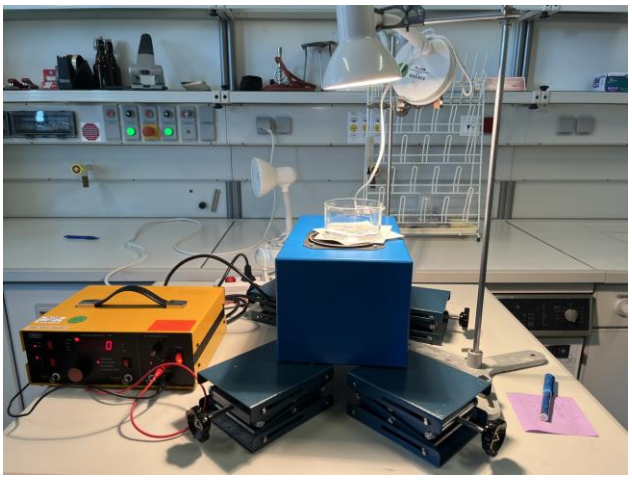


©Shane

10. Die Stativstangen-Konstruktion ist jetzt beendet und ich platziere beide jeweils seitlich am blauen Lausprecher.

11. Zum Schluss befestige ich eine Nachttischlampe an der Stativklemme, schalte sie ein und drehe sie solange in die korrekte Position bis der Lichtschein das Becherglas beleuchtet.

12. Die zweite Stativstangen-Konstruktion samt Nachttischlampe stelle ich hinter den blauen Lautsprecher.



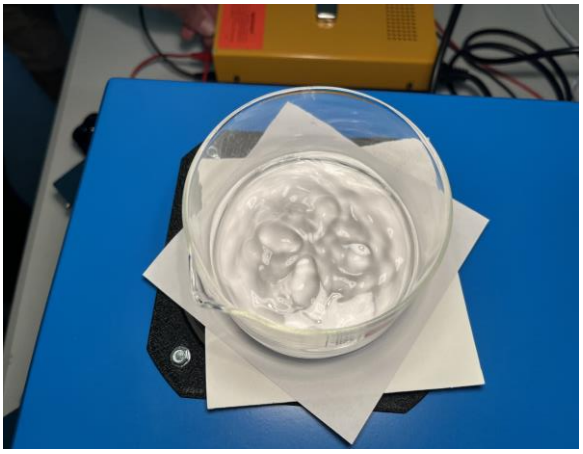
©Shane

Ablauf des Experiments:

13. Ich schalte den Frequenzgenerator jetzt ein und drehe das Rädchen für die Amplitude ein bisschen hoch.

14. Ich drehe langsam am Frequenzrädchen bis kleine Wellen-Formen auf der Wasseroberfläche im Becherglas sichtbar erscheinen.

15. Ich experimentiere mit unterschiedlichen Frequenzen, jedoch erhalte ich ein klares Wellenmuster bei folgenden Frequenzen:
    - ➔ 19hz
    - ➔ 14hz
    - ➔ 9hz
    - ➔ 7hz (siehe Foto)



©Shane

Beobachtungen während des Experiments:

16. Wenn ich die Frequenz zu hoch drehe, dann vibriert der Lautsprecher zu viel und das Becherglas bewegt sich. Um dies zu verhindern, muss ich beim Aufdrehen der Frequenz die Amplitude verringern.

17. Bei der Vorstellung vor einem größeren Publikum kann man das Handy mit einem Beamer koppeln, damit jeder das Experiment an einem größeren Bildschirm verfolgen kann.

18. **Aufpassen!!!! :** Wenn man den Frequenzgenerator einschaltet muss man darauf achten, dass die Amplitude auf null ist, sonst könnte man den Lautsprecher beschädigen.

Erklärung des Experiments:

Die Schwingungen der Membrane des Lautsprechers werden auf das Wasser übertragen. Bei verschiedenen Frequenzen entstehen somit unterschiedliche Wellenformen.
Stehende Wellen entstehen, wenn die Amplitude und die Frequenz gleich sind. Je höher die Frequenz, desto detaillierter werden die Muster auf dem Wasser.

Schlussfolgerung:

Für dieses Experiment benötigte ich einige spezielle Geräte, die man normalerweise nicht zu Hause besitzt. Deshalb führte ich dieses Experiment integral im Labor von LEM Science durch. Ich benötigte mehrere Stunden zum ‚korrekten' Aufbau des Experiments und es brauchte viele Versuche und Änderungen, respektiv Anpassungen, bis es so funktionierte, wie ich es mir vorgestellt habe.
Schlussendlich war es doch faszinierend zu sehen wie das Wasser ‚tanzte' und immerwährend neue Muster ‚zauberte'. Die Wellenformationen erschienen stets in einer perfekten Symmetrie, Form und Harmonie. Ich war sehr zufrieden mit meinem Resultat.

Spektakulär…

Scanne den nachfolgenden QR-Code und schau dir das Video zu meinem Experiment von Schallwellen an.

III.Experiment: Wellen für Augen und Ohren

oder wie ich elektromagnetische Wellen mit einem EMF-Messgerät erfassen kann.

Benötigtes Material:

- EMF-Messgerät (Detektor für ElektroMagnetische Felder)
- Handy
- Wifi Stecker
- Steckdose
- Radio
- Ofen

Durchführung des Experiments:

1. Ich schalte das EMF-Messgerät ein und gehe durch mein Haus auf der Suche nach Wellen, indem ich es gegen jedes Material halte, das mir begegnet.

2. Folgende Objekte interessieren mich besonders, und ich halte das EMF-Messgerät nacheinander an:
   - ➔ ein eingeschaltetes Handy
   - ➔ ein Wifi Stecker
   - ➔ ein Steckdose
   - ➔ ein Radio
   - ➔ einen Ofen

3. Ich notiere mir die verschiedenen Messwerte und trage sie zum Vergleich in die untenstehende Tabelle ein.

4. Hier sind die Fotos von meinen Messungen:

©Shane

an einer Steckdose

©Shane

am Ofen

©Shane

Beim Handy

Hier die Tabelle mit den Messwerten zum Vergleich:

Geräte	EF Wert	EMF Wert	RF Wert	Ergebnis
Handy	2 v/m	0,4 mG	665mW/m²	RF hoch
Steckdose	68 v/m	1,1 mG	0 mW/m²	EF hoch
Ofen	1 v/m	30,4 mG	0 mW/m²	EMF hoch
Radio	464 v/m	0,5 mG	2,9 mW/m²	EF hoch+

Anmerkung:

EF = Elektrisches Feld

EMF = Elektromagnetisches Feld

RF = Radio Feld

v/m = Volt pro Meter

mG = Milligramm

mW/m² = Milliwatt pro Quadratmeter

Beobachtungen und Schlussfolgerung:

Je näher das EMF an einem elektronischen Gerät ist, desto höher sind die Werte auf der Anzeige. Zusätzlich gibt das Gerät einen regelmäßigen und lauten Pieps-Ton ab, bei Werten ab ‚hoch'.

Dies bedeutet, dass die Anzeige in die Höhe schießt, je dichter die Wellen sind.

7. Schlusswort und meine persönlichen Erkenntnisse

Wellen begegnen uns überall – in der Bewegung des Wassers, im Klang unserer Stimmen, im Licht der Sonne. Doch oft nehmen wir sie gar nicht wahr.

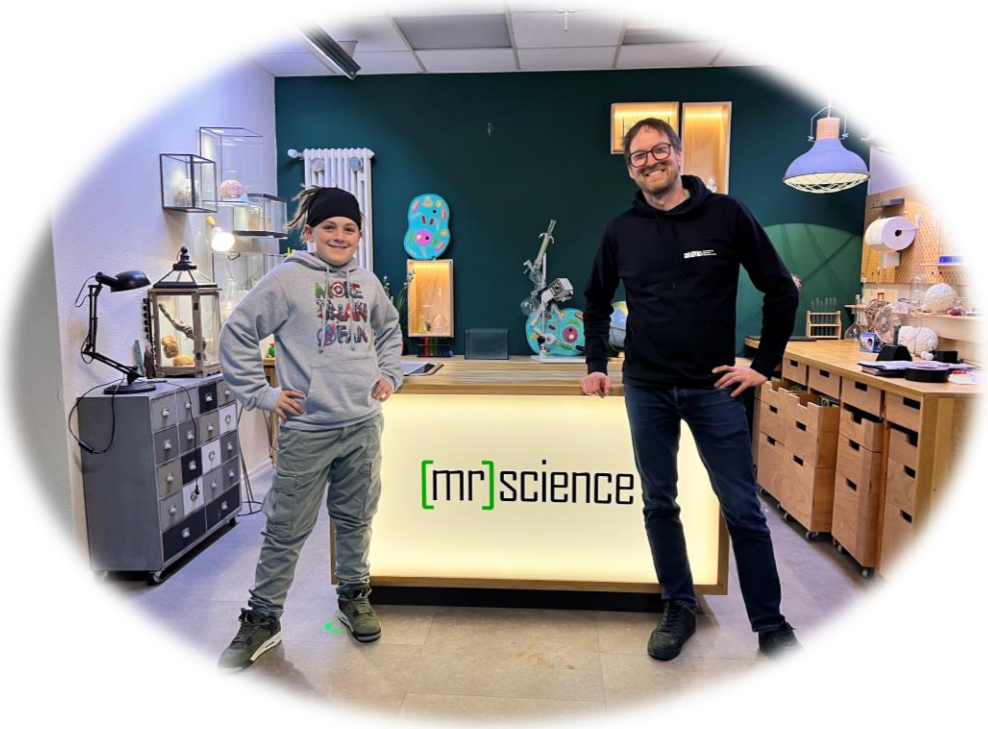
Erst durch diese Arbeit habe ich erkannt, wie sehr Wellen unser Leben ‚durchdringen'. Sie sind wie unsichtbare Fäden, die alles miteinander verbinden, von der Natur bis zur Technik und der Normalität. Was für mich anfangs kompliziert und theoretisch wirkte, wurde mit der Zeit verständlich und sogar faszinierend.

Diese Reise durch das Unsichtbare hat meinen Blick geschärft und mir gezeigt:

Manchmal liegt die Wahrheit verborgen in den Dingen, die man nicht sieht.

An dieser Stelle möchte ich allen Personen ganz herzlich danken, die mich bei diesem Thema über Wellen begleitet und unterstützt haben. Danke für eure Zeit, eure Hilfe, eure Geduld und die vielen interessanten Gespräche.

Einen ganz besonderen Dank gilt **Herrn Joseph Rodesch**, besser bekannt als *Mr Science*, vom Luxemburg National Research Fund. Ich fühlte mich geehrt, dass er mir einen Termin in seinem Labor ermöglichte, welches wirklich cool aussieht und einem ‚Spielplatz' für Wissenschaftler ähnelt.
Sein Brainstorming zu möglichen Experimenten zum Thema ‚Wellen' fand ich äußerst aufschlussreich. Großzügigerweise stellte er mir zudem das nötige Material zur Verfügung, welches ich für die Realisierung der Experimente benötigte.



Ein großes Dankeschön geht auch an **Herrn Jean Majerus**, unseren Physikprofessor bei LEM Science. Seine geduldige Art und seine vereinfachten und verständlichen Erklärungen waren eine Bereicherung für mich.

Ich danke auch ganz herzlich **Herrn Harald Schleicher**, meinem Tutor, welcher als Ingenieur bei LEM Science arbeitet. Seine vielen guten Ideen zur wissenschaftlichen Gestaltung meiner Arbeit haben mich inspiriert.

Zuletzt danke ich **meiner Mutter**, für ihre Unterstützung, ihre Geduld und ihre motivierenden Worte während der gesamten Zeit.

Während des Verfassens meiner Arbeit stolperte ich immer wieder über die Auswirkungen von Wellen, respektiv Strahlen, auf Mensch und Natur und es erscheint mir ein interessantes Thema für eine spätere Arbeit zu sein.

8. Bibliographie

Internetseiten: wissenschaftliche Publikationen und Quellen

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/wellen-2258

https://www.spektrum.de/lexikon/physik/welle/15501

https://physikbuch.schule/wave-formation.html

https://www.leifiphysik.de/mechanik/mechanische-wellen/grundwissen/wellentypen

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/wellenlange-4447

https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/grundwissen/sichtbares-licht

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/elektromagnetische-wellen-2131

https://www.planet-wissen.de/technik/weltraumforschung/astronomie/astronomie-gravitationswellen-100.html

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/transversalwelle-6799

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/longitudinalwelle-6802

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/stehende-welle-1927

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/schall-2422

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/schallgeschwindigkeit-1626

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/lichtgeschwindigkeit-2399/lichtgeschwindigkeit-in-verschiedenen-medien

https://www.leifiphysik.de/optik/lichtbrechung/ausblick/erklaerungsmodelle-der-lichtbrechung

Wellen simulator: https://www.falstad.com/loadedstring/

https://flexikon.doccheck.com/de/Welle

https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/gravitationswellen/

https://www.spektrum.de/video/was-sind-eigentlich-gravitationswellen/1467955

https://www.leifiphysik.de/mechanik/mechanische-wellen/versuche/seilwelle-simulation-von-phet

https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/elektromagnetische-wellen-2131

https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d13802-2/*/*/Wellenl%c3%a4nge?op=Wiki.getwiki&search=MPP

https://www.schweizer-fn.de/stoff/akustik/schallgeschwindigkeit.php

https://phys.org/news/2019-05-ligo-virgo-neutron-star-smash-ups.html

https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20170927b

https://www.vdi-nachrichten.com/technik/raumfahrt/auf-einer-wellenlaenge-mit-den-ersten-sternen/

https://www.mpg.de/20355026/gravitationswellen-detektoren-ligo-virgo-und-kagra-starten-ihren-naechsten-beobachtungslauf

https://www.leifiphysik.de/astronomie/kosmologie/grundwissen/kosmische-hintergrundstrahlung

https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/planck-und-die-mikrowellenhintergrundstrahlung/

https://www.spektrum.de/lexikon/physik/infrarot-astronomie/7245

https://www.radiation-dosimetry.org/de/was-ist-sichtbare-und-unsichtbare-strahlung-definition/

https://www.heraeus-conamic.com/de/industries-and-applications/industries-and-applications-overview/aerospace-and-astronomy/ligo-virgo

Filme und Dokumentationen

- LeifiPhysik - Beschreibung von Wellen

https://www.youtube.com/watch?v=Mh-_H2_42NM

- LeifiPhysik – Arten von Wellen

https://www.youtube.com/watch?v=c6fVKRF2T9c

- Terra X Lesch & Co: Wie funktionieren Gravitationswellen?

https://www.youtube.com/watch?v=NHRojb3AFgE

- Stehende Wellen

https://www.youtube.com/watch?v=6XQ-57RaD64

https://youtu.be/g3MjzSwaVcE?si=hTs2pLITRb2AfW_t

Experimente und Darstellungen

- Schallwellen – Chladni-Wellen mit Sand

https://www.youtube.com/watch?v=wYoxOJDrZzw

https://www.youtube.com/watch?v=CR_XL192wXw

- Schallwellen Laserpointer

https://www.youtube.com/watch?v=g3MjzSwaVcE

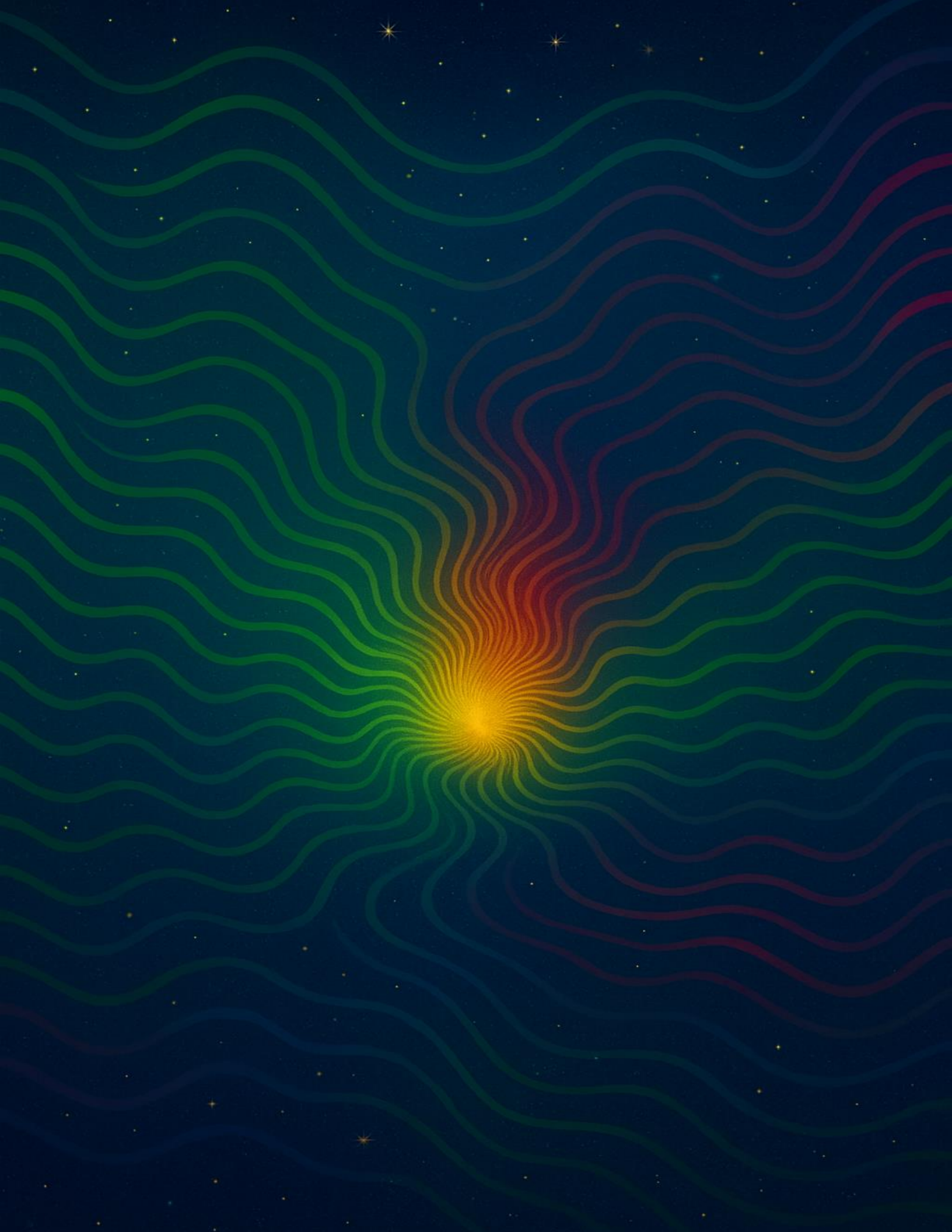
https://www.youtube.com/watch?v=C-V1uXeyGmg

- Schallwellen – verschiedenes

https://www.youtube.com/watch?v=eskZ3OORfYM

- Gravitationswellen

https://www.youtube.com/watch?v=dw7U3BYMs4U

- Wellen-Simulator

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-on-a-string/latest/wave-on-a-string_all.html?locale=de