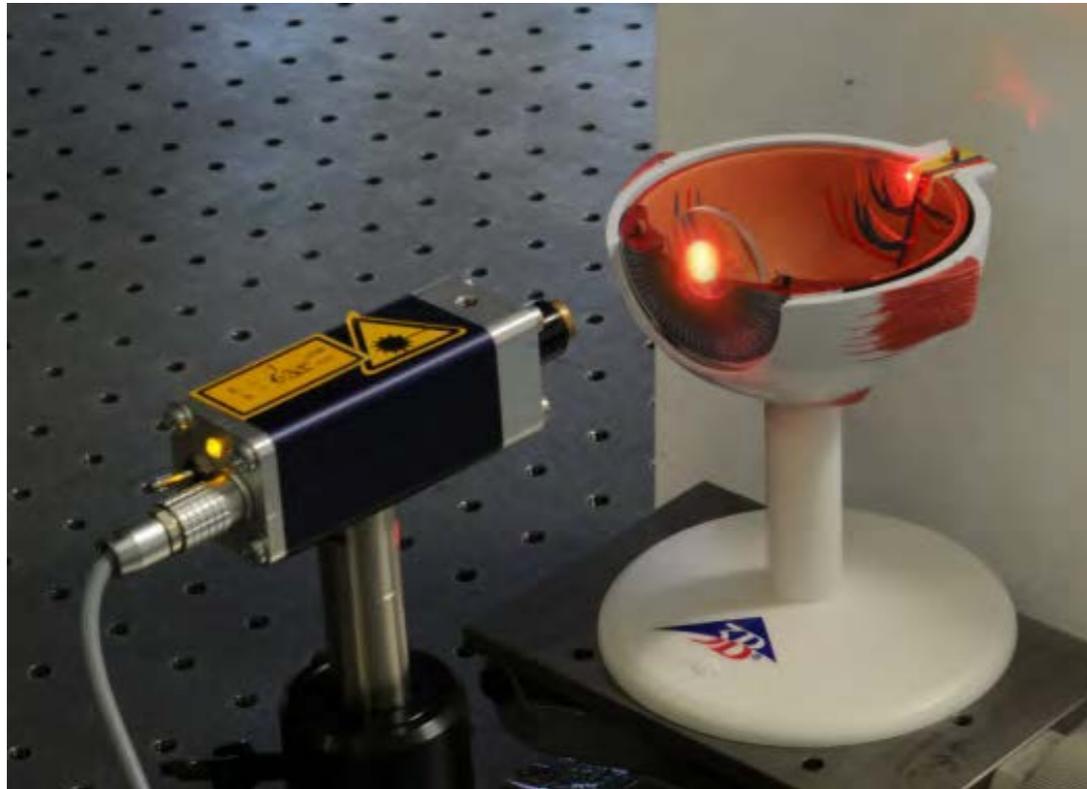


PhotonLab

Anleitungen

VERSUCH 1: LASERSICHERHEIT

Lasersicherheit



Warum ist Laserlicht gefährlich?

Laser emittieren einen nahezu parallelen Lichtstrahl, deshalb wird Laserlicht durch eine Sammellinse (wie im Auge) in **einem** Punkt (Brennpunkt oder Fokus) gesammelt. Dieser Punkt liegt beim Auge auf der Netzhaut, d.h. die gesamte Leistung des Lasers trifft auf einen kleinen Punkt und kann die Netzhaut dort zerstören. Im günstigsten Fall ist das Auge so geschädigt, dass man einen schwarzen Fleck im Gesichtsfeld

behält, der nicht wieder regeneriert werden kann. Trifft der Laser die falsche Stelle, kann man sogar erblinden. Deshalb sind Laser erst unterhalb einer Leistung von 0.4 mW ungefährlich für das Auge.

Trotzdem solltest Du auch dann niemals direkt in den Strahl schauen!

Quiz

Warum platzt der rote Ballon, der grüne aber nicht, wenn grünes Laserlicht von 85 mW auf ihm fokussiert (gebündelt) wird?

Welche Antwort ist richtig?

- a) Weil er stärker aufgeblasen wurde.
- b) Weil er grünes Licht absorbiert.
- c) Weil er grünes Licht reflektiert.
- d) Weil stimulierte Emission anfängt.

Antwort b) ist richtig.

VERSUCH 2: HAARDICKE

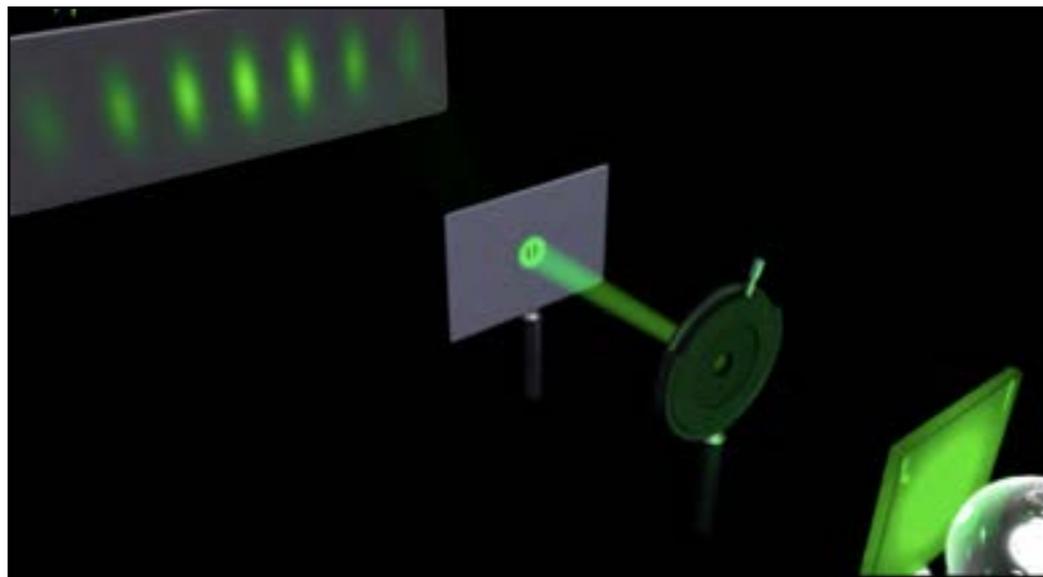
Haardicke messen



Wie dünn ist dein Haar?

Laser werden oft zum Messen verwendet. Die Welleneigenschaften von Laserlicht kann man zum Messen kleiner Abstände verwenden. Dazu nutzt man die Interferenz von Wellen.

Grundlagen



Wellen können miteinander interferieren, d.h. sich verstärken oder auslöschen. Dabei entstehen Interferenzmuster. Ein solches Muster sieht man auch im mittleren Bild an einem Strand.

Weil sich Licht wie eine **Welle** verhält, kann man auch mit Lasern solche Muster kreieren. Im unteren Bild sind Lichtwellen durch einen Doppelspalt (zwei kleine Schlitze) gelaufen und auf dem Schirm erkennt man ein Interferenzmuster.

Erkennst du die Ähnlichkeiten der Interferenzmuster in den drei Bildern?

Man kann die Interferenzmuster auch benutzen, um die Anordnung, die das Licht durchlaufen hat, zu untersuchen.

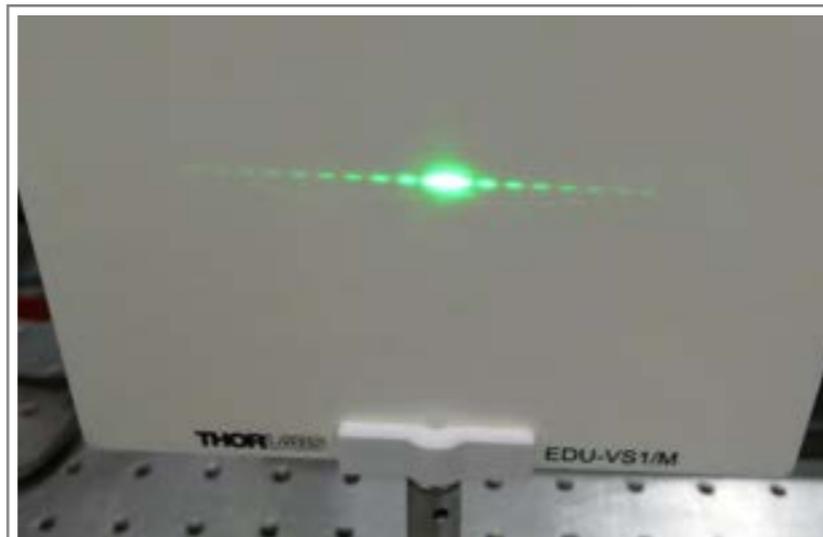
Vor dem Start...

...ist es wichtig, dass du verstehst, was der **Einfachspalt** mit dem Experiment zu tun. Stelle dazu den variablen Einfachspalt direkt hinter dem Laser so auf, dass auf dem Bildschirm das **Interferenzbild** zu sehen ist. Verändere jetzt die **Spaltbreite** durch **Drehen** an der Skala. Wie verändert sich das Interferenzbild? Notiere deine Beobachtungen!

Übrigens: Im **Fernfeld** wie hier sieht das Interferenzbild eines Spaltes und eines Hindernisses mit gleichen Abmessungen auch gleich aus (=Babinet'sches Theorem).



Interferenzbild

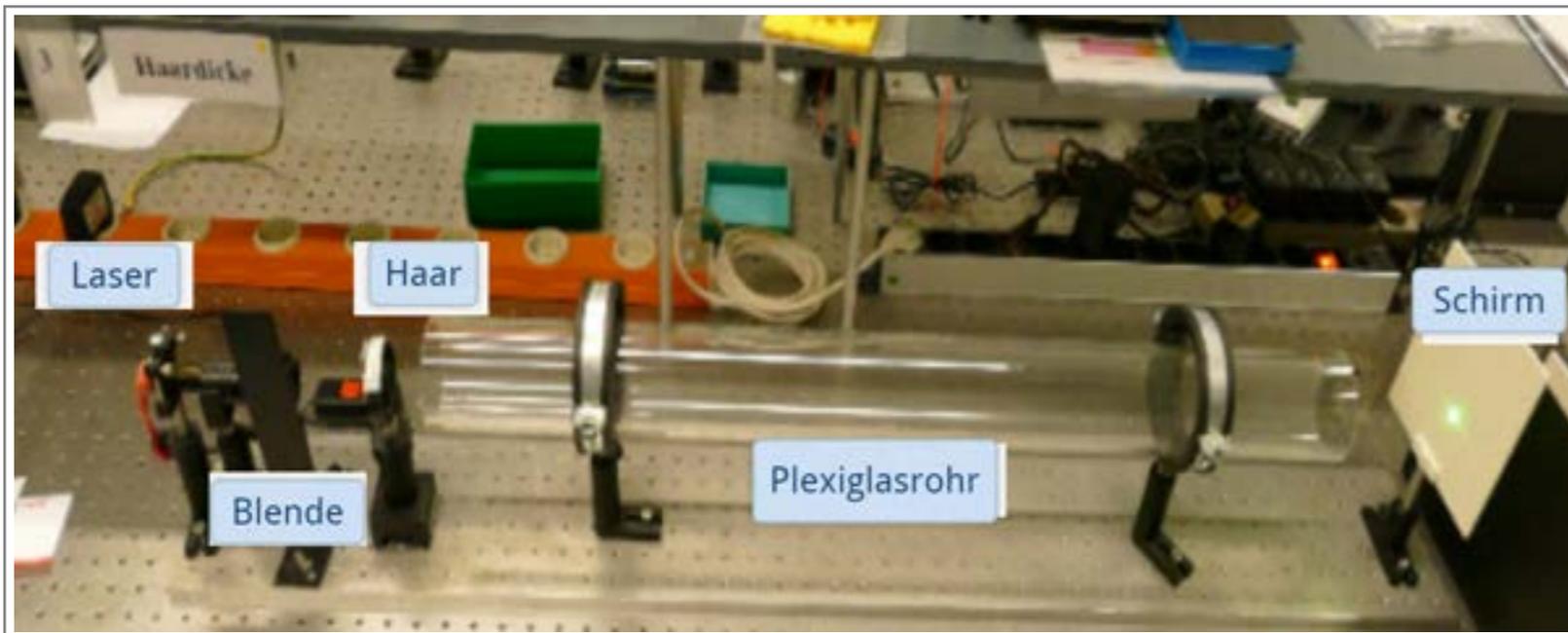


Variabler Einfachspalt



Versuchsaufbau

Klebe das Haar mit Tesafilm **senkrecht** hinter die kreisförmige Halterung wie im Bild (Haar nur oben und unten festkleben), d.h. der Laser soll nur das Haar beleuchten, nicht den Tesafilm!



Haar in Halterung

Laserschutzbrillen aufsetzen und Laserstrahl freigeben!

Durchführung



Auf dem Schirm sollte dieses Muster erscheinen.

Messe den Abstand d in cm zwischen der Mitte des hellsten Streifens/Punktes (Maximum 0. Ordnung) zur Mitte des zweithellsten Streifens rechts bzw. links daneben (Maximum 1. Ordnung).

Bestimme auch den Abstand D in cm zwischen deinem Haar und dem Schirm. Verwende dazu das Maßband!

Für ein Haar der Dicke h , das mit einem Laser der Wellenlänge λ (rot: $\lambda = 633 \text{ nm} = 0,633 \text{ Mikrometer}$, grün: $\lambda = 532 \text{ nm} = 0,532 \text{ Mikrometer}$) beleuchtet wird, ergibt sich folgende Formel :

$$h = \frac{3}{2} \lambda \frac{D}{d}$$

Berechne nun mit Ihren Messergebnissen und dieser Formel deine Haardicke in Mikrometern.

Tipp: Setze die Wellenlänge gleich in Mikrometern in die Formel ein!

Für Interessierte:

Hier geht es zur Herleitung der Formel für den Doppelspalt und hier zu der Formel für den Einfachspalt.

Quiz

Wie dick ist dein Haar?

Welche Antwort ist richtig?

- a) 50 - 200 Nanometer
- b) 50 - 100 Mikrometer
- c) 500 - 1000 Mikrometer
- d) 1 m oder mehr

Für Fortgeschrittene:

Du möchtest den Abstand der Rillen bei einer CD oder DVD ermitteln? [Dann klicke hier!](#)

Antwort b) ist richtig.

VERSUCH 3: 3D SEHEN

3D Sehen

Wie macht die 3D Brille aus zwei Bildern eines und warum sehen wir dieses dann in 3D?

Im 3D Kino sieht man ohne Brille nur ein seltsam verschwommenes Bild. Eigentlich sind es jedoch zwei Bilder, die sich **überlagern**.

Mit einer passenden Brille aber erhält man den besonderen 3D-Effekt. Wie funktioniert es, dass die Brille die aufeinander liegenden Bilder wieder trennt und in das **richtige** Auge durchlässt?



Untertitel



Grundlagen

Der springende Punkt:

Strecke deinen Arm mit dem Daumen nach oben vor dir aus, schließe nun abwechselnd ein Auge.

Was stellst du fest? Und was hat das mit 3D zu tun?

Im Alltag sehen wir alles 'automatisch' in 3D, da unser Gehirn die zwei unterschiedlichen Bilder der Augen zu einem Ganzen zusammensetzt.

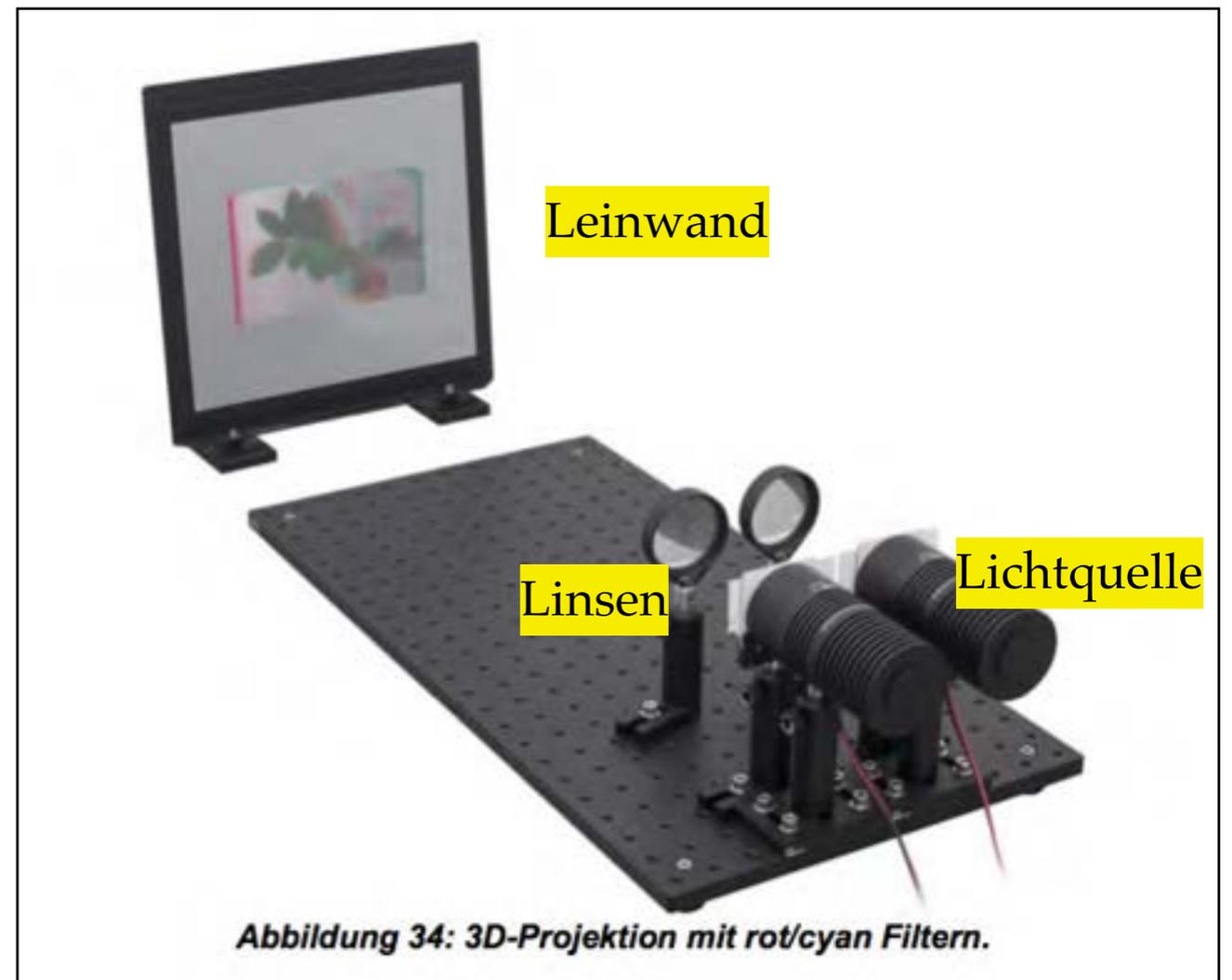
Möchte man diesen Effekt mit Bildern oder Videos nachahmen, so müssen **zwei Aufnahmen aus verschiedenen Positionen** gemacht werden. Der Abstand der Position ist dabei so groß wie der durchschnittliche Augenabstand (bei Erwachsenen zwischen 50-70 mm).

Anschließend muss sichergestellt werden, dass immer **nur eines der Bilder vom entsprechenden Auge wahrgenommen wird**. Dies kann durch den Einsatz verschiedener Techniken erreicht werden. Heutzutage werden vor allem die **(Farb-)Anaglyphentechnik**, **Polarisation**, **Shutterbrillen** oder **Layerdisplays** genutzt. In unserem Versuch nehmen wir die ersten zwei davon unter die Lupe.

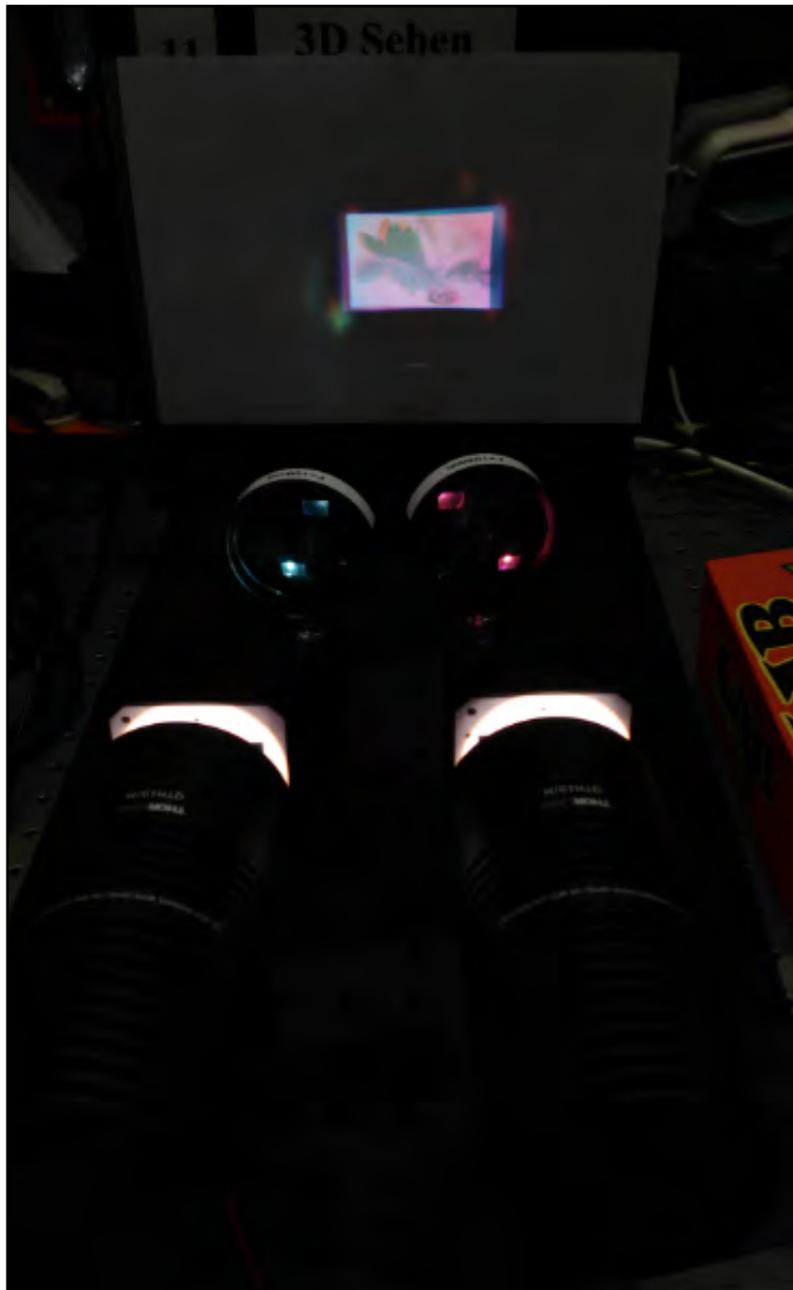


Anaglyphtechnik: Aufbau

1. Bringe die blauen und roten Dias mit Schrift zur Leinwand gerichtet, ganz nah vor der Lampe an. (Du kannst auch ein farbiges Dia mit einem anderen Motiv und die Farbfilter benutzen.)
2. **Achtung:** Auf der Leinwand sollten jetzt keine Regenbogenfarben oder Randstrahlen mehr sichtbar sein!!
3. Positioniere die Linsen so, dass sich die Bilder überlagern und scharf sind. **Die Lampen dabei nicht bewegen oder drehen!** (Diese sollten leicht zueinander geneigt sein.)



Anaglyphtechnik: Durchführung



4. Setze nun die Anaglyphbrille (blaue / rote Gläser) UNTER deiner Laserschutzbrille auf.
5. Blicke über die Lampen hinweg auf den Bildschirm und nimm eventuelle Feinkorrekturen vor. **Achtung: die Lampen können im längerem Betrieb heiß werden.**

Bist du mit dem Ergebnis zufrieden?

*Für Profis (und alle, die es werden wollen):

Überlege: Warum siehst du in der Abbildung natürliche Farben, obwohl ein Dia rot und das andere blau ist?

[Hier geht's zur Lösung!](#)

Handexperiment: Polarisation (linear)

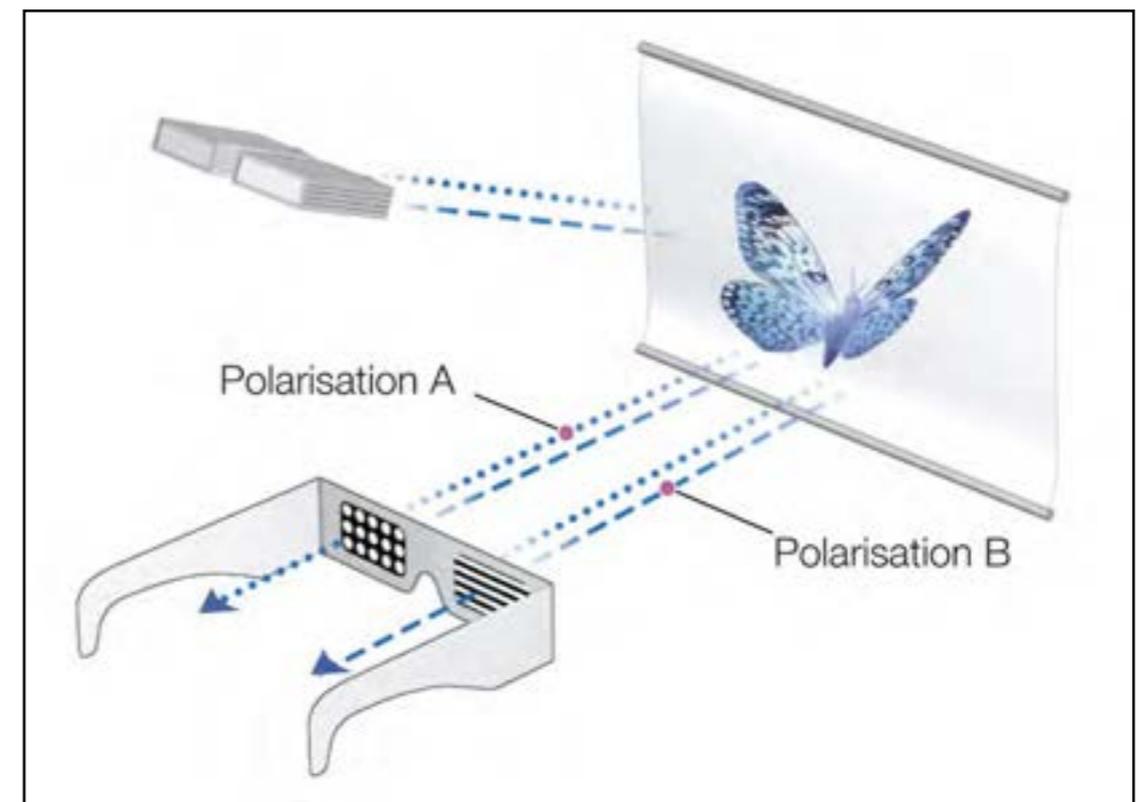
Polarisationsfilter machen mit den Dias dasselbe wie die Farbfilter; sie sorgen dafür, dass jedes Auge auch die passende Information erhält.

Handexperiment:

Setze die (lineare) Brille UNTER deiner Laserschutzbrille auf.

Blicke nun auf den LCD-Fernseher. Dieser sendet bereits polarisiertes Licht aus.

Nimm einen zusätzlichen Polarisationsfilter, schließe ein Auge und drehe diesen, bis er dunkel wird.

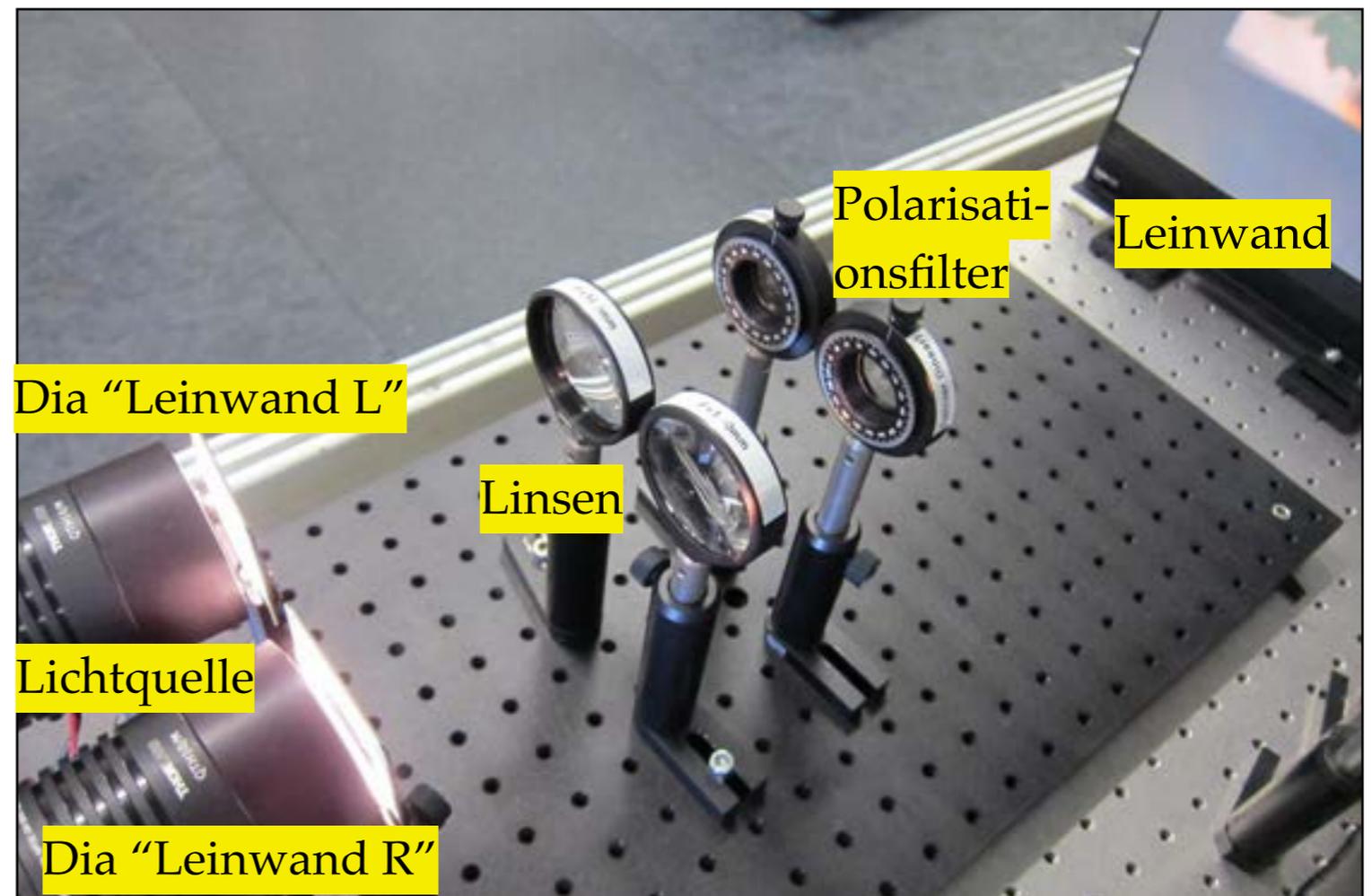


Wie lässt sich das Beobachtete auf unseren Versuch übertragen? Hast du eine Idee?

Wenn dich das Phänomen der Polarisation noch mehr interessiert, gehe anschließend zur Station "Polarisation" (Kapitel 15)!

Polarisation (linear): Versuchsaufbau

1. Bringe die Dias mit Schrift zur Leinwand gerichtet ganz nah vor der Lampe an. **Achtung:** Auf der Leinwand sollten jetzt keine Regenbogenfarben oder Randstrahlen mehr sichtbar sein!!
2. Positioniere die Linsen so, dass sich die Bilder überlagern und scharf sind. **Die Lampen dabei nicht bewegen oder drehen!** (Diese sollten leicht zueinander geneigt sein.)
3. Stelle den Polarisationsfilter hinter die Linsen.



Polarisation (linear): Durchführung

4. Setze die (lineare) Polarisationsbrille UNTER deiner Laserschutzbrille auf.

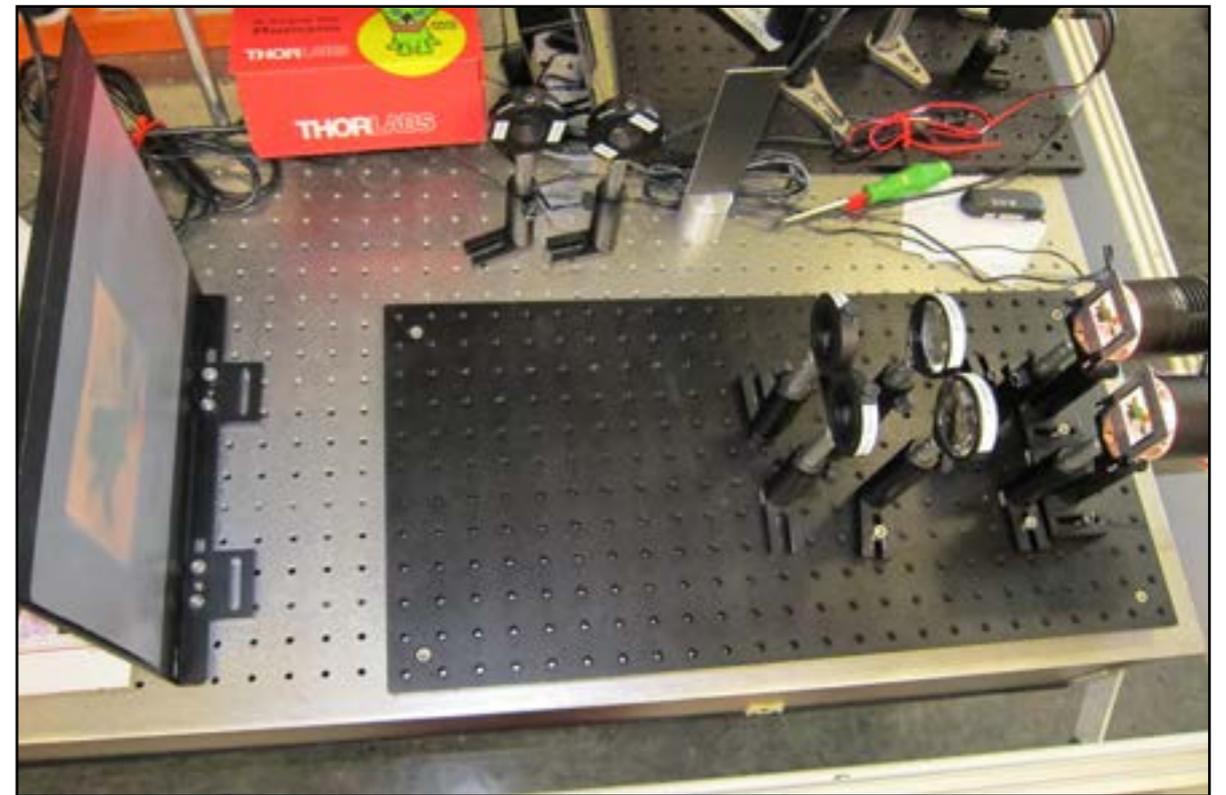
5. Decke zunächst die linke Lampe ab, indem du ein schwarzes Metall zwischen Dia und Linse stellst. Schließe nun dein linkes Auge. Jetzt siehst du mit dem rechten Auge nur das rechte Bild.

6. Drehe nun solange am rechten Polarisationsfilter, bis das Bild auf dem Schirm möglichst dunkel ist.

7. Verfahre mit dem linken Filter genauso. (Hierzu deckst du das rechte Dia ab und schaust nur durch dein linkes Auge.)

8. Decke beide Bilder auf und betrachte die Abbildung über die Lampen hinweg.

Für jeden Menschen ist der 3D-Effekt an einer anderen Stelle perfekt; wenn dein Partner die Einstellungen vorgenommen hat, musst du eventuell noch nachjustieren!



Im Kino wird diese Technik noch minimal verändert, wer es also ganz genau wissen will, kann [hier](#) nachlesen!

Für Profis: Zirkulare Polarisation (RealD)

Handexperiment:

Nimm eine der 3D-Brillen (zirkular) und halte sie 'richtig herum' (so wie du sie aufsetzen würdest) vor den Fernseher.

Ein LCD-Display sendet immer polarisiertes Licht aus.

Drehe nun die Brille.

Was fällt dir auf?



Nehme die Brille jetzt 'verkehrt herum' und drehe sie erneut. Was kannst du beobachten?

Lösung!

Polarisation (zirkular): Aufbau

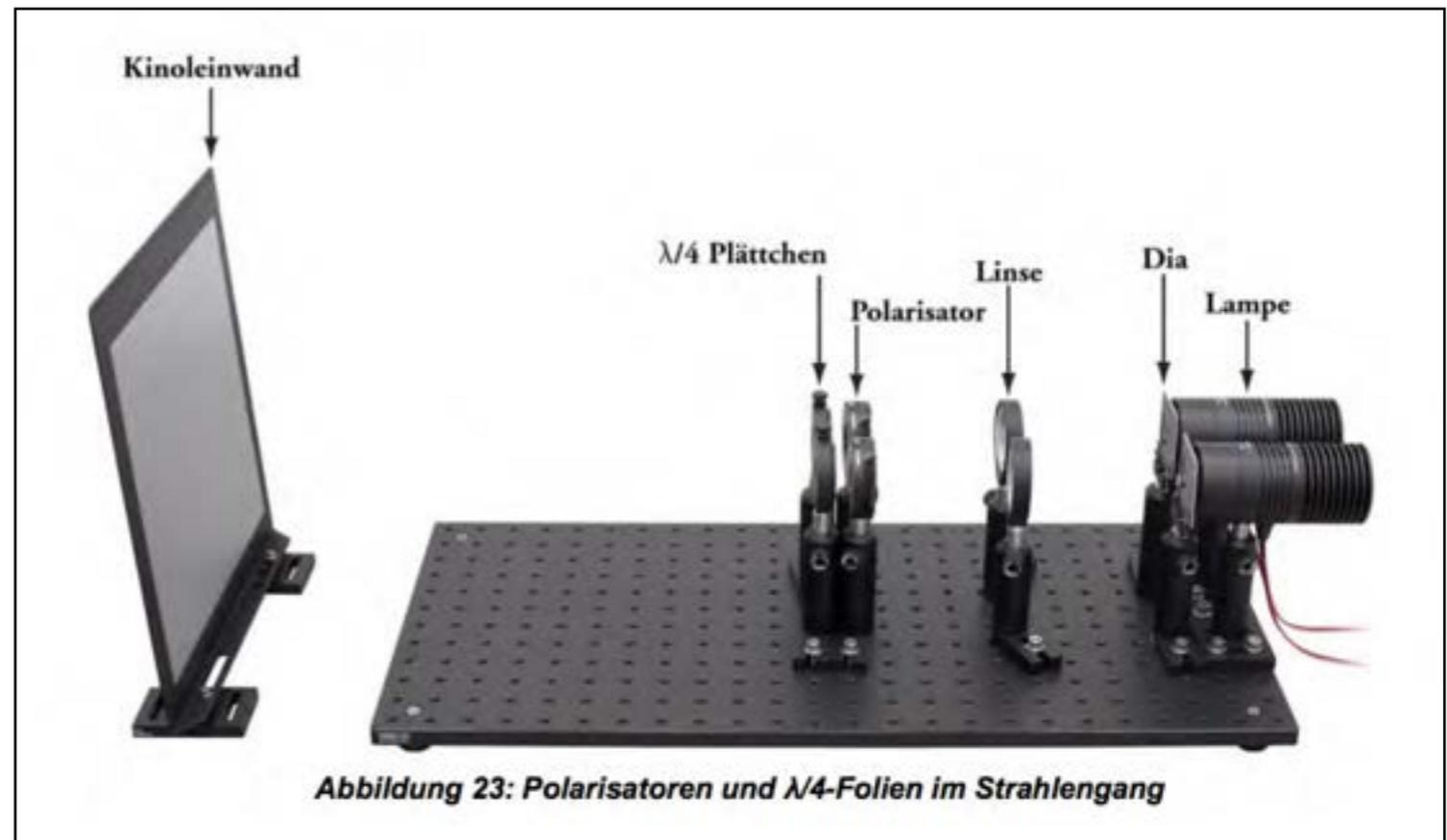
1. Nutze den Aufbau der linearen Polarisation. Dieser kann einfach ergänzt werden.
2. Stelle die Polarisatoren wie folgt ein:

Rechter Polarisator: 255°

Linker Polarisator: 182°

Die Werte wurden im Vorfeld, passend zu den $\lambda/4$ -Plättchen, in einem extra-Verfahren ausgemessen!

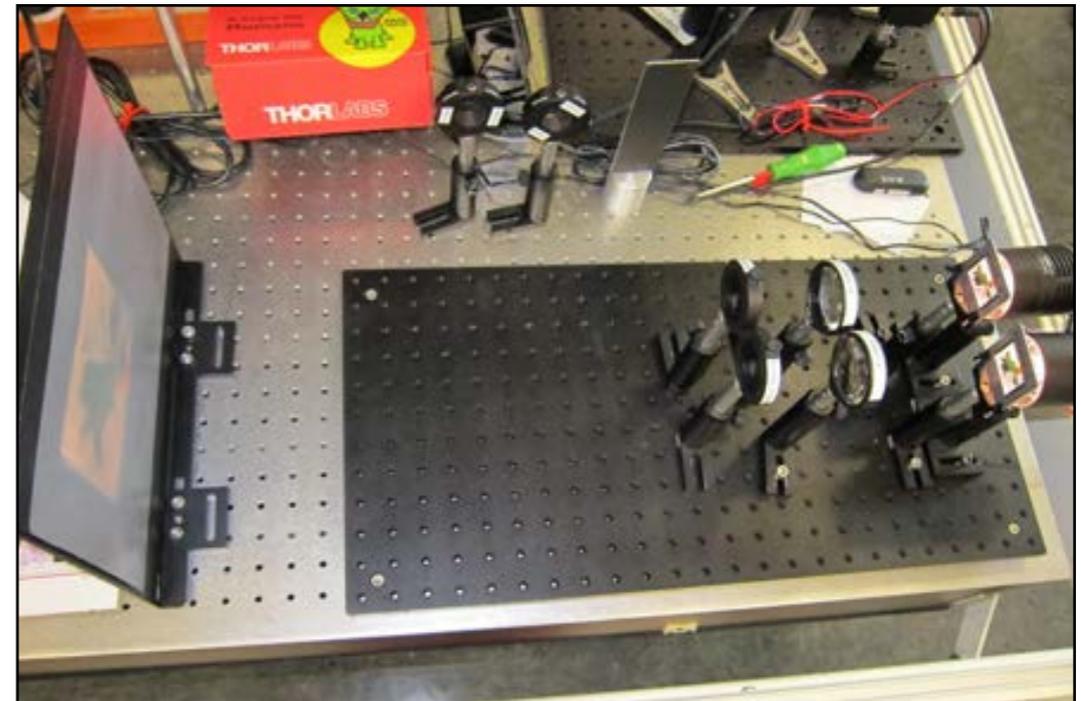
3. Stelle die $\lambda/4$ -Plättchen in den Strahlengang, am besten direkt hinter die Polarisatoren.



Polarisation (zirkular): Durchführung

4. Setze nun die zirkulare/realD Polarisationsbrille UNTER deiner Laserschutzbrille auf.
5. Einstellen der $\lambda/4$ - Plättchen: Decke zuerst die linke Lampe ab und schließe dein linkes Auge. Blicke mit dem rechten Auge auf die Leinwand. Öffne vorsichtig die Schraube am $\lambda/4$ - Plättchen und drehe es solange (an der Halterung nicht direkt auf das Plättchen fassen!), bis das Bild auf der Leinwand möglichst dunkel erscheint. (Am einfachsten geht das, wenn man zu zweit zusammenarbeitet). Abschließend schließt du die Schraube wieder vorsichtig.
6. Wiederhole den Vorgang für das andere Auge/Bild.
7. Blicke nun wieder über die Lampen hinweg auf die Leinwand.

Drehe deinen Kopf leicht in beiden Richtungen, was fällt dir auf? Geht der Effekt verloren?

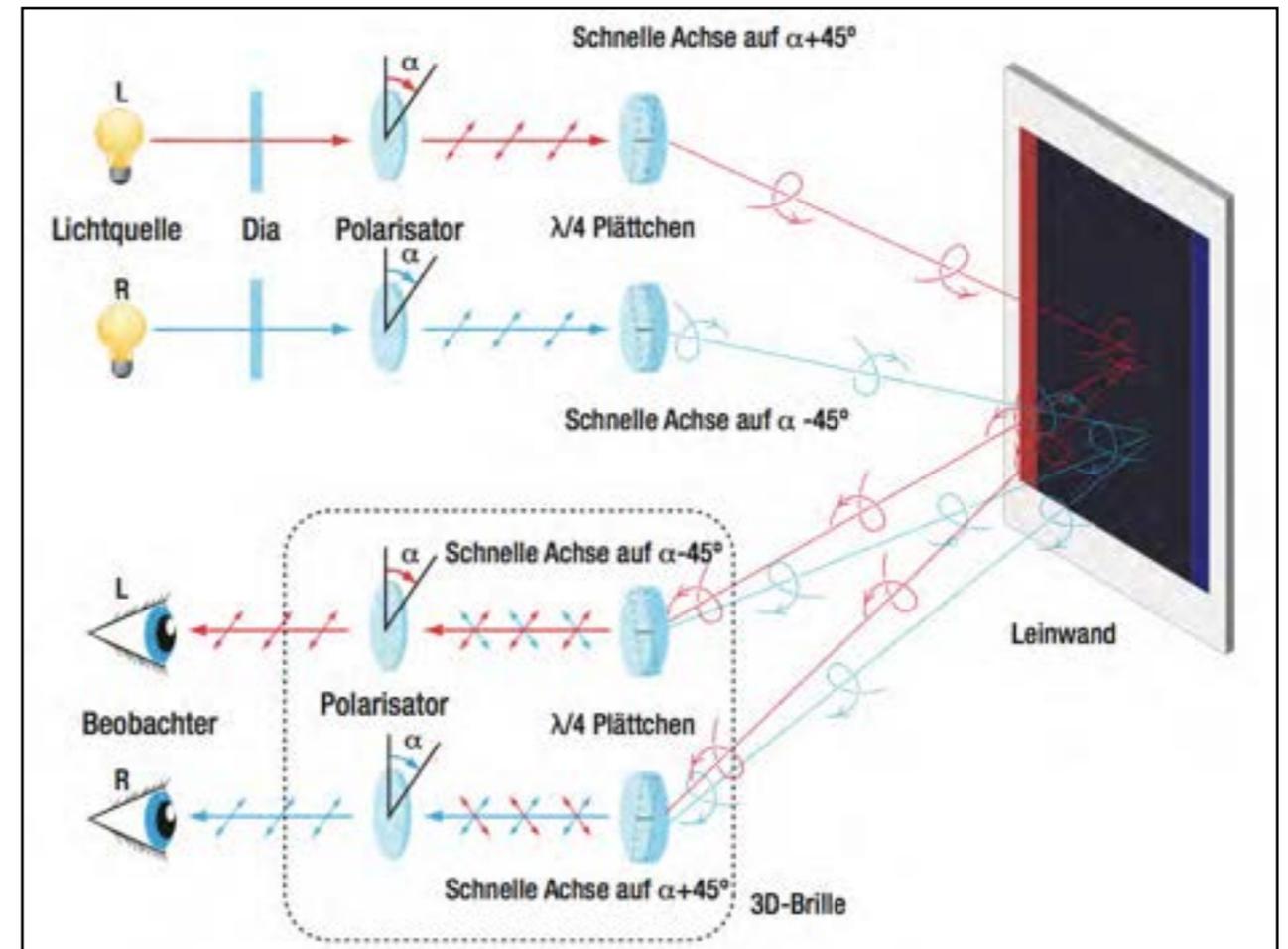


Polarisation (zirkular): Erklärung

Bei der zirkularen Polarisation durchläuft der Lichtstrahl verschiedene Stationen.

Die erste ist ein Polarisator, der das Licht für jedes Auge linear in die gleiche Richtung polarisiert.

Die zweite ist das $\lambda/4$ -Plättchen oder Verzögerungsplättchen. Es macht aus linear polarisiertem Licht einer bestimmten Wellenlänge zirkular polarisiertes Licht (und umgekehrt). Je nach Ausrichtung des Plättchens ist der transmittierte Strahl links- bzw. rechtsdrehend.



Trifft der Strahl auf den beschichteten Schirm, wird dieser reflektiert und erfährt einen Phasensprung von 90° . Das heißt, der vorher rechtsdrehende Strahl ist nun linksdrehend und vice-versa.

Beim Auftreffen auf die Brille laufen die Schritte eins und zwei in umgekehrter Reihenfolge ab.

Somit wird erreicht, dass wir immer nur eines der Bilder im dafür vorgesehenen Auge empfangen. Diese Technik erlaubt es uns auch, im Kino den Kopf zu bewegen, da es keine Rolle spielt, aus welchem Winkel das Licht auf die Brille trifft.

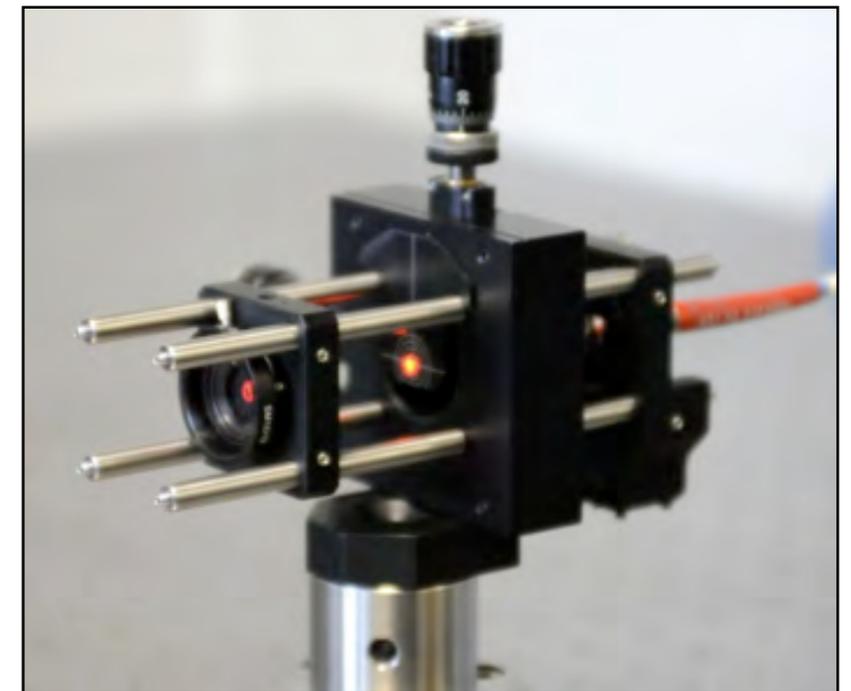
VERSUCH 4: MUSIKÜBERTRAGUNG

Musikübertragung

Wie kann ein Laser Musik übertragen?

Ein Laser kann, wie ein Kabel, an oder aus sein. Beim Kabel entspricht dies stromdurchflossen oder nicht - also, dass Spannung auf dem Kabel sein kann. Deshalb kann man auch mit einem Laser **Da-ten verschicken**. Die elektrischen Signale werden dazu in Lichtsignale umgewandelt.

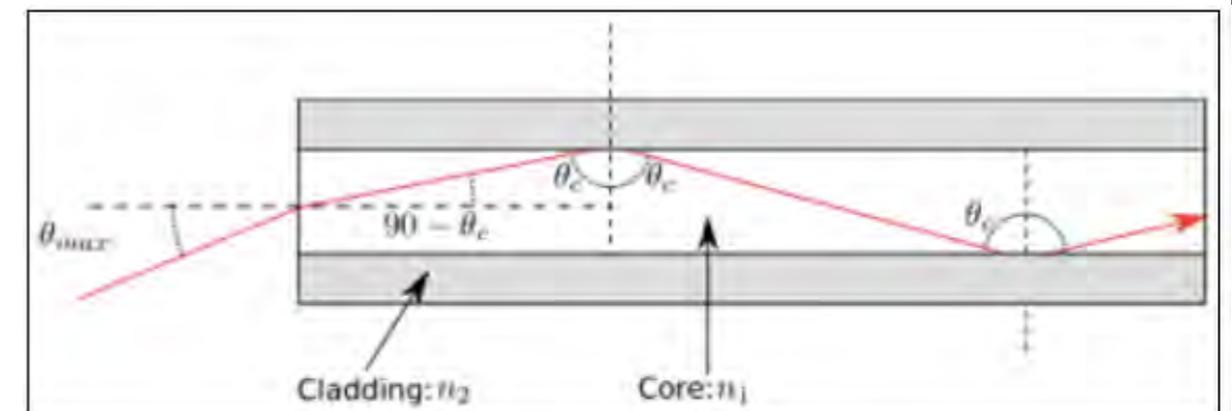
Bei diesem Versuch kannst du Musik aus einem YouTube-Video oder deinem Handy mit Hilfe eines Lasers zum Lautsprecher schicken.



Justierhilfe

Grundlagen

Trifft Licht auf eine **Grenzschicht** verschiedener Medien mit unterschiedlichem **Brechungsindex**, kommt es zu Brechung. Lichtleiter bestehen aus einem Kernmaterial, das einen wesentlich höheren Brechungsindex als das Mantelmaterial hat. Dadurch kommt es, wenn ein Lichtstrahl flach auf die Grenzschicht trifft, zur **Totalreflexion** und der Lichtstrahl bewegt sich entlang der Leitung. Der gleiche Effekt tritt auch auf, wenn Licht am Übergang von Wasser und Luft reflektiert wird. Darum kann auch ein Wasserstrahl als Lichtleiter wirken. Weil die Totalreflexion aber nur auftritt, wenn das Licht in einem ausreichend flachen Winkel auftrifft, wird nur Licht, das innerhalb eines Akzeptanzwinkels in den Lichtleiter fällt, weitergeleitet.

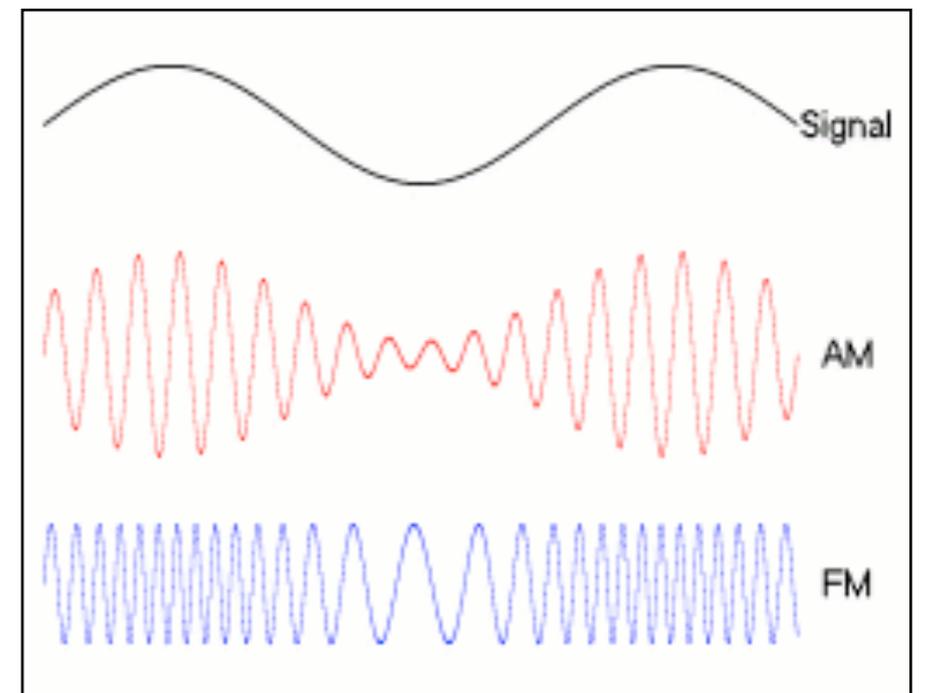


Totalreflexion, Hecht, Optik

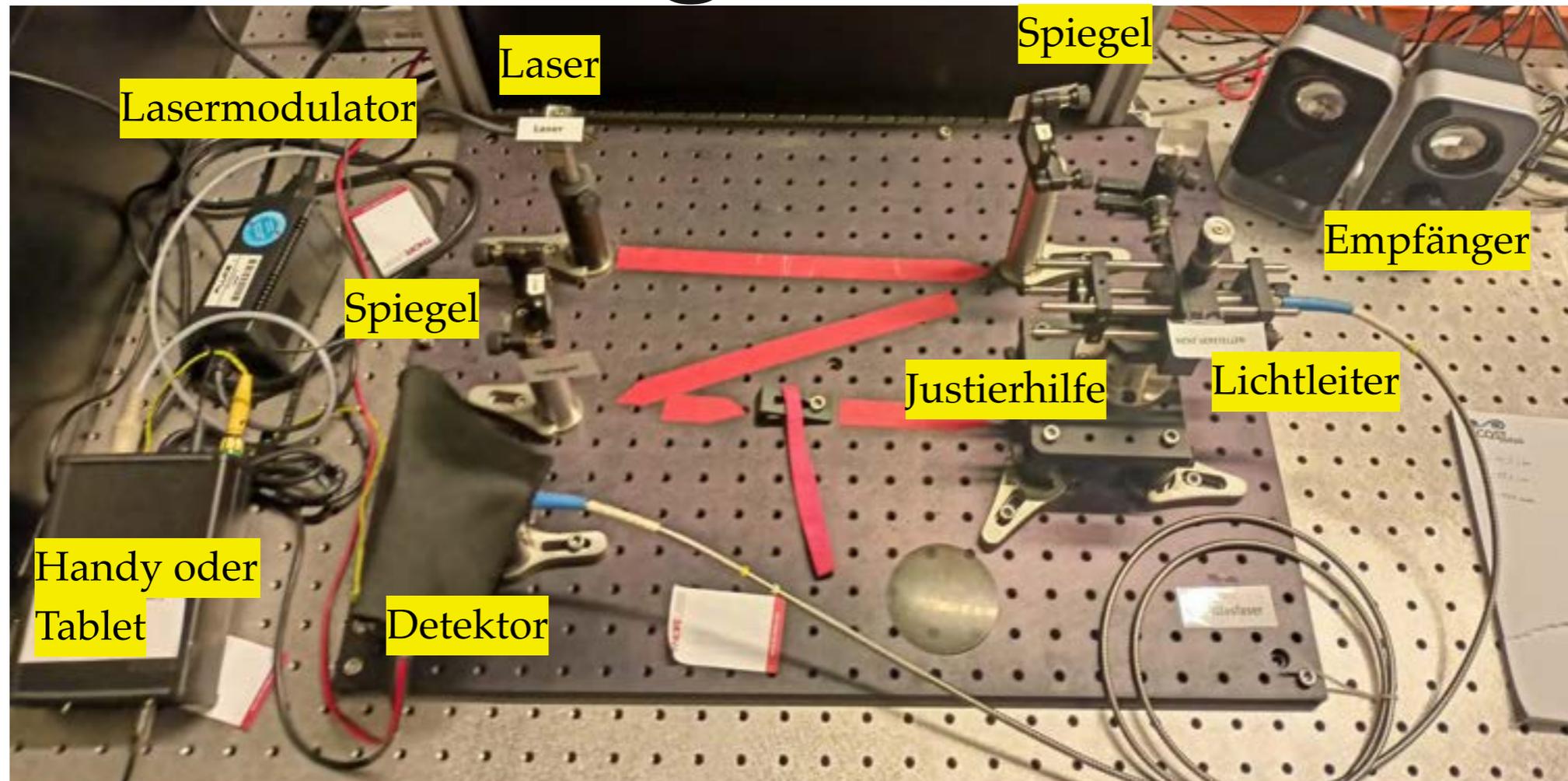
Theorie

Bei diesem Versuch werden elektrische Signale in **Lasersignale** übersetzt. Dies nennt man Modulation. Je stärker das elektrische Signal, desto stärker leuchtet der Laser. Dies geschieht mithilfe eines Lasermodulators.

Mit der Modulation kann ein Signal (zB. Musik, Sprache, Daten) dank eines Trägers übertragen werden. Dieser wird moduliert, d. h. so verändert, dass die Einhüllende seiner Intensitätsänderung dem zu übertragenden Signal entspricht (**Amplitudenmodulation**). Alternativ kann die Frequenz entsprechend verändert werden (**Frequenzmodulation**). Hier findet ihr den Schaltplan dieses Geräts.



Durchführung



Der Versuch sollte wie im Bild oben aufgebaut sein. Ist dies nicht der Fall, findet ihr [hier](#) weitere Hinweise zum Aufbau.

Ziel ist nun, den Laserstrahl so in den Lichtleiter **einzukoppeln**, dass auf dem Empfänger ein roter Lichtfleck zu sehen ist. Dazu sollen nur die **Justierschrauben** an den beiden Spiegeln verwendet werden.

Achtung:

Laserschutzbrille aufsetzen und Laserpointer einschalten!!

Den Lichtleiter nicht zu stark biegen!!!!

Nicht auf den Lichtleiter, die Spiegel oder den Empfänger fassen!!!!

Justieren : Die Schrauben an den Spiegelhalterungen verändern die Kippung der Spiegel. Ziel ist, dass das Laserlicht auf die Mitte der **geschlossenen** Irisblende fällt (dann ist immer noch ein kleines Loch in der Mitte) und anschließend durch die Mitte der Zielscheibe. Dann die Blende öffnen und die Zielscheibe abhängen, dann sollte das Licht in den Lichtleiter fallen und am anderen Ende zu sehen sein. Sonst die Prozedur wiederholen.

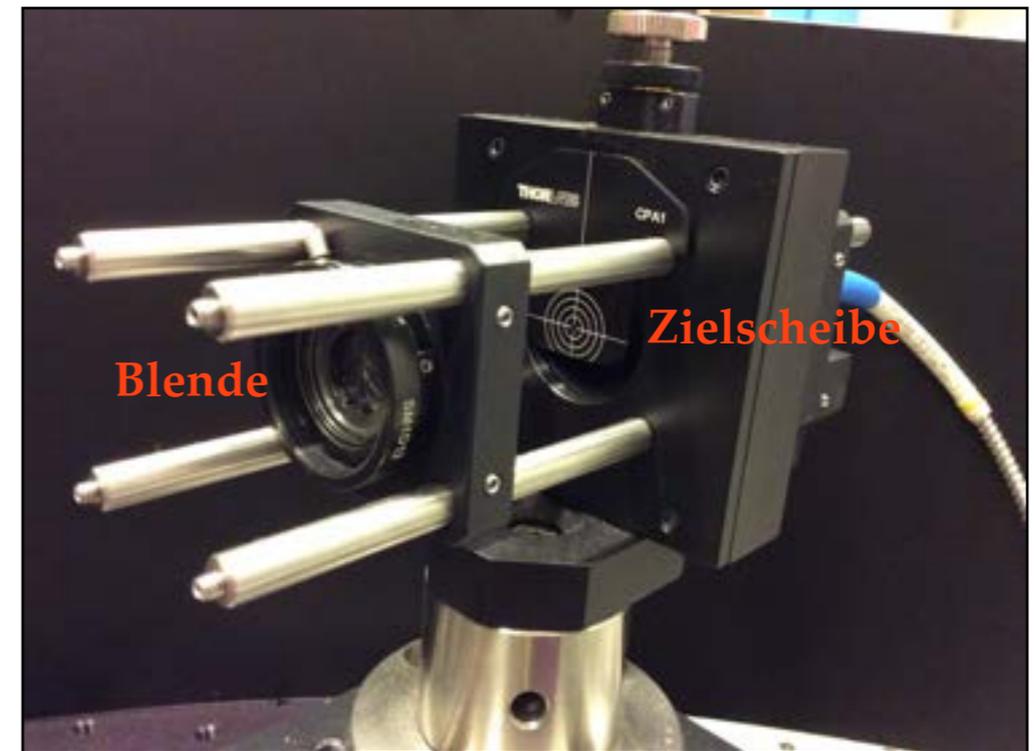
Nun sollte das Licht auch auf den Empfänger fallen! Um die **Musik** anzumachen, verbinde dein iPad mit dem WLAN "MPQ-Guests" und verwende den Benutzernamen "PhotonLab" und Passwort "PhotonLab". Suche dir jetzt ein **YouTube-Video** aus, und stelle den Ton sowie die Lautsprecher auf Maximum. Das iPad verbindest du mit dem AUX-Kabel an die Apparatur.

Halte deine **Hand** oder einen **Polarisationsfilter** in den Strahlengang! Was passiert?

Probiere auch die **Lasergitarre** aus: Nimm ein Gummiband, spanne es und zupfe es an. Diese schwingende „Saite“ hältst du in den Strahlengang.

Justierhilfe

Der Lichtstrahl soll durch die Mitte der **geschlossenen Blende** und durch die **Mitte der Zielscheibe** treffen (ein kleines Loch in der Mitte ist bei beiden offen). Ist dies erreicht (nur durch Justieren der beiden Spiegel), kann die Blende geöffnet und die Zielscheibe rausgenommen werden. Dann sollte eigentlich zumindest etwas Licht den Lichtleiter verlassen. Dies mit einem Papierstück überprüfen. Dazu hältst du das Papierstück zwischen Detektor (unter dem schwarzen Tuch) und Ausgang des Glasfaserkabels. Dann noch an den Spiegeln nachjustieren, bis das Licht so hell wie möglich ist.



Quiz

Was kannst du beobachten, wenn du einen Polarisationsfilter senkrecht in den Strahlengang stellst und ihn dann drehst (er bleibt dabei senkrecht)?

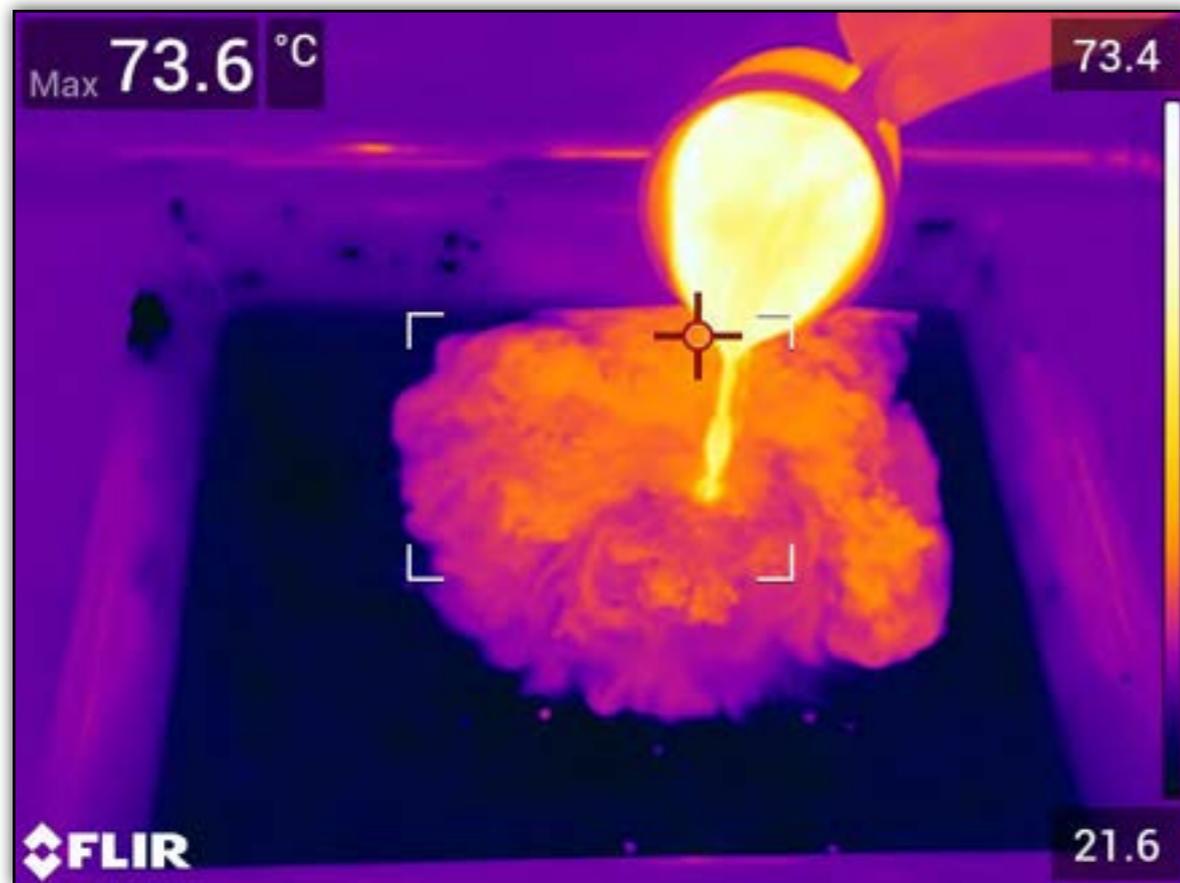
- A. Der Ton wird lauter
- B. Der Ton wird leiser
- C. Es gibt keinen Ton
- D. Der Ton wird lauter und wieder leiser

Richtige Antwort: D

VERSUCH 5: INFRAROTLICHT

Infrarotlicht

Mit der Infrarotkamera dem Klimawandel auf der Spur



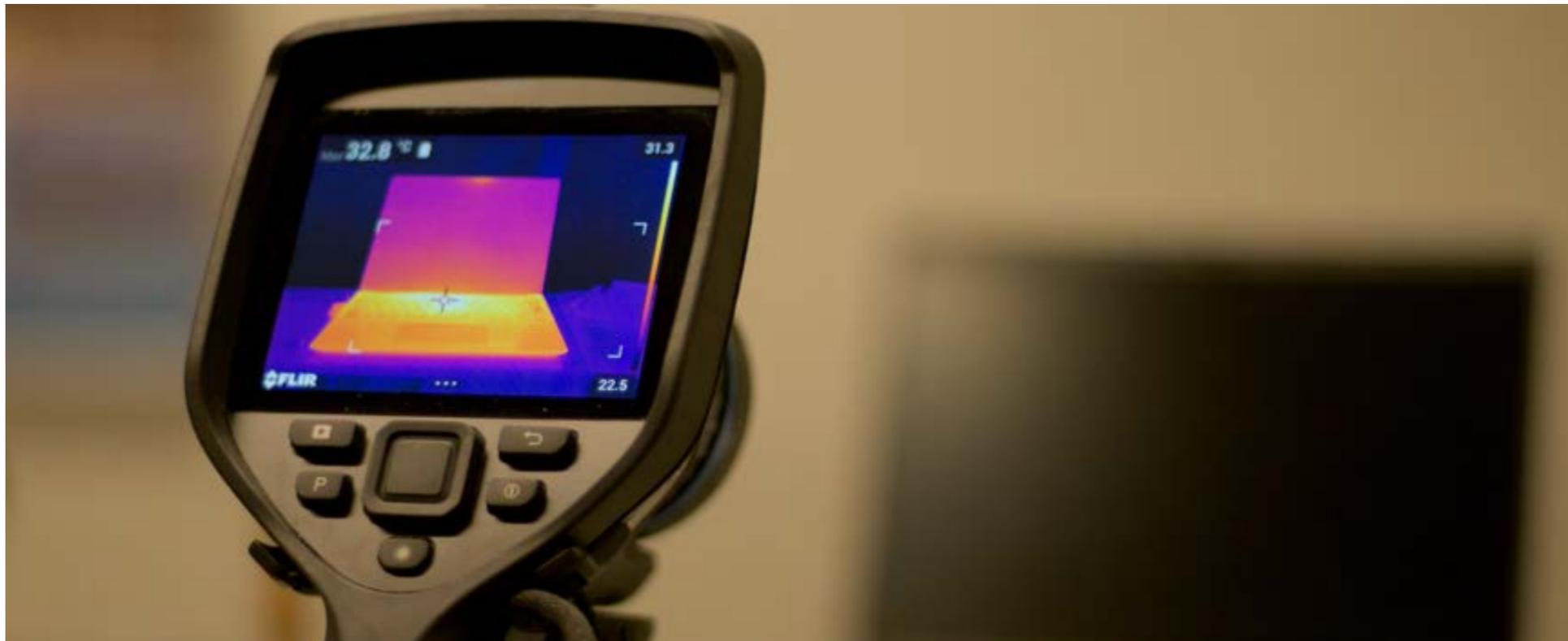
Hier wird heißes Wasser in kaltes Wasser gegossen.

Die Infrarotstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von **780 nm** und **1 mm**. Sie ist für uns nicht sichtbar, allerdings können wir sie spüren: Die Hitze der Sonne, welche die Nerven in unserer Haut wahrnehmen, ist nämlich Infrarotstrahlung. Denn alle Objekte mit einer Temperatur über dem **absoluten Nullpunkt** ($0 \text{ K} \approx -273,15 \text{ °C}$) strahlen **Infrarotlicht** aus.

Dadurch, dass Objekte mit höherer Temperatur eine andere Wellenlänge emittieren als Objekte mit niedrigerer Temperatur, können Temperaturunterschiede visualisiert werden. Dies ist das Kernprinzip der **Thermographie**.

Teil 1: Wärmebildkamera

Wärme sichtbar machen



Jeder Körper emittiert Wärmestrahlung, selbst wenn er sehr kalt ist.

Eine Wärmebildkamera „übersetzt“ diese Wärmestrahlung in sichtbares Licht, sodass man sie auf dem Display sehen kann.

Anwendungen

Von der Weltraumforschung bis zur Medizin



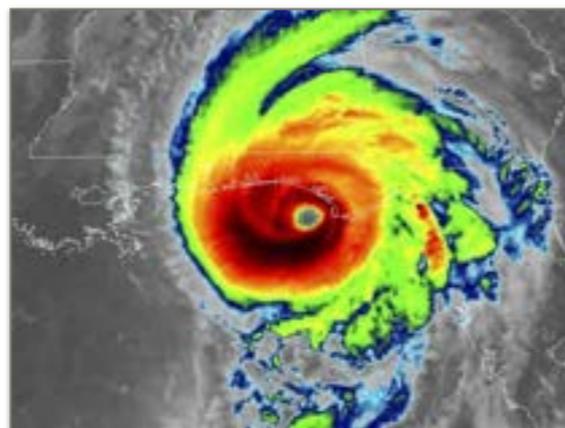
Im Großeinsatz bei der Feuerwehr



Mid-Infrarot Bild einer Galaxie



Thermografische Aufnahme eines Menschen



Infrarotaufnahme eines Tropischen Sturms

1. Die Feuerwehr nutzt Wärmebildkameras zum Auffinden von Menschen im Dunklen, denn Infrarotlicht durchdringt Hindernisse wie Baumkronen besser als sichtbares Licht. Auch Personen im Rauch sind so besser zu finden.
2. In der Weltraumforschung wird Infrarotlicht genutzt, um durch Galaktische Nebel zu blicken. Auch die Entfernung von Galaxien kann hiermit bestimmt werden.
3. Thermografie wird in der Medizin für die Bestimmung der Körpertemperatur von Patienten genutzt.
4. **Infrarotlicht** wird in der Meteorologie genutzt um den Wasseranteil in der Atmosphäre und dessen Temperatur zu bestimmen.

Du willst wissen, welche Arten von IR-Licht es gibt? Dann klicke [hier](#)!

How to: Wärmebildkamera

Start und Funktion der Kamera

1. Batterie einstecken

Aus dem Ladegerät lösen und in die Wärmebildkamera stecken.

2. Einschalten

Knopf rechts unten kurz gedrückt halten

3. Automatisches Fokussieren

Zum automatischen Fokussieren den kleinen Trigger betätigen (oben)

4. Fotografieren

Um ein Foto zu machen, den großen Trigger betätigen (unten). Bitte wieder die Bilder löschen).

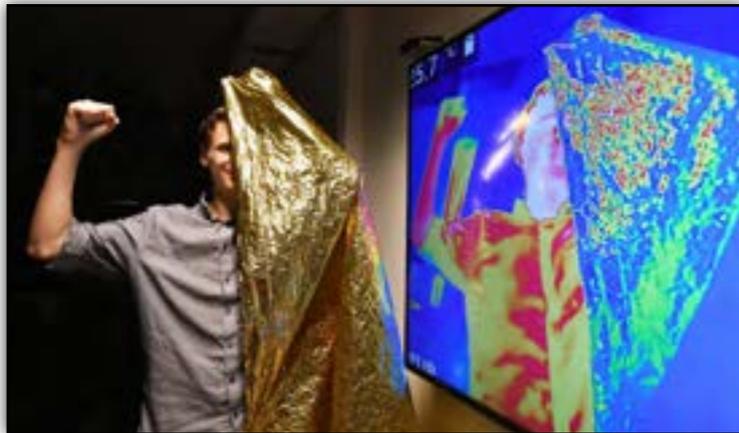
5. Entfernungsmesser

Um mithilfe des Lasers eine Entfernung zu messen, den Laser-Button gedrückt halten und auf das gewünschte Ziel richten.



Du möchtest mehr über die Funktionsweise der Wärmebildkamera und Ihre **Bedienung** erfahren? Für eine ausführlichere Anleitung, klicke [hier](#)!

Versuche

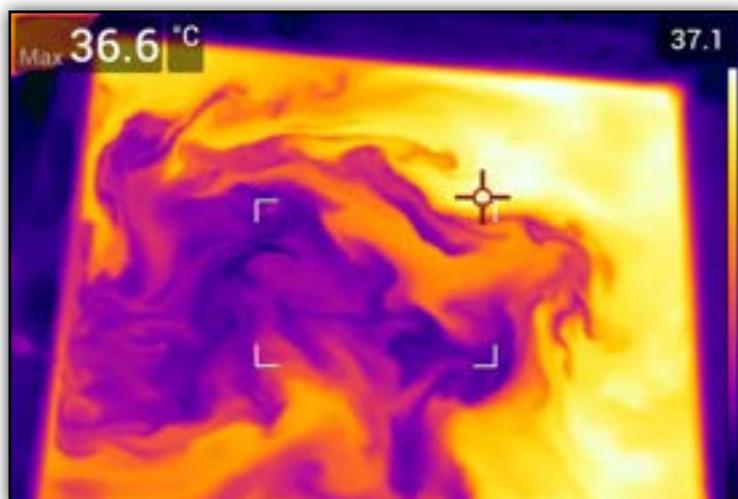


1) Tarnmantel

1. Einer von euch versteckt sich hinter der Rettungsdecke.
2. Richte die Wärmebildkamera anschließend auf die Wärmedecke und die Person dahinter.
3. Was ist zu sehen, was nicht?

2) Luftballon

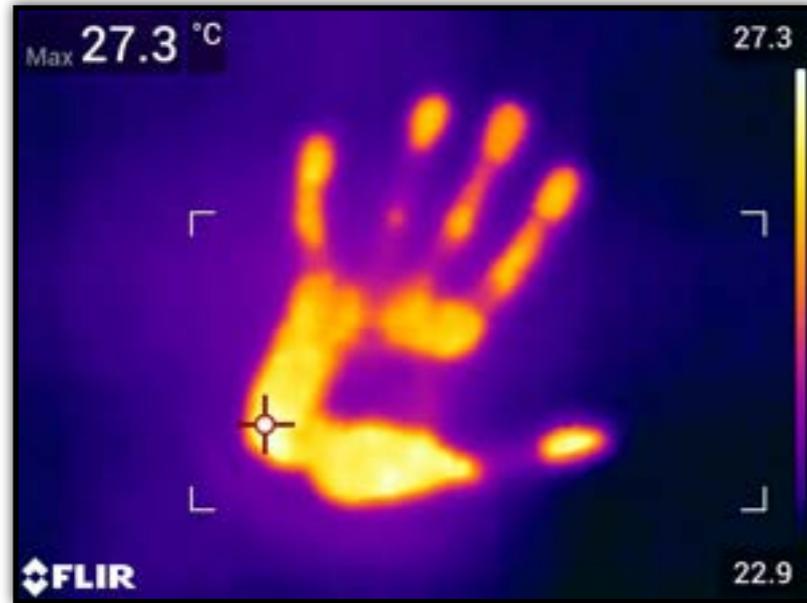
1. Halte den aufgeblasenen Luftballon vor dein Gesicht.
2. Dein Teampartner richtet die Wärmebildkamera auf den Luftballon.
3. Beobachte hierbei auch den vermeintlichen Temperaturunterschied an Objekten hinter dem Ballon.



3) Wasser (optional)

1. Fülle im Waschbecken einen Plastikbecher mit heißem Wasser und einen mit kaltem Wasser. Die Becher müssen sich immer **im** Waschbecken befinden.
2. Welchen Unterschied kannst du mit der Wärmebildkamera feststellen?
3. Leere die Becher im Waschbecken vorsichtig aus, beobachte wie sich das warme Wasser mit dem kalten mischt.

Versuche



4) Handabdruck

1. Lege eine Hand **auf** die (nicht-metallische) Wand.
2. Betrachte die Stelle an der Wand durch die Wärmebildkamera.

5) Reflexion

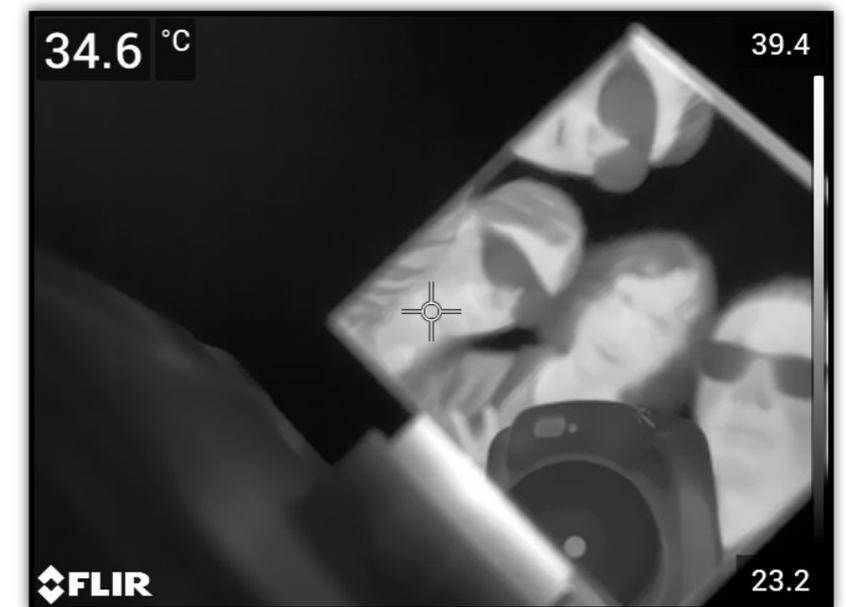
1. Halte eine Hand **über** eine metallische Fläche (z.B. den Labortisch).
2. Richte die Wärmebildkamera auf die Hand und das Metall und beobachte die Reflexion.

6) Gummiband

1. Halte ein Gummiband ca. 10 cm vor die Linse der Kamera und dehne es.
2. Lasse es im ausgedehnten Zustand auf Raumtemperatur abkühlen.
3. Lass es wieder zusammenfallen, und beobachte den Temperaturunterschied.

7) Fußabdruck

1. Reib mit den Füßen über den Boden.
2. Betrachte die Stelle am Fußboden mit der Wärmebildkamera.



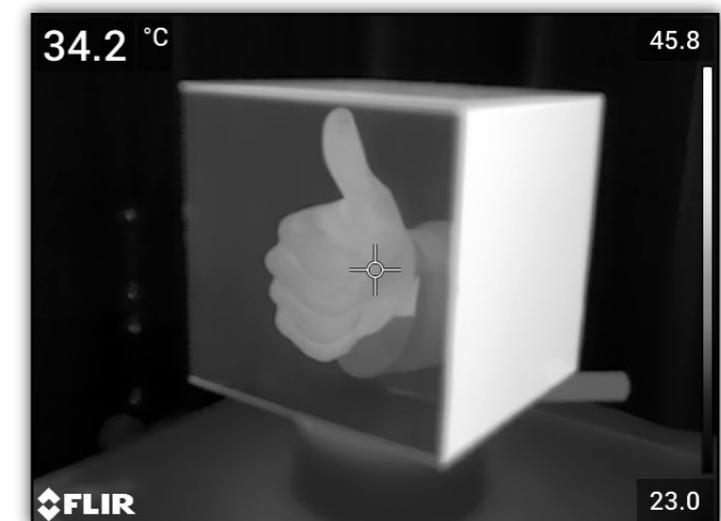
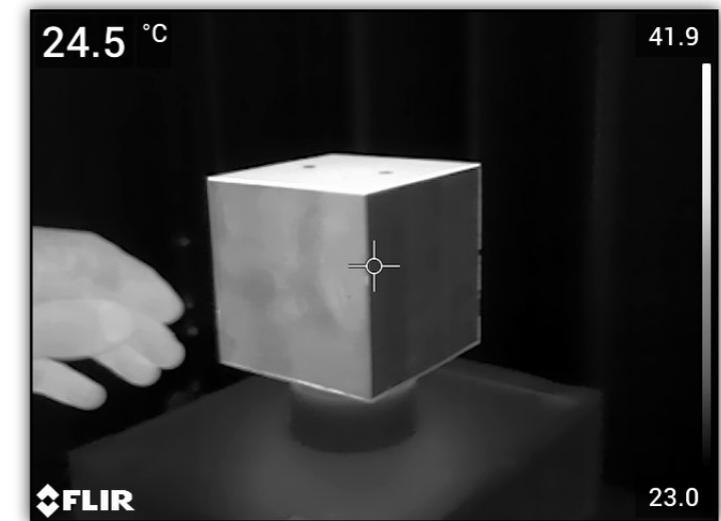
Die Oberfläche macht's

8) Lasiewürfel

1. Schalte den Lasiewürfel auf der Rückseite ein (evtl. Stromkabel einstecken).
2. Richte nach ein paar Sekunden die Wärmebildkamera auf die Seiten des Würfels.
3. Miss nun die Oberflächentemperatur der jeweiligen Seiten.



Lasiewürfel im Labor



Der Lasiewürfel ist ein Beispiel für die Auswirkung der Oberfläche auf das Infrarotbild. Alle Seiten des Würfels haben die gleiche Temperatur, jedoch sieht die Wärmebildkamera dies nicht. Sie sieht unterschiedliche Temperaturen, da alle Seiten unterschiedliche Reflexionseigenschaften und Emissionsfaktoren besitzen.

Die matte schwarze Oberfläche gibt die tatsächliche Temperatur am besten wieder, denn sie hat den höchsten Emissionsfaktor und die niedrigste Reflexion. Dagegen weisen alle anderen Oberflächen schwächere Emissionen auf, was nicht bedeutet, dass sie kälter sind. Es bedeutet, dass sie nur weniger Infrarotstrahlung abgeben.

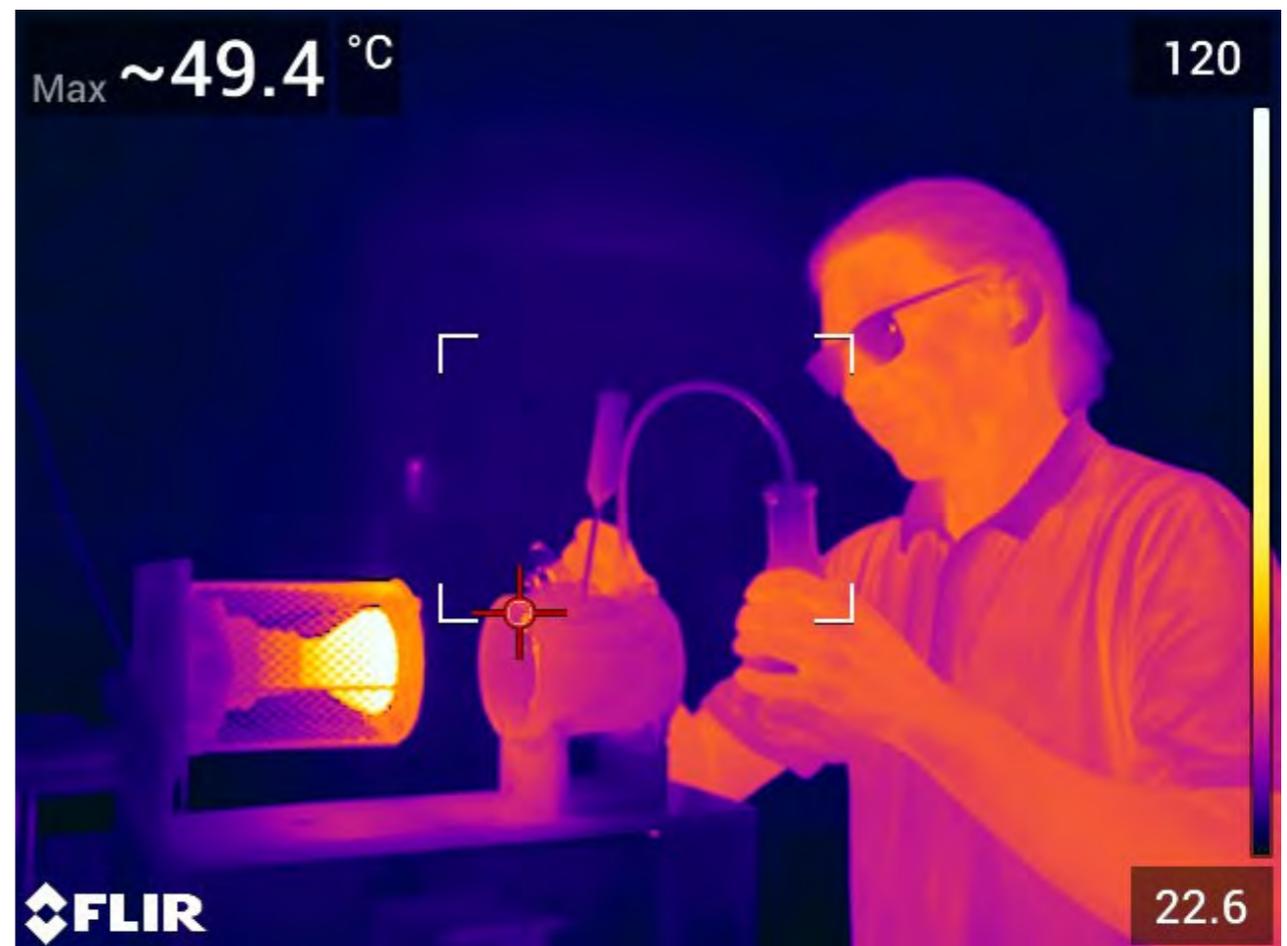
Teil 2: IR in der Atmosphäre

Klimawandel sichtbar machen

Der Energietransport von der Sonne zur Erde findet über elektromagnetische Wellen statt. Ein Bruchteil davon, das sichtbare Licht, dringt fast ungehindert durch die Atmosphäre. Es erreicht den Erdboden, der das Licht zum Teil absorbiert. Der Erdboden strahlt diese aufgenommene Sonnenenergie dann als Wärmestrahlung in Form von langwelliger Infrarotstrahlung in Richtung Weltall ab.

Ohne die Atmosphäre würde die Wärmestrahlung vollkommen ins Weltall abgestrahlt werden, auf der Erde würde ca. -18°C herrschen!

Auf dem Bild bekommst du einen Einblick in das Experiment, das gleich folgt.



Versuch 1 ist ein Einstieg für alle und Versuch 2 ist für Profis und Interessierte (zB. Praktikant*innen).

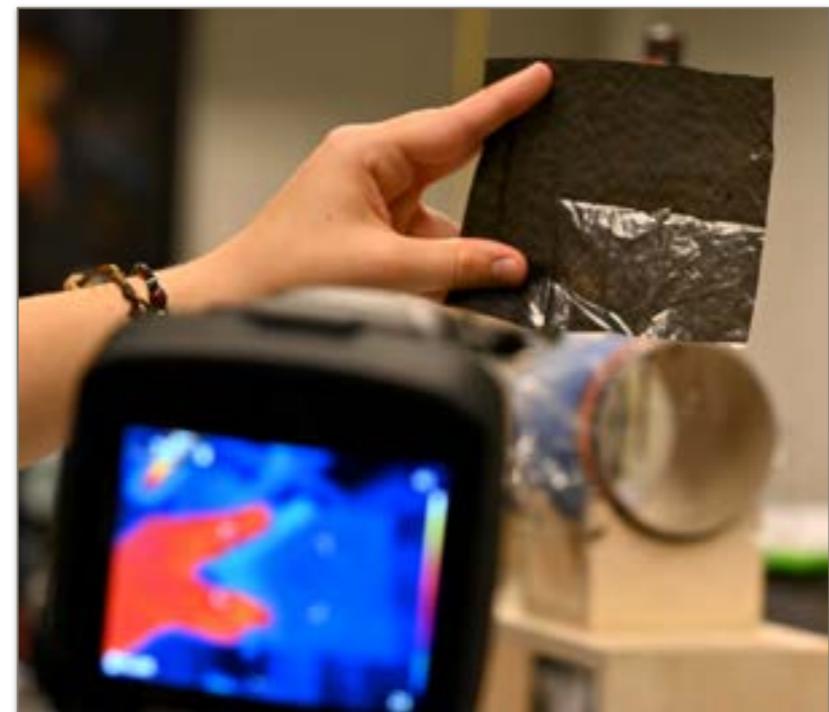
Versuch 1b: Licht-/IR-Durchlässigkeit

Welche Materialien sind durchlässig für Licht, welche für IR-Strahlung?

Sichtbares Licht und Infrarotstrahlung haben verschiedene Eigenschaften. Manche Materialien sind durchlässig für Infrarotstrahlung (IR-Strahlung), andere für sichtbares Licht - oder beides, oder gar nichts davon. Fülle die Tabelle aus, welches Material durchlässig für welche Strahlung ist!

Halte dazu wie im Bild links die Kamera auf die Objekte in der Mappe.

Material	Durchlässig für IR Strahlung	Durchlässig für sichtbares Licht
Glas		
schwarze Tüte		
Ballon		
Frischhaltefolie		



Die Treibhausgase in der Atmosphäre lassen sichtbares Licht beinahe ungehindert hindurch, absorbieren aber Infrarotstrahlung. Welches der untersuchten Materialien weist ebenfalls diese Eigenschaften auf?

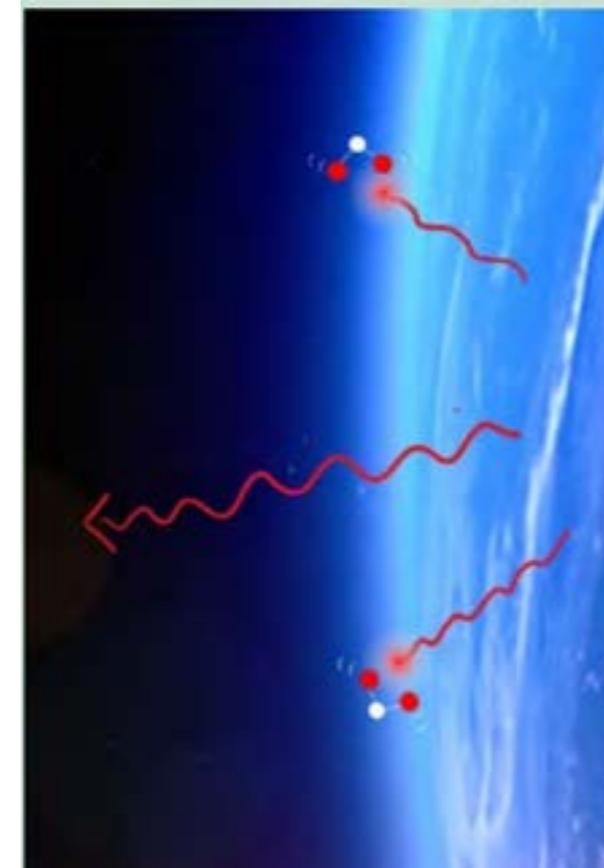
Versuch 2: Die Wirkung von Treibhausgasen

Die Atmosphäre der Erde besteht hauptsächlich aus Stickstoff (78 %) und Sauerstoff (21 %). Treibhausgase wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid (0,04 %) und Methan (0,0002 %) sind nur in Spuren vorhanden, haben aber trotzdem eine große Wirkung!

Die Moleküle der Treibhausgase absorbieren die unsichtbare Infrarotstrahlung, die die Erdoberfläche abstrahlt, und werden dadurch in Schwingung versetzt. Diese Schwingungsenergie wird anschließend zum Teil in Form von Bewegungsenergie auf Teilchen in der Umgebung übertragen – die Atmosphäre erwärmt sich.

Was passiert nun mit der **Temperatur** der Atmosphäre, wenn Menschen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe große Mengen von CO₂ in die Atmosphäre freisetzen?

Dazu müssen wir erst einmal verstehen, was es mit dem Treibhauseffekt auf sich hat.



Absorption von IR-Strahlung durch die Atmosphäre

Der natürliche Treibhauseffekt

Ohne Atmosphäre wäre die Temperatur auf der Erde so kalt, dass es für Menschen zu kalt wäre: -18°C .

Der **natürliche** Treibhauseffekt ist also für uns überlebenswichtig. Wie genau das funktioniert, erfährst du jetzt.

Die Erde befindet sich im Strahlungsgleichgewicht mit ihrer Umgebung. Das können wir uns zunutze machen: Es werden 340 Watt pro Quadratmeter durch die Sonne auf die Erde gestrahlt, von denen die Erde direkt 30% wieder ins All reflektiert. Dieses Rückstrahlvermögen α heißt "Albedo". Die Erde absorbiert somit $1-\alpha=70\%$ der Sonnenenergie. Multiplizieren wir das mit der Intensität, die auf die Erde auftrifft, kriegen wir die von der Erde absorbierte Energie pro Quadratmeter:

$$I_{\text{Erdoberfläche}} = (1 - \alpha) * 340 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ohne Atmosphäre wird die gesamte absorbierte Strahlung wieder emittiert. Über das Stefan-Boltzmann-Gesetz können wir nun die durchschnittliche Temperatur auf der Erde T berechnen, die ohne Atmosphäre herrschen würde:

$$I_{\text{Erdoberfläche}} = \sigma * T^4 \rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}}} = -18^{\circ}\text{C}$$

wobei σ die sog. Stefan-Boltzmann-Konstante ist ($\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$)

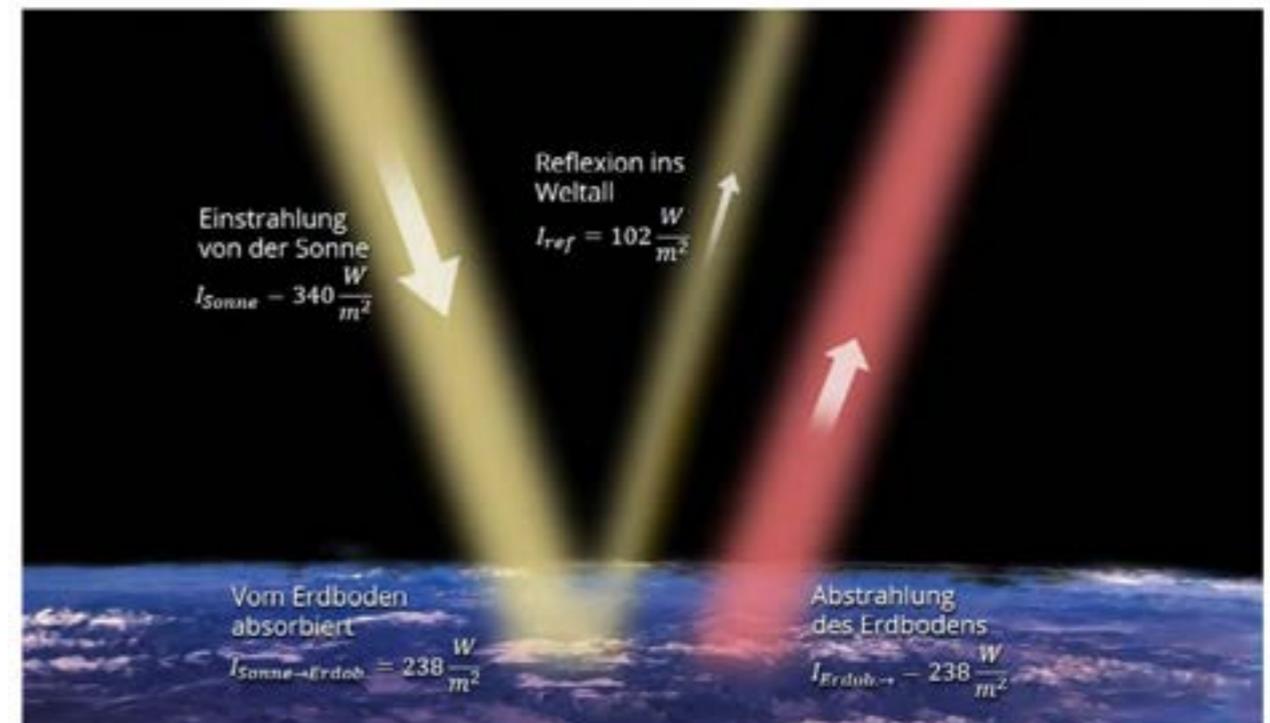


Abbildung 14 - Strahlungsbilanz einer Felsenerde ohne Atmosphäre (Credits: Strähle, Hohmann)

Der natürliche Treibhauseffekt

Mit Atmosphäre wird ein Teil der von der Erde emittierten Strahlung wieder auf die Erde zurückgestrahlt. Dazu gelten die gleichen Bedingungen wie ohne Atmosphäre, nur dass nun **Treibhausgase** ins Spiel kommen: Treibhausgase wie CO₂, Methan und Wasserdampf besitzen nun die Eigenschaft, einen Teil dieser, von der Erdoberfläche ausgehenden, Wärmestrahlung zu absorbieren.

Dies berücksichtigen wir in dem **Vorfaktor** $\frac{1}{1-0,4}$, denn die Treibhausgase erhöhen die emittierte Intensität der Erdoberfläche, weil sie ca. 80% der von der Erde emittierten Strahlung absorbieren.

$$I_{\text{Erdoberfläche}} = \sigma * T^4 \rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{1-0,4} * 238 \frac{W}{m^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 16^\circ C$$

Somit ist die durchschnittliche Temperatur auf der Erde dank der Treibhausgase 16° C, und Leben ist möglich!

Wie genau dieser Vorfaktor zustande kommt, kannst du bei Interesse [hier](#) nachlesen.

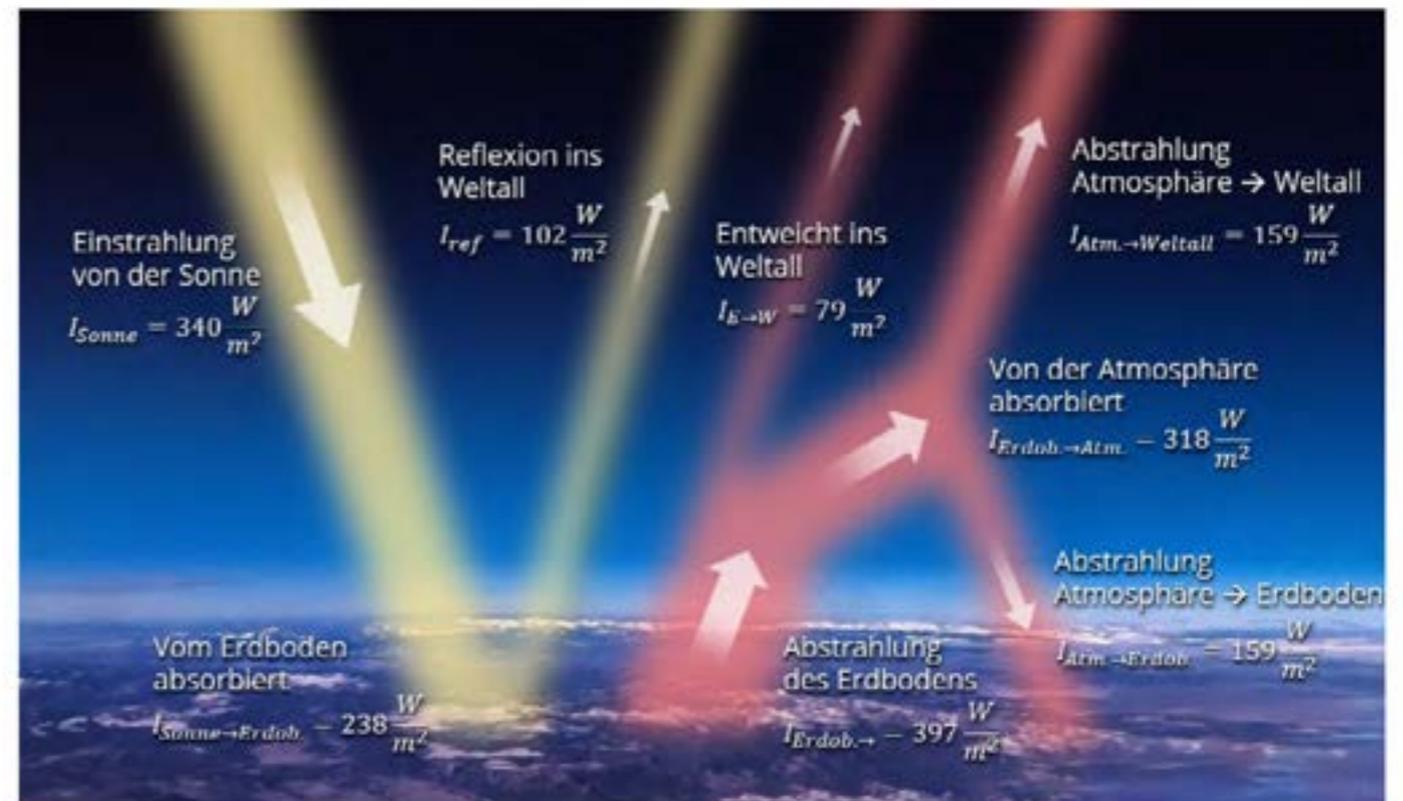


Abbildung 17 – Strahlungsmodell mit Atmosphäre (Credits: Strähle und Hohmann)

Wo ist der Haken?

Und nun kommt der Mensch ins Spiel: Die Temperatur auf der Erde hängt von der Fähigkeit der Atmosphäre ab, die im Infrarotbereich liegende thermische Strahlung der Erdoberfläche zu absorbieren (und damit auch zurückzustrahlen). Was passiert nun, wenn der Mensch diese Absorptionsfähigkeit erhöht?

Angenommen, der Mensch erhöht die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre so, dass nun 85% statt 80% der von der Erde emittierten Strahlung von den Treibhausgasen absorbiert werden.

Der **Vorfaktor** erhöht sich nun zu $\frac{1}{1 - 0,425}$.

Fügen wir diesen geänderten Faktor in unsere Rechnung ein, dann berechnen wir, dass sich die durchschnittliche Temperatur der Erde um 3° C erhöht hat!

$$I_{\text{Erdoberfläche}} = \sigma * T^4 \rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{1 - 0,425} * 238 \frac{W}{m^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 19^\circ C$$



Diese Erderwärmung hat drastische Folgen für den Planeten, weil wir den natürlichen Kohlenstoffkreislauf durcheinanderbringen und den Planeten aufheizen. Die Folgen des anthropogenen Klimawandels wie ein erhöhter Meeresspiegel, höhere Wahrscheinlichkeiten für schlimmere Naturkatastrophen, das Aussterben vieler Tierarten oder die Zunahme von Hitzetoden sind dir sicher bekannt.

Im folgenden Experiment kannst du dich selbst überzeugen, was mit der Temperatur der Atmosphäre passiert, wenn Menschen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe große Mengen von CO₂ in die Atmosphäre freisetzen.

Vorbereitung (meist schon gemacht)

Für unsere Experimente brauchen wir folgende *Geräte*:

- ✓ Keramik-Infrarotstrahler im Schutzkorb
- ✓ Pappröhre auf Holzhalterung
- ✓ Stopfen, Frischhaltefolie und Gummis
- ✓ Digitalthermometer
- ✓ Erlenmeyerkolben mit Stopfen und Schlauch
- ✓ Natron, Zitronensäure und Wasser



Experiment: Absorption von Wärmestrahlung I

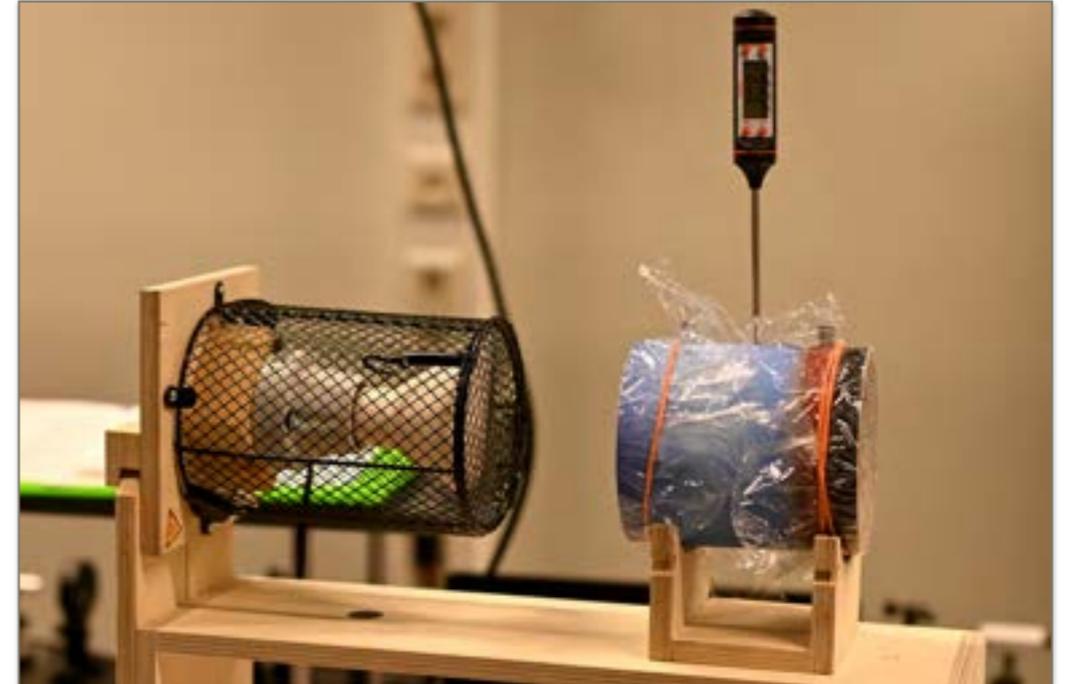
- Steckt den Keramik-Infrarotstrahler mit der Holzhalterung auf die nach oben geklappten Füße des Holzrahmens und schiebt die Holzhalterung für die Pappröhre bis zum Anschlag in die beiden Löcher (s. Bild).
- Verschließt die großen Öffnungen der Pappröhre mit Frischhaltefolie und Haushaltsgummis und befestigt die Pappröhre dann so mit Gummis auf der Holzhalterung, dass der Abstand zwischen Infrarotstrahler und Dose 8cm beträgt.
- Steckt das Thermometer in das kleine Loch in der Mitte (sodass die Spitze mittig in der Röhre ist) und verschließt die beiden anderen Löcher (CO₂-Zufuhr und Luftauslass) mit je einem Stopfen.
- Schaltet den Infrarotstrahler ein. Wartet, bis sich die Temperatur in der Dose innerhalb von 30 Sekunden nicht mehr ändert und man davon ausgehen kann, dass die Gleichgewichtstemperatur erreicht ist (ca. 27 °C). Dies kann bis zu 25 Minuten dauern, wenn der Strahler noch nicht aufgeheizt war.

Achtung! Sehr heißer Strahler: Verbrennungsgefahr! Chemikalien: Schutzbrille tragen!

Versuch 2.1: Durchführung

CO₂ absorbiert Strahlungsenergie

1. Startet das Experiment, wenn die Temperatur konstant ist und notiert sie.
2. **CO₂ erzeugen und in die Dose leiten:** Je zwei Teelöffel Natron und Zitronensäure im Erlenmeyerkolben (noch ohne Wasser) mischen und die beiden kleinen Stopfen aus der Dose entfernen. Dann den Schlauch durch eines der Löcher schieben, ca. 30 ml Wasser zur Säure-Natron-Mischung geben und den Stopfen mit Schlauch zügig aufsetzen!
3. Schwenkt den Erlenmeyerkolben leicht und entfernt nach ca. eineinhalb Minuten den Schlauch wieder aus der Dose. Verschließt nun die Löcher zügig wieder mit den kleinen Stopfen. (1)
4. Beobachtet die gemessene Temperatur in den nächsten Minuten und wartet, bis sich erneut eine Gleichgewichtstemperatur einstellt. Notiert deren Wert und vergleicht mit der vorigen Temperatur.



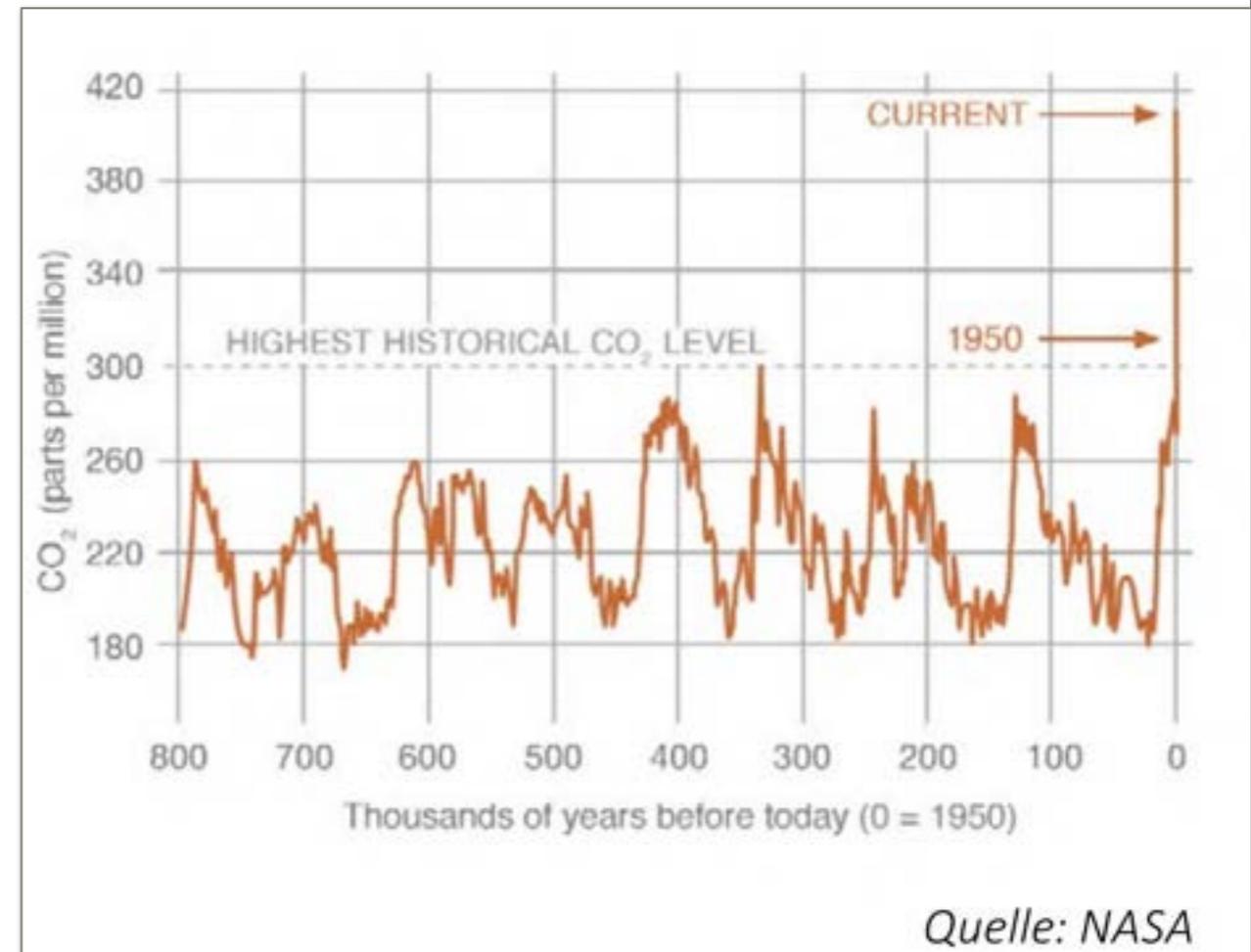
(1) Die CO₂-Konzentration in der Dose ist nun stark erhöht - viel höher als die es auf der Erde ist. Dies ist notwendig, da das Papprohr ja nur einige cm lang ist, die Atmosphäre jedoch einige km dick!

Aufgabe

Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird in parts per million (ppm) gemessen. Es wird also angegeben, wie viele Moleküle CO₂ eine Million Moleküle trockene Luft enthält. Heutzutage ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre viel höher als vor der Industrialisierung (1750).

? Betrachte das Diagramm. Was führt ca. seit dem 19. Jahrhundert zum beobachteten **Anstieg** der Treibhausgaskonzentration?

? Wie hängt das **Experiment** mit diesen **Daten** zusammen?



! Die Verbrennung fossiler Brennstoffe (zB. Kohle, Erdgas, Erdöl) setzt CO₂ frei. Die Abholzung der Wälder trägt ebenso zum Anstieg der Treibhausgaskonzentration bei. Indem es immer wärmer wird, schmelzen verkürzt die Polkappen und Permafrostböden, unter denen Methan- und CO₂vorkommen eingefroren liegen. Schmilzt das Eis, werden auch diese Treibhausgase freigesetzt.

! Im Experiment: Der zweite ermittelte Temperaturwert ist höher als der Ausgangswert. Die höhere CO₂-Konzentration führt also zum Anstieg der Temperatur im System (nachlesen bei: Wirkung von Treibhausgasen). Im Diagramm: Die erhöhte CO₂-Konzentration führt zu einem Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur.

Versuch 2.2: Durchführung

Infrarotstrahlung wird abgefangen

Zusätzlich zur Messung der Temperatur in der Dose kann die Strahlung gemessen werden, welche durch die Dose hindurchgeht (Transmission).

Vorbereitung: Halte die Wärmebildkamera so, dass die Wärmestrahlung durch die Pappröhre mittig auf die Messöffnung der Wärmebildkamera trifft.

1. Wartet, bis die Temperatur konstant bleibt (wie oben) und beobachtet dann die Temperaturanzeige.
2. Beobachte das sichtbare Bild der Wärmebildkamera beim Einfüllen von CO₂ in die Pappröhre.

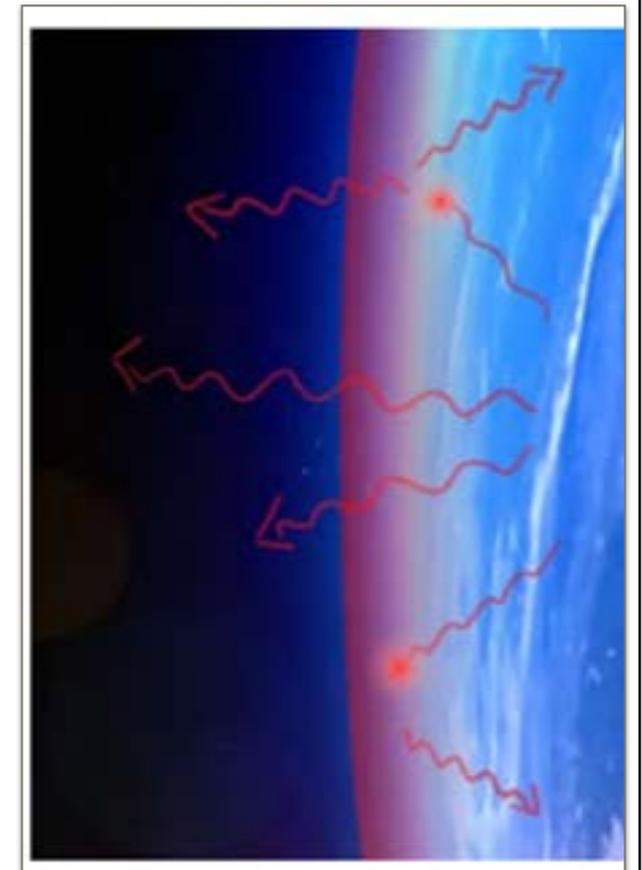


Quiz

Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren einen Teil der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung. Durch die Aufnahme dieser Strahlungsenergie erwärmt sich die Atmosphäre. Aufgrund dieser zweiten Strahlungsquelle (also Sonne + Atmosphäre) erwärmt sich die Erdoberfläche – und zwar umso stärker, je mehr Energie die Atmosphäre durch Treibhausgase absorbiert. Die Atmosphäre gibt die absorbierte Energie nun wiederum gleichmäßig in alle Richtungen ab, also auch in Richtung Erde.

Was ist die Forscherfrage für diesen Versuch?

- Warum führt eine Absorption von Infrarotstrahlung in der Atmosphäre zu einer Erwärmung der Erdoberfläche?
- Warum führt eine Erwärmung der Erdoberfläche zu einer erhöhten CO₂-Konzentration?
- Warum führt eine Emission von IR-Strahlung der Hitzequelle zu einer Rückstrahlung von sichtbarem Licht in der Atmosphäre?



Rückstrahlung von IR-Strahlung durch die Atmosphäre

VERSUCH 6: HOLOGRAPHIE

Holographie

Was ist eigentlich ein Hologramm?

Wer Filme wie Star Wars kennt, wird sicher schon einmal von dem Begriff "**Hologramm**" gehört haben. Hologramme kommen aus dem Altgriechischen und bedeuten so viel wie „Vollständige Abbildung“. Somit hat es im Vergleich zu einem klassischen Foto, das nur ein **zweidimensionales** Bild liefert, den Anspruch ein Bild vollständig einzufangen also **dreidimensional** zu sein. Doch was ist eigentlich ein Hologramm? Fangen wir zunächst einmal mit Peppers Ghost an:



Peppers Ghost

Im 19. Jahrhundert wurde von John Henry Pepper eine Technik für spezielle Effekte entwickelt, um Theatergäste zu erstaunen. Mitten in der Vorstellung erschien der Geist eines Menschen zwischen den Schauspielern, den sie **nicht berühren** konnten.

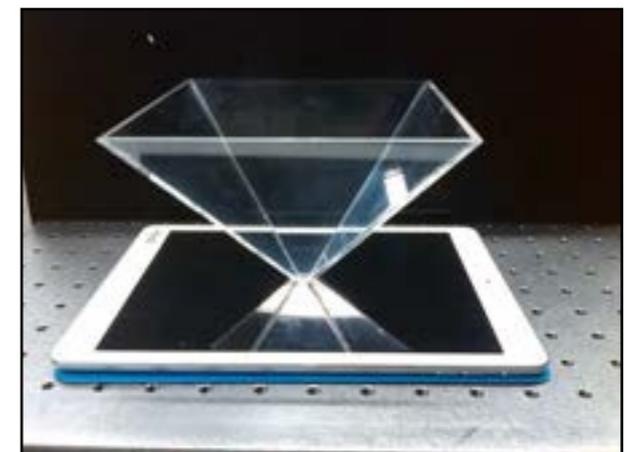
Diese Technik lässt sich mit einem iPad und einer **Holopyramide** aus Plexiglas nachbauen.

1. Für diesen Versuch musst du das Licht etwas dimmen.
2. Starte auf dem iPad unter „Videos“ ein Holo-Video, das dir gefällt.
3. Lege das iPad auf das Gestell mit dem Bildschirm zur Spitze der Pyramide. Steht das Bild auf dem Kopf, dann stelle die „Holopyramide“ mit der Spitze in die Mitte des Bildschirms. Die Flächen sollten zu den Bildern zeigen.
4. Blickt man nun seitlich auf die Pyramide, sieht man ein schwebendes Bild.

Besprecht in der Gruppe die Fragen:

Ist das für dich ein **Hologramm**?

Und welche **Eigenschaften** machen für dich ein Hologramm aus?



So schön das schwebende Bild auch aussieht, es ist **kein** Hologramm!

Hier wird nur ein Effekt genutzt, den jeder kennt. Sitzt man beispielsweise im Zug, so kann man andere Leute durch die Spiegelung in den Scheiben beobachten. Sie sitzen scheinbar außerhalb des Zugs, wie Geister in der Landschaft. Bei der Pyramide handelt es sich also lediglich um eine Spiegelung des Bildschirms im Glas der Pyramide.

Bewegt man den Kopf bei der Betrachtung der Pyramide, so erkennt man, dass sich die Perspektive auf dem Bild nicht ändert. Es bleibt also wie auf dem iPad zweidimensional, auch wenn es frei im Raum schwebt. Beide Eigenschaften sollten bei einem echten Hologramm erfüllt sein.



Und wenn dich die „Holo-Pyramide“ schon vom Hocker haut, dann solltest du dir mal ein richtiges Hologramm anschauen.

Durchführung

1. Platziere das Auto mit den Reifen auf den Markierungen.
2. Schalte den Laser ein. (**Brille auf die Nase!**)
3. Betrachte das Auto durch die Scheibe.
4. Nimm das Auto aus dem Versuch und schau weiter auf die Scheibe.

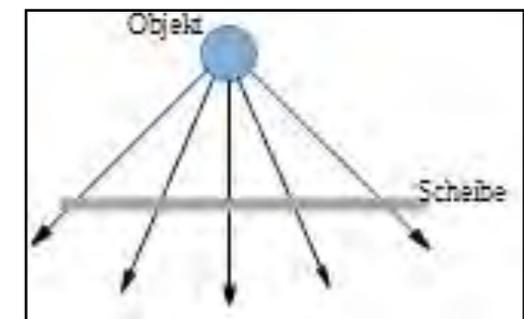


Ist das jetzt ein Hologramm?

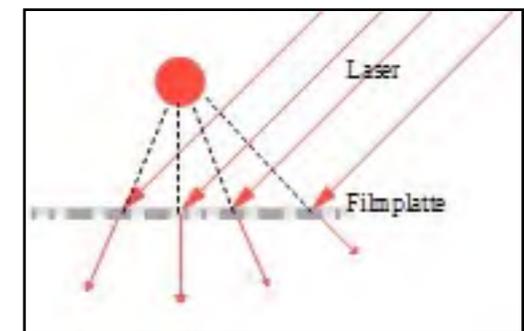
Holographie verstehen

Um Holographie zu verstehen, betrachtet man folgendes **Gedankenexperiment**:

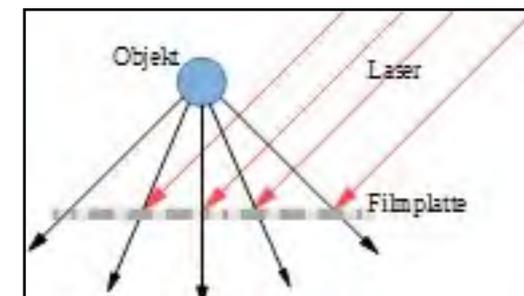
1. Ein Objekt wird mit einem Laser beleuchtet und durch eine transparente **Filmplatte** betrachtet. Der Lichtweg vom Objekt zum Beobachter ist hier durch die schwarzen Pfeile verdeutlicht. Man sieht logischerweise das Objekt dreidimensional und aus verschiedenen Blickwinkeln.



2. Nun wird die Scheibe zusätzlich von einem Laser bestrahlt, der durch die parallelen roten Strahlen dargestellt ist. Auf der Filmplatte wird nun durch die Interferenz beider Lichtquellen ein Muster eingebrannt.



3. Nimmt man nun das Objekt aus dem Experiment heraus und bestrahlt die beschriebene Filmplatte nur noch mit dem Laser, so wird dieser am Interferenzmuster **gebeugt**. Die gebeugten Strahlen entsprechen nun den ehemaligen Objektstrahlen. Für den Betrachter der Filmplatte macht es nun also keinen Unterschied, ob das Objekt **wirklich** hinter der Filmplatte ist oder nicht. Im Auge kommen die gleichen Strahlen an. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Objekt nur in der Farbe des Lasers leuchtet.



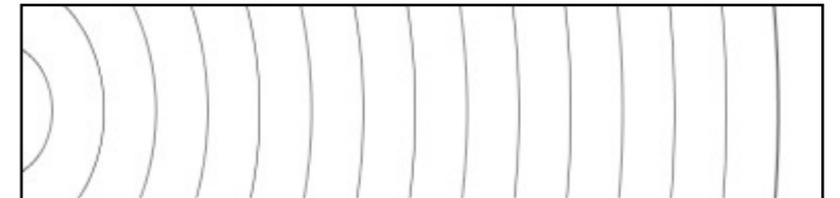
Man

alle-
renz

Die Physik der Holographie

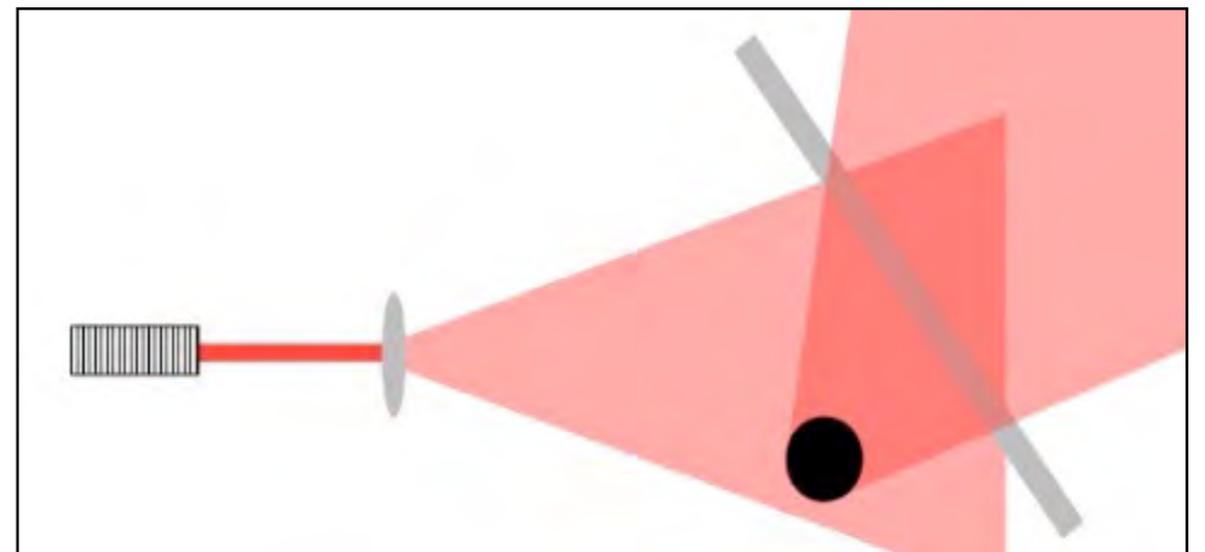
Für Interessier-
te

Strahlt eine **Wellenfront** von einem Ortspunkt aus in den Raum, so kann man von einer **Kugelwelle** reden, da die Orte aller Maxima konzentrische Kugelschalen um den Punkt bilden. Je weiter man sich vom Zentrum entfernt, desto geringer wird die Krümmung dieser Kugelschalen. In einiger Entfernung kann sie sogar fast nicht mehr wahrgenommen werden. Somit kann eine Kugelwelle im **Fernfeld** als ebene Welle verstanden werden.

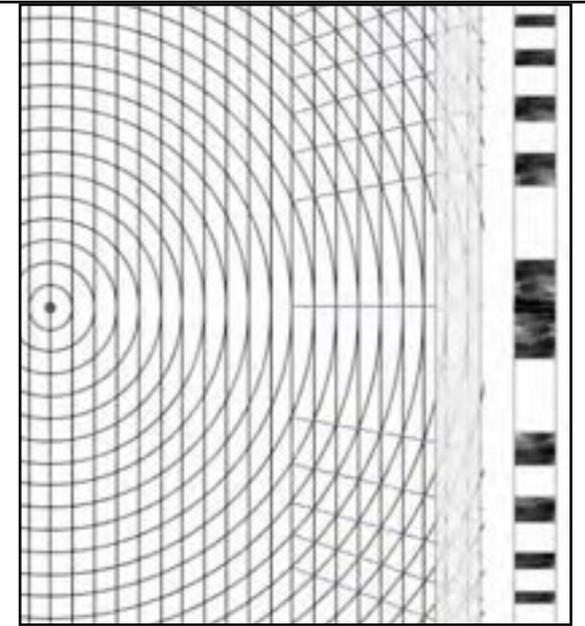


Diesen Effekt macht man sich bei der Holographie zu nutze. Der einfachste Aufbau mit dem man ein Hologramm aufnehmen kann besteht nur aus einem Laser und einer Linse. Mit der Linse wird der Laserstrahl aufgeweitet und somit zur Kugelwelle. Stellt man nun das Objekt und die Filmplatte wie auf dem folgenden Bild in den aufgeweiteten Strahl, können die am Objekt reflektierten Wellen (Objektstrahl) und die Welle direkt von der Linse kommend (Referenzstrahl) auf der Filmplatte **interferieren**.

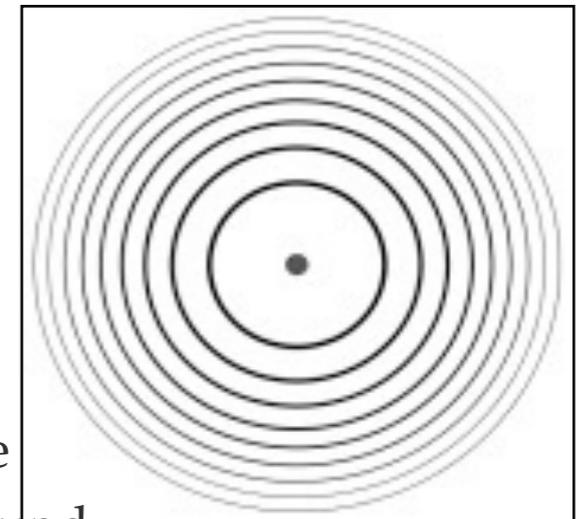
Da nun die Filmplatte im Fernfeld (ebene Welle) des Referenzstrahls und im Nahfeld (Kugelwelle) des Objektstrahls liegt, können diese beiden Wellengeometrien interferieren.



Nehmen wir der Einfachheit halber an, wir holographieren einen einzelnen Objektpunkt. Von ihm geht eine **perfekte** Kugelwelle aus, die mit einer perfekten ebenen **Referenzwelle** interferiert. Dabei entsteht kein willkürliches Muster wie es vorher beschrieben wurde, sondern eine Geometrie die sich **Fresnelsche-Zonenplatte** nennt. Im folgenden Bild ist so eine Überlagerung dargestellt. Die schwarzen Linien sind die Wellenfronten und kennzeichnen jeweils die Maxima der Wellen. Wird die Filmplatte von ihnen durchsetzt, tritt an den Stellen, die durch die blauen Stellen markiert wurden, eine konstruktive **Interferenz** auf. In den Zwischenbereichen tritt eine destruktive Interferenz auf. Wird eine Filmplatte entwickelt, so schwärzen sich die Bereiche konstruktiver Interferenz schwarz und unbelichtete Bereiche bleiben transparent.



Auf der Filmplatte sind nun **konzentrische Kreise** zu sehen, deren Dicke und Abstand zueinander nach außen hin abnimmt. Betrachtet man eine entwickelte Filmplatte, so erkennt man auf ihr diese einzelnen **Fresnelschen Zonenplatten**.



Dieses Muster an Fresnelschen Zonenplatten ist nun in der Lage, Wellenfronten zu beugen. Wie im Abschnitt „Holographie verstehen“ bereits erklärt, ist die Filmplatte eine Art Zwischenspeicher. Die komplexe Objektwelle wird durch sie rekonstruiert und ist somit für den Betrachter nicht mehr von der echten Objektwelle zu unterscheiden.

Wenn du mehr über Interferenz erfahren möchtest, dann mach den Versuch Michelson-Interferometer!

Wasser als Lichtleiter

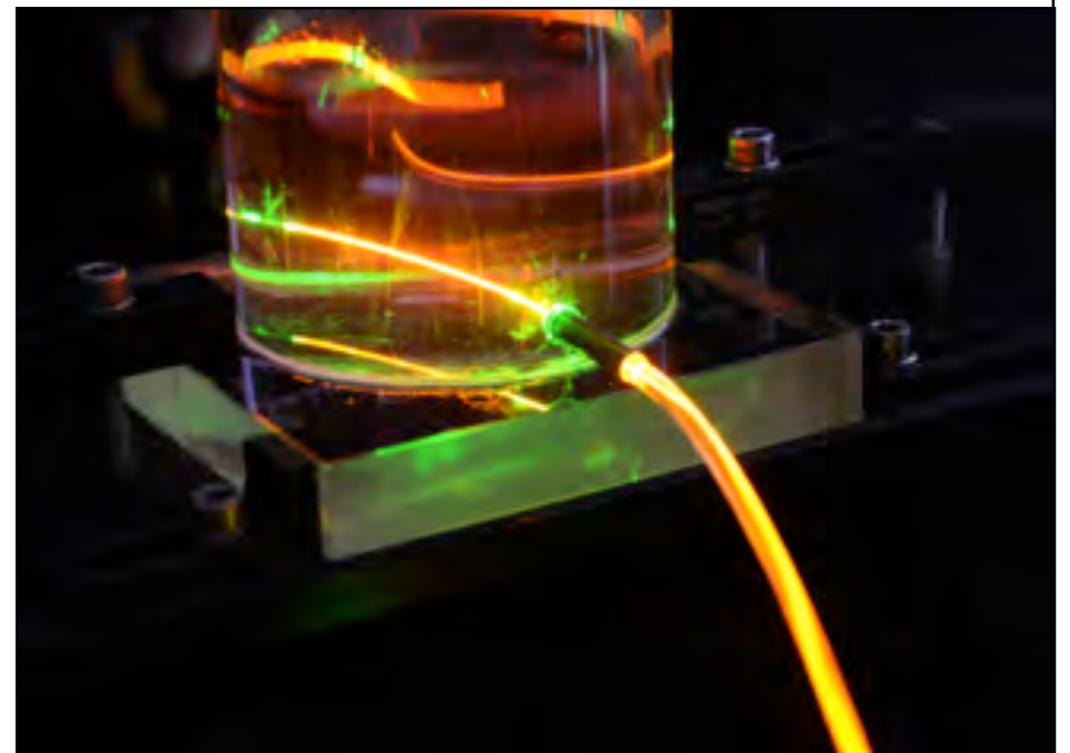


Kann man Licht um Kurven leiten?

Weltweit werden pro Tag über 2,5 Trillionen Bytes an Daten produziert. Die Emissionen dafür sind beachtlich: Wäre das Internet ein Land, läge es weltweit beim CO₂-Ausstoß auf Platz 6. Um diese enorme Datenrate zu erbringen, braucht man Lichtleiter (wie **Glasfaserkabel**).

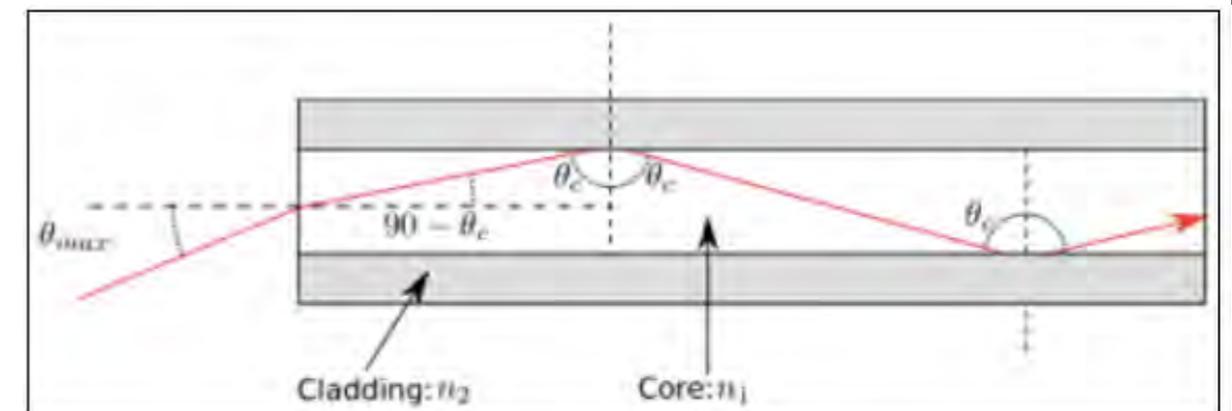
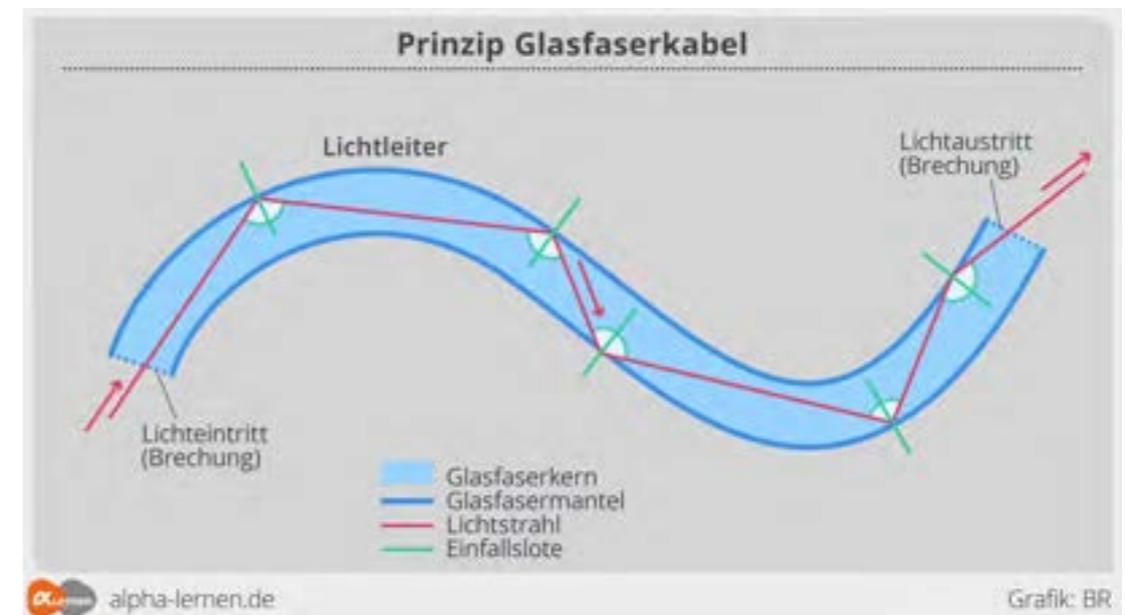
Dazu benötigt man Lichtleiter. In Deutschland sind bereits 650.000 km davon verlegt. Das entspricht dem doppelten Abstand von der Erde zum Mond!

Bei diesem Versuch kannst du die Funktionsweise von Lichtleitern mit eigenen Augen sehen.



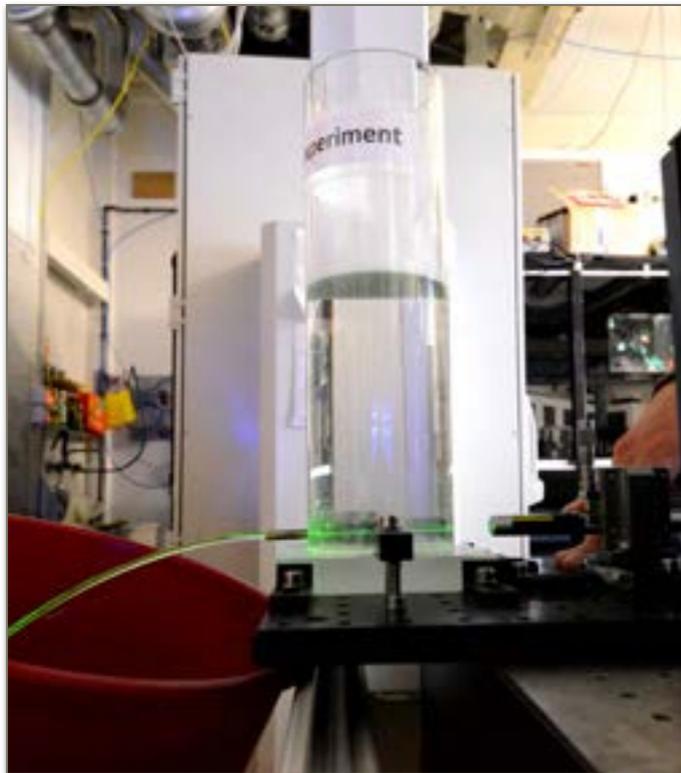
Grundlagen

Trifft Licht auf eine **Grenzschicht** verschiedener Medien mit unterschiedlichem **Brechungsindex**, kommt es zu Brechung. Lichtleiter bestehen aus einem Kernmaterial, das einen wesentlich höheren Brechungsindex als das Mantelmaterial hat. Dadurch kommt es, wenn ein Lichtstrahl flach auf die Grenzschicht trifft, zur **Totalreflexion** und der Lichtstrahl bewegt sich entlang der Leitung. Der gleiche Effekt tritt auch auf, wenn Licht am Übergang von Wasser und Luft reflektiert wird. Darum kann auch ein Wasserstrahl als Lichtleiter wirken. Weil die Totalreflexion aber nur auftritt, wenn das Licht in einem ausreichend flachen Winkel auftrifft, wird nur Licht, das innerhalb eines Akzeptanzwinkels in den Lichtleiter fällt, weitergeleitet.



Totalreflexion, Hecht, Optik

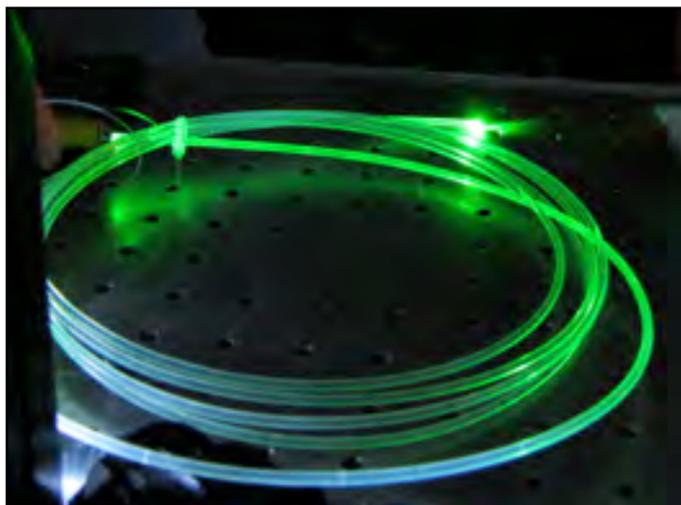
Durchführung



Gieße Wasser aus dem Eimer in den Plexiglasbecher.

Achtung!! Der Stöpsel muss stecken und wenn du ihn rausziehst, halte den Eimer ganz hoch!!!!

Jetzt drücke von oben (und unten) auf den Laserpointer und leuchte von hinten in den ausfließenden Wasserstrahl. Was beobachtest du?



VERSUCH 8: LECKER IM LICHT

Lecker im Licht

Unreife Tomaten: Farbmanipulation im Supermarkt?

Egal ob eine knackige grüne Paprika, frisch glänzendes Bauernbrot oder das rote, saftige Fleisch von der Theke: Im Supermarkt schaut alles lecker aus. Aber wie machen die das? Und lassen sich unsere Sinne sogar austricksen?

In diesem Kurs nehmen wir das unter die Lupe.. Dazu reicht es nicht, Licht nur physikalisch zu betrachten. Wir müssen die Physiologie mit-einbeziehen! Was machen unser Auge und das Gehirn mit dem Licht, das wir wahrnehmen?

Die Idee zu diesem Experiment stammt von Carolin Mantsch, die eine Seminararbeit mit dem Titel "Lecker im Licht - Wie beeinflusst die Beleuchtung das Aussehen unserer Supermarktwaren?" verfasst hat.

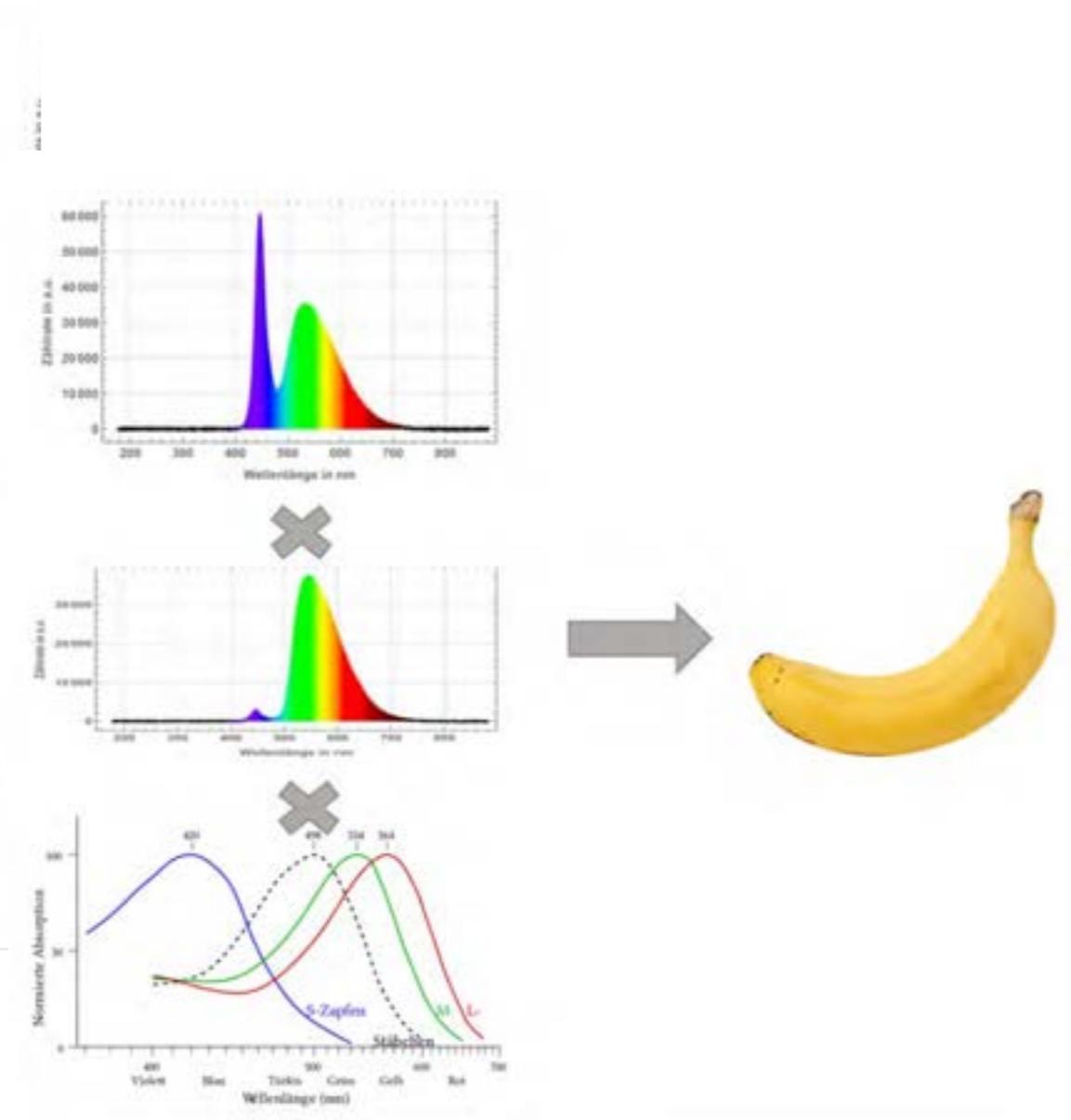


Bild: Carolin Mantsch

Wovon hängt unsere Farbwahrnehmung ab?

Wie du in der Graphik siehst, hängt unsere **Farbwahrnehmung** einer z.B. Banane von **drei Komponenten** ab:

1. Dem **Spektrum** der einfallenden Lichtquelle (oben)
2. Der **Reflektivität** des Gegenstandes im einfallenden Licht (mittig)
3. Der **Biologie** unseres Auges. Die Rezeptoren im Auge, mit denen wir Licht wahrnehmen, haben für verschiedene Farben unterschiedliche **Intensitätskurven**, die bei jedem Mensch etwas anders sind (unten)



All diese Komponenten zusammen beschreiben unseren **Sinneseindruck** der Banane. Wie genau du dir das vorstellen kannst, erfährst du Stück für Stück in diesem **Kurs**.

Grundlagen: Physik I

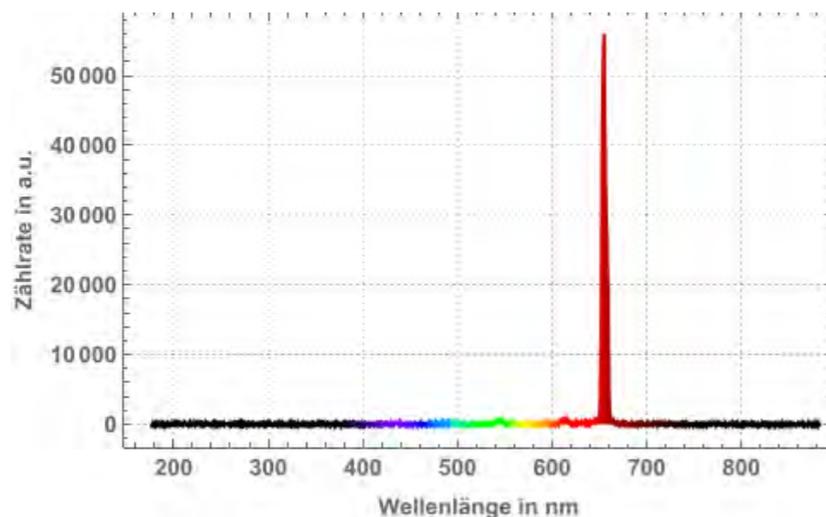
1. Spektrum der einfallenden Lichtquelle:

Hier siehst du das für den Menschen **sichtbare Spektrum** der elektromagnetischen Wellen. Dieser Teil des Spektrums reicht nur von **Wellenlängen** von ca. 380 nm bis 780 **nm**.

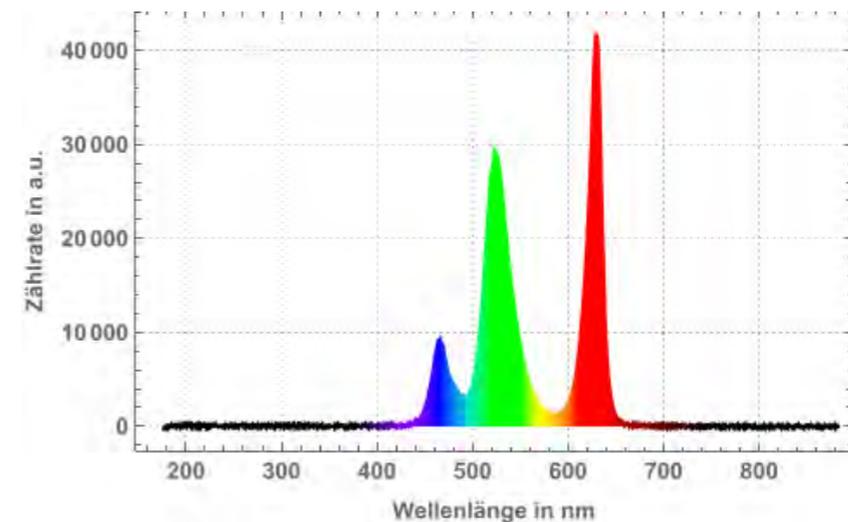


Das sichtbare Spektrum [Wikipedia]

Verschiedene **Lichtquellen** haben unterschiedliche **Spektren**. So emittiert eine einfarbige Lichtquelle, wie z.B. ein roter Laser, ein anderes Spektrum als eine LED-Leuchte. Dies kannst du hier sehen:



Spektrum eines roten Lasers



Spektrum einer weißen LED

Grundlagen: Physik II

2. Reflektivität des Gegenstands

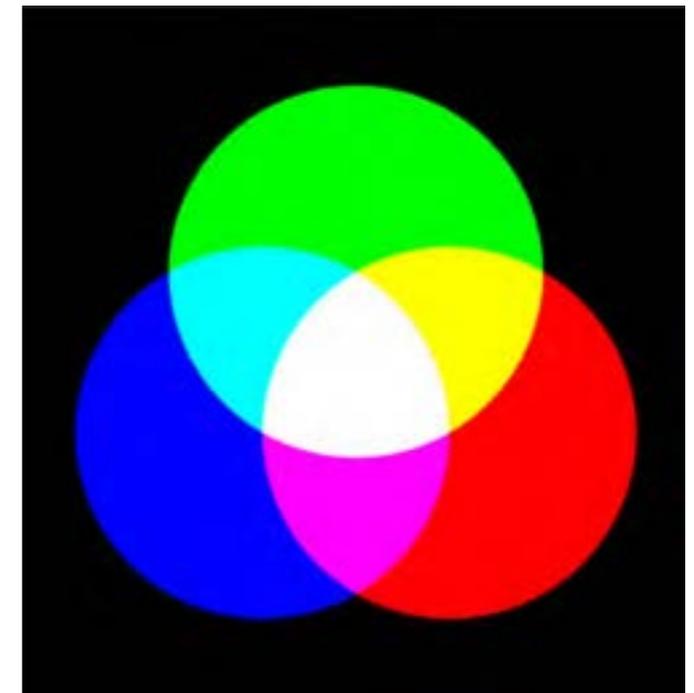
Je nachdem welche **Farben** reflektiert werden, verändert sich der **Sinnes-
eindruck** des Gegenstandes in unserem Auge.

Betrachten wir einen Gegenstand, z.B. im **Tageslicht**, nehmen wir eine **Farbe** wahr. Diese Farbe wird bestimmt durch den Anteil der **Wellenlängen** des **sichtbaren Spektrums**, die nach der **Reflexion** in unser Auge fallen.

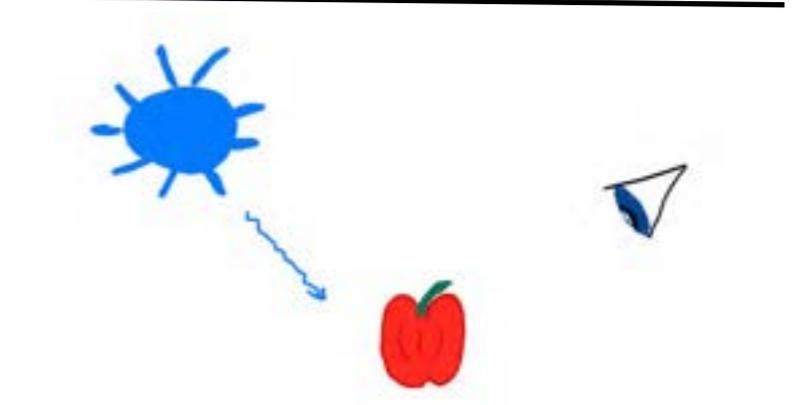
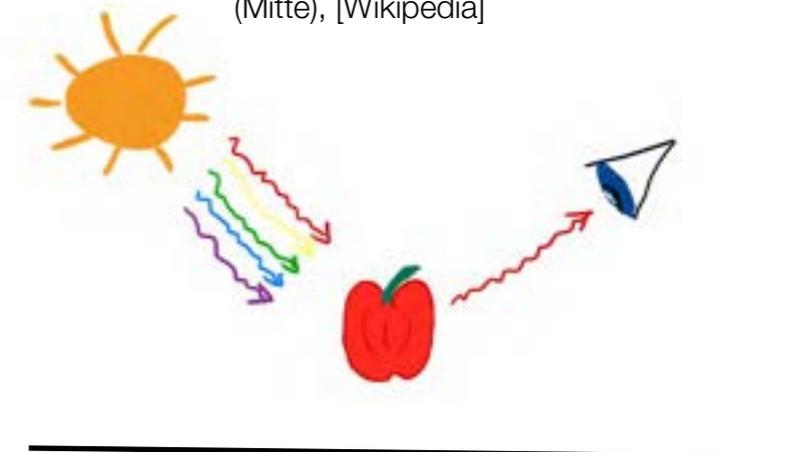
Weißes Licht ist die Überlagerung der drei **Grundfarben Grün, Blau und Rot**. Wird also bspw. grünes, blaues und rotes Licht einer Taschenlampe auf einer (weißen) Leinwand **überlagert**, erhalten wir **Weiß** (rechtes Bild) Das sichtbare Spektrum der **Sonne** enthält **alle** Farben und deshalb nehmen wir es als weiß wahr.

Beleuchten wir nun eine **Paprika** mit weißem **Licht** (=Überlagerung aller Farben), dann wird nur der rote Anteil des Lichts reflektiert und fällt in unser Auge. Der Rest wird **absorbiert** und somit erscheint die **Paprika rot**.

Beleuchten wir die Paprika jetzt aber mit **blauem** Licht, dann **absorbiert** sie dieses und die Paprika erscheint uns **dunkel**, weil der rote Teil nicht reflektiert wird.



Der Farbkreis mit weiß bei Überlagerung (Mitte), [Wikipedia]

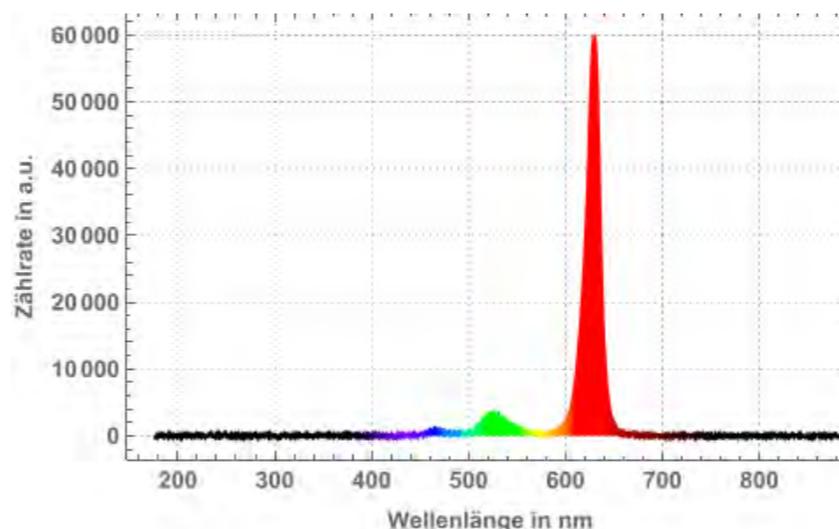
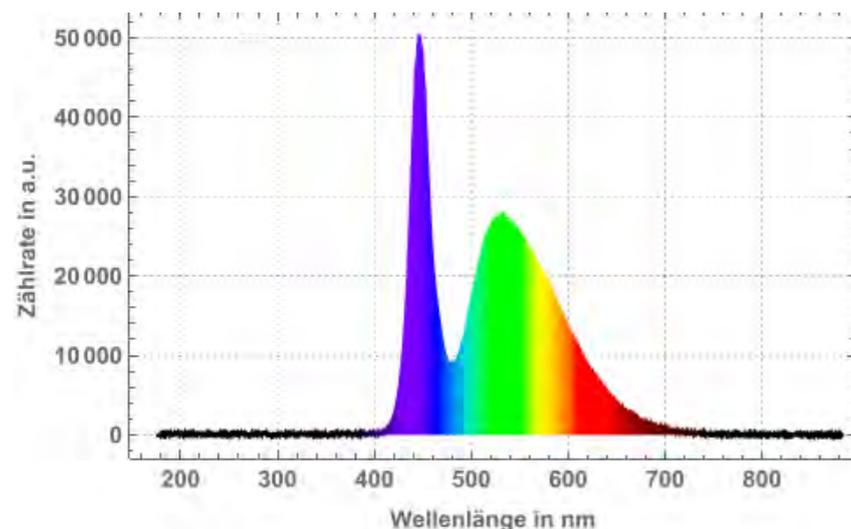


Skizze zur Reflektivität

Messung der Reflektivität

Wir können die **Reflektivität** einer Paprika auch durch eine **Spektralanalyse** darstellen. Im linken Bild siehst du das Spektrum der einfallenden Lichtquelle, hier ist es eine **LED**. Reflektiert wird fast nur der **rote Anteil** und das zu beinahe 100%. Deshalb nehmen wir die Paprika als rot wahr!

Achtung: Die **Reflektivität** hängt vom einfallenden **Spektrum** und dem reflektierenden **Gegenstand** ab!



Das klappt natürlich auch in der **Realität**. Dazu hat *Carolin Mantsch* eine **Tomate** mit grünem und roten Licht beleuchtet, und wir sehen, dass sie schön leuchtet und **lecker** aussieht.

Beleuchten wir die Tomate nur mit **grünem Licht**, ist sie dunkel und sieht nicht lecker aus. Wir müssen einen **Gegenstand** also immer mit Licht **seiner Farbe** beleuchten, damit er lecker aussieht.



Abb. 5: Beleuchtung einer Tomate mit rotem und grünem Licht



Abb. 6: Beleuchtung einer Tomate mit grünem Licht

Grundlagen: Biologie

04.11.22, 12:58

Cone-respo:

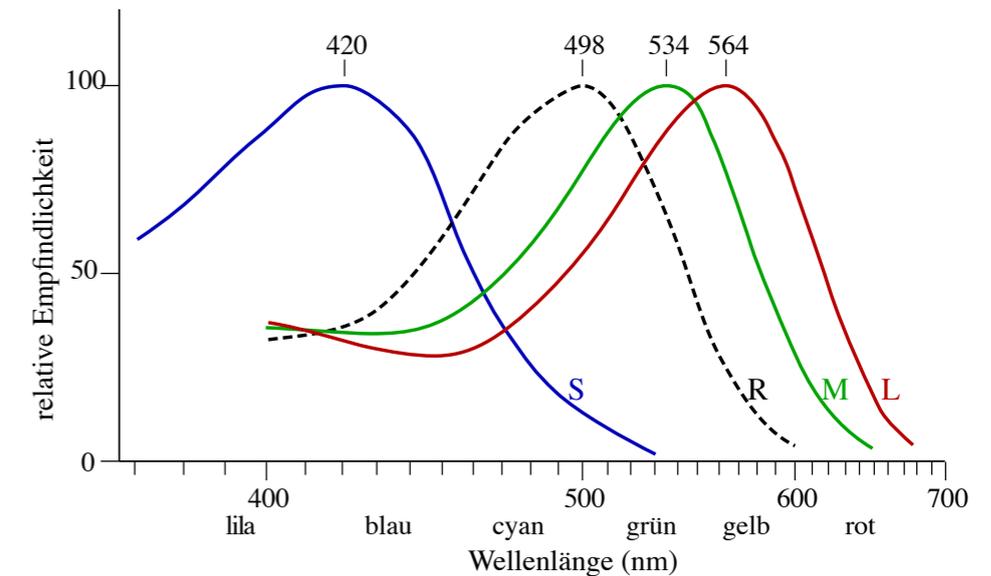
3. Die Biologie unseres Auges

Zapfen und Stäbchen:

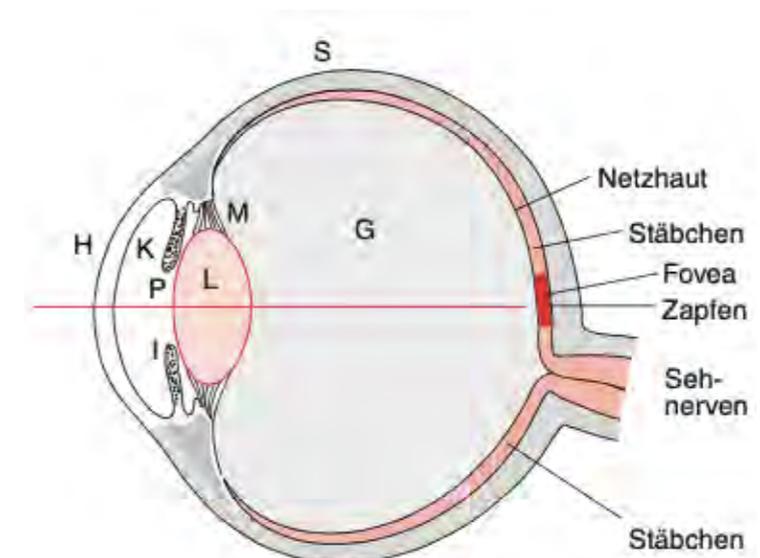
Zapfen (Abbildung rechts, durchgezogen, Tag) können durch drei verschiedene Rezeptoren **rot, grün und blau** wahrnehmen. Die **Helligkeitsempfindlichkeitskurven** siehst du rechts oben. Beim Sehen von Farben werden die Rezeptoren **unterschiedlich stark** angesprochen, was das Gehirn zu einem Sinneseindruck verarbeitet.

Die Zapfenart bestimmt, welche Grundfarben wir haben: Wenn Zapfen die Farben Rot, Grün und Blau wahrnehmen, sind das unsere Grundfarben. Die Überlagerung aller Grundfarben ist immer weiß.

Stäbchen (gestrichelt, Nacht) sind für die Wahrnehmung von **hell und dunkel** verantwortlich und werden bei Dunkelheit aktiviert. Die **Empfindlichkeitskurve** bei **Nacht** siehst du rechts oben schwarz gestrichelt.



Empfindlichkeit des Auges [Wikipedia]



Querschnitt des Auges [Demtröder 2, Lehrbuch der Experimentalphysik]

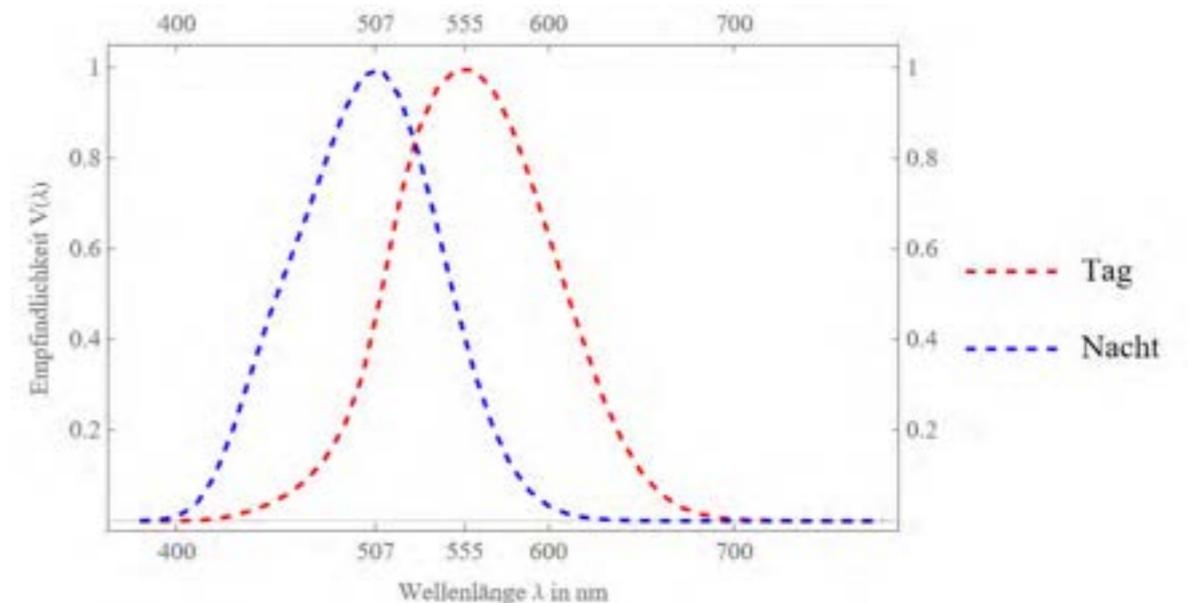
Einfluss des Auges

In der Dämmerung sehen wir sowohl mit **Stäbchen** als auch mit **Zapfen**.

In der Grafik rechts siehst du die **Empfindlichkeitskurven** (V-Lambda-Kurve) für **Zapfen** und **Stäbchen**.

Die Graphik bedeutet, dass wir grün (bei etwa **555 nm**) tagsüber am besten wahrnehmen und Nachts dahingegen am besten **507 nm**.

Die **V-(Lambda)-Kurve** ist für uns von Bedeutung, weil sie uns aufzeigt, wie unsere **menschliche Biologie** den *echten* **Farbeindruck** verfälscht. Nicht alle Menschen haben die gleiche **Empfindlichkeitskurve**: Manche haben eine **Rot-/Grün-Schwäche**, d.h. es fehlt ihnen ein Rezeptor. **Tiere** sehen ganz anders als wir. **Hunde** haben bspw. nur **zwei Rezeptoren**: nämlich welche für **grün** und **gelb**. Im Bild rechts siehst du, wie ein Hund die Welt wahrnimmt.



Empfindlichkeitskurve bei Tag (rot) und Nacht (blau)



Visuelle Wahrnehmung eines Hundes
[Was sieht eigentlich der Regenwurm? von
Guillaume Duprat]

Einheiten und Definitionen

Du interessierst dich für die verschiedenen Einheiten, wie wir **Beleuchtungsstärken** messen können? Hier ist ein **Überblick!**

CANDELA

1 cd ist die SI-Einheit für **Lichtstärke**. 1 cd entspricht der Lichtstärke einer **Haushaltskerze**.

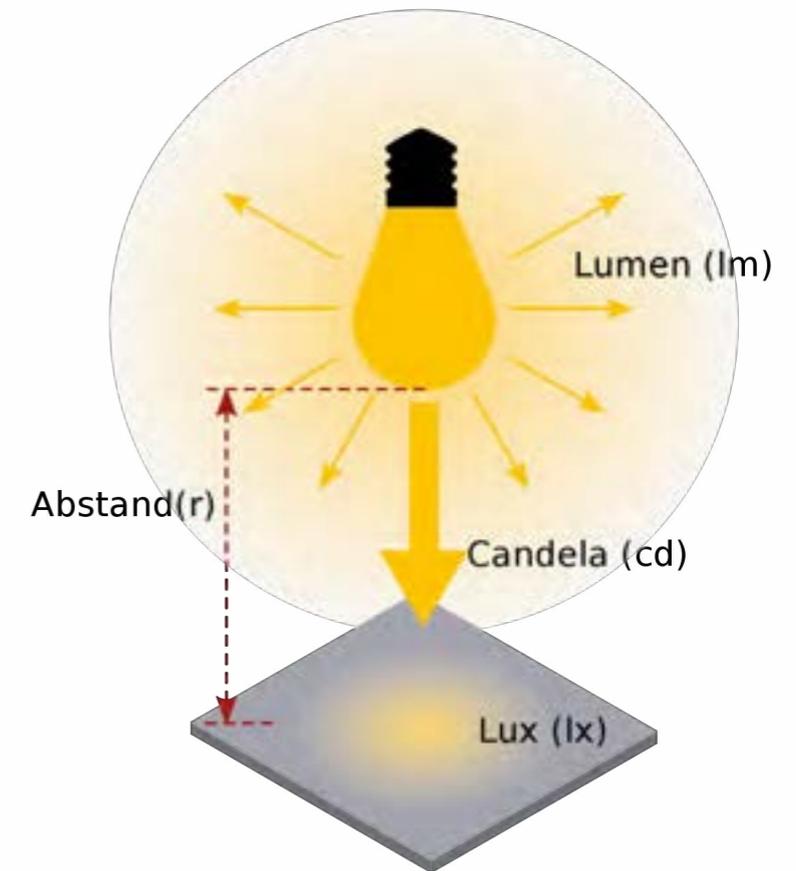
LUMEN

Lumen ist die SI-Einheit des Lichtstroms. Es sagt, wie viel Licht eine Lichtquelle pro Zeitspanne insgesamt abgibt. Das Formelzeichen sr bezeichnet den **Steradian**, was dem **Raumwinkel** entspricht.

$$1lm = 1cd \cdot sr$$

LUX

Lux ist die Einheit der **Beleuchtungsstärke**, die angibt, wie viel Licht pro Zeitspanne und pro Fläche auf dieser auftritt („Helligkeit“ am beleuchteten Ort).



Übersicht über photometrische Einheiten

[Wikipedia]

$$1lx = 1 \frac{lm}{m^2}$$

Experiment

Für unsere Experimente brauchen wir folgende *Geräte*:

Blackbox

Hier stellen wir unser Obst und Gemüse rein und beleuchten es, um Hintergrundstrahlung wie vom Deckenlicht zu reduzieren.

Handspektrometer

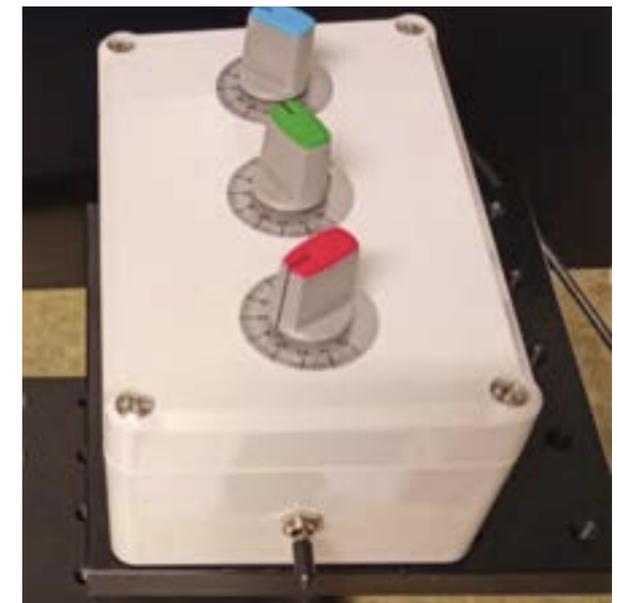
Damit kannst du das **Spektrum** einer Lichtquelle bestimmen. Schaue durch die **Öffnung** des **Spektrometers**, halte es auf eine helle **Lichtquelle** und kneife dabei ein Auge zu. Das Spektrum, das du siehst, ist **nicht intensitätsaufgelöst**, aber du kannst bei einem **Absorptions-/Emissionsspektrum** dunkle **Linien** erkennen oder ein kontinuierliches Spektrum.

LED Lichtmischer

Mit dem **LED-Lichtmischer** kannst du die **Grundfarben Rot, Grün** und **Blau** auf den Stufen **0-10** mischen. Kippe den Schalter an der Seite nach oben, um den **Lichtmischer** anzuschalten.



Handspektrometer



LED-Lichtmischer

Experiment

LED mit Fernbedienung

Du kannst mit der **Fernbedienung** verschiedene **Farben** einstellen, die aus den Grundfarben **Grün, Blau** und **Rot** anteilig gemischt werden.

Nun brauchen wir **Instrumente**, um den **Lichteinfall** zu messen.

Luxmeter

Mit dem **Luxmeter** kannst du die **Beleuchtungsstärke** (Einheit: [lux]) einer **Fläche** messen d.h. wie viel **Licht** pro **Zeiteinheit** und **Fläche** auf ihr auftrifft. Dabei berücksichtigt es schon die **Empfindlichkeitskurve** (**V-Lambda-Kurve**) unserer Augen. Du kannst das **Luxmeter** also als *künstliches Auge* betrachten.

Powermeter, hier: Photometer

Mit diesem **Powermeter** kann man die **Leistung** (Einheit: [Watt]) von Lichtquellen messen. Je nach **Farbe** hat es unterschiedliche **Empfindlichkeiten**, deshalb musst du nach dem Einschalten auf *Lambda* drücken und die Farbe (**Wellenlänge**) einstellen. Danach drückst du erneut auf *Lambda* und kannst nun die Leistung der Farbe messen, die eingestrahlt wird. Die Einheit, das das Messgerät ausgibt, ist **Mikrowatt**.



LED mit Fernbedienung



Luxmeter



Photometer

Vorversuch

Dunkle jetzt den Raum ab!

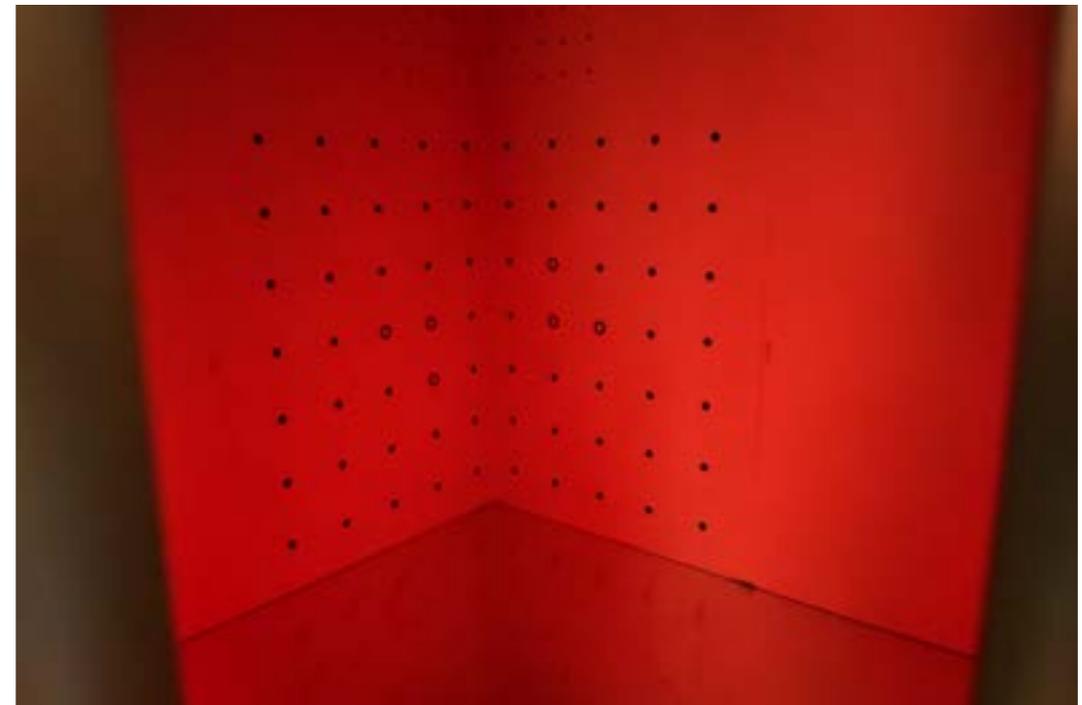
Stelle die runde LED in den Ausgang und schalte sie mit der Fernbedienung ein. **Beleuchte** mit dem **LED-Projektor** das **Innere der Black Box** und halte ein **Handspektrometer** vor die **Öffnung**. Schaue dir das **Spektrum** genau an, das du durch das **Handspektrometer** wahrnimmst!

Stelle nun eine **andere Farbe** ein. Erkennst du einen **Unterschied**?

Wenn dich die Analyse von **Spektren** noch mehr interessiert, kannst du im Anschluss das Experiment *Spektroskopie* durchführen.



Die Box in grünem Licht



Die Box in rotem Licht

Versuch I - LED-Lichtmischer und Obst (Anfänger)

- 1) Stelle nun **einfarbiges Obst** deiner Wahl in die **Blackbox** und beleuchte es mit einer **beliebigen Farbe**. Versuche es jetzt mit folgenden Farben: **Weiß**, den **drei Grundfarben** des menschlichen Sehens und der Farbe, der du das **Obst** bei weißem Licht zuordnest. Welche **Beleuchtung** würdest du dem **Supermarkt** empfehlen?
- 2) **Wiederhole** das **Experiment** mit **mehrfarbigem Obst**. Hier kannst du das **Licht** nicht einfach in der Farbe beleuchten, der du das Obst zuordnest. Probiere es daher mit der **Mischfarbe** deines **Obstes!** (z.B. Rote **Beete** ist lila und grün: **Lila** und **Grün** wird **Türkis**, also benutze **türkises Licht**)
- 3) Messe jetzt die **Reflektivität** deines Obstes mit einem **intensitätsauflösenden** Spektrometer. Rechts neben dir steht die Station *Spektrometer*: Öffne die App *Ocean View* auf dem Laptop und halte dazu den **Sensor** des **Spektrometers** **nah** an das beleuchtete Obst in der Blackbox und schaue dir das Spektrum auf dem **Bildschirm** an.



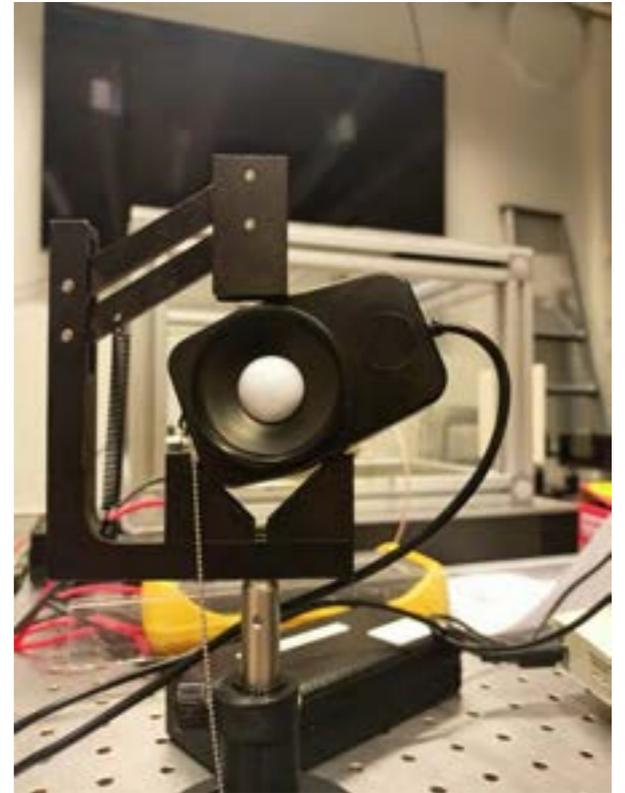
Eine Banane im gelben Licht.



Eine Banane im roten Licht.

Versuch II.1 - LED-Lichtmischer und Komplementärfarben (für Fortgeschrittene)

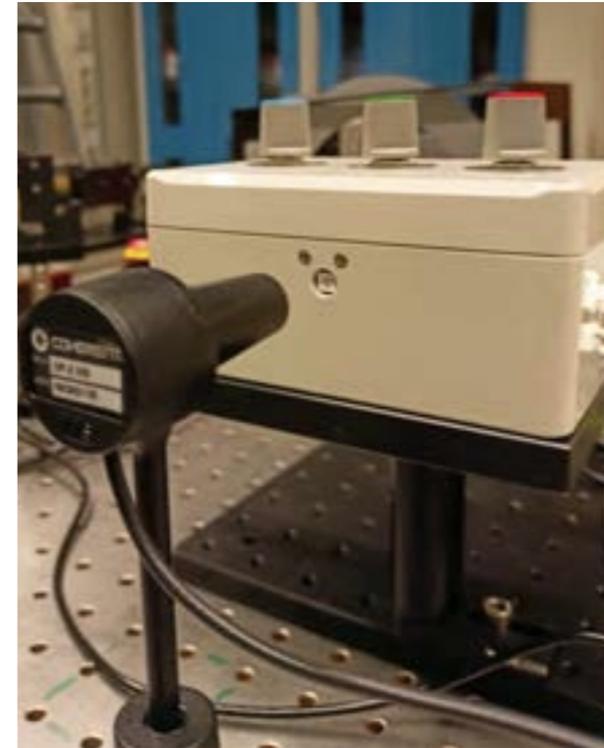
1. Klemme nun das **Luxmeter** in die Halterung ein, entferne die Schutzkappe und stelle das Luxmeter in einem **Abstand** von **1cm** vor den Lichtmischer (mit Lineal messen!).
2. Messe nun die **Beleuchtungsstärke** in lux für **Rot** mit dem **Luxmeter**. Drücke dazu **2 Sekunden** lang die *POWER*-Taste und dann die *REC*-Taste (jeweils bis es piept) und stelle mit den **Pfeiltasten** die Einstellung auf **L2** um. Drücke *ENTER*. Drehe jetzt den Regler für **Rot** auf die **Stufe 10** ein und notiere den Wert.
3. Mache nun dasselbe für **Grün** und **Blau**. Stelle dazu für **Grün** die Stufe **L4** und für **Blau** die Stufe **L5** ein und notiere dir jeweils die **Beleuchtungsstärke** für die **Stufe 10**.
4. Identifiziere die Farbe der **geringsten Beleuchtungsstärke** (z.B. **Blau** mit **40 lux** bei **Stufe 10**) und stelle die **1. jeweils anderen Farben** auf **denselben** Wert ein. **Ändere** dazu wieder die **Einstellungen** durch die *REC* Taste und notiere dir die Stufe, bei der die Farben die **gleiche Beleuchtungsstärke** haben.
5. Drehe nun alle Farben gleichzeitig auf die Stufe auf, bei der du die gleiche **Beleuchtungsstärke** identifiziert hast. Wie sieht die **Farbe** aus, wenn du ein **weißes Blatt Papier** vor die LED zwischen **Luxmeter** und **LED** hält?
6. Schalte nun das Luxmeter aus (2s *POWER* gedrückt halten bis es piepst) und setze die Schutzkappe wieder auf.



Versuch II.2 - LED-Lichtmischer und Komplementärfarben (1)

Jetzt machen wir das **Gleiche** für das **Powermeter** (**Photometer**).

1. Stelle das **Powermeter** vor den Lichtmischer in einem Abstand von 1cm. Schalte es ein.
2. Klicke nun auf das *Lambda*-Symbol am **Powermeter** und messe erst die **Leistung** für die Farbe **Rot**. Dafür betätigst du solange die **Pfeile** am **Powermeter**, bis **0,630** Mikrometer angezeigt wird. Jetzt klickst du **nochmal** auf das *Lambda*-Symbol.
3. Drehe nun **Rot** auf Stufe **10** auf und **notiere** die **Leistung**.
4. **Wiederhole** diesen Prozess für **Grün** (stelle dazu die Wellenlänge auf **0,530** Mikrometer ein) und **Blau** (Wellenlänge **0,470** Mikrometer) und **notiere** dir die **Werte** für die Stufe **10**.



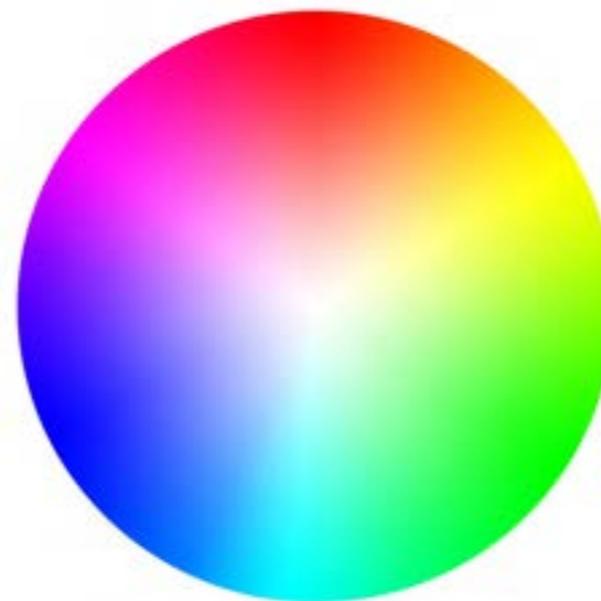
Experimenteller Aufbau (mit Powermeter)



Knopf zur Wahl der Wellenlänge

Versuch II.2 - LED-Lichtmischer und Komplementärfarben (2)

5. Identifiziere den **kleinsten Wert** und wiederhole den Prozess wie beim Luxmeter. Finde also heraus, was die entsprechenden Stufen für die Leistung bei den anderen zwei Farben sind und stelle im Anschluss eine **Überlagerung** all dieser Stufen ein. Vergiss nicht, die Wellenlänge immer umzustellen!
6. Welche Farbe ergibt sich bei der **Überlagerung**? Es soll Weiß sein. Warum? Um das zu verstehen, schaue dir den Farbkreis an. Wenn du zwei gegenüberliegende Farben überlagerst, kommt immer weiß raus. Wenn du also die drei Grundfarben überlagerst, resultiert das auch in weiß .
7. **Schalte** im Anschluss das Powermeter **aus**.



[webmaster-crashkurs.de]

Versuch II.2 - Vergleich



Weiß per Powermeter

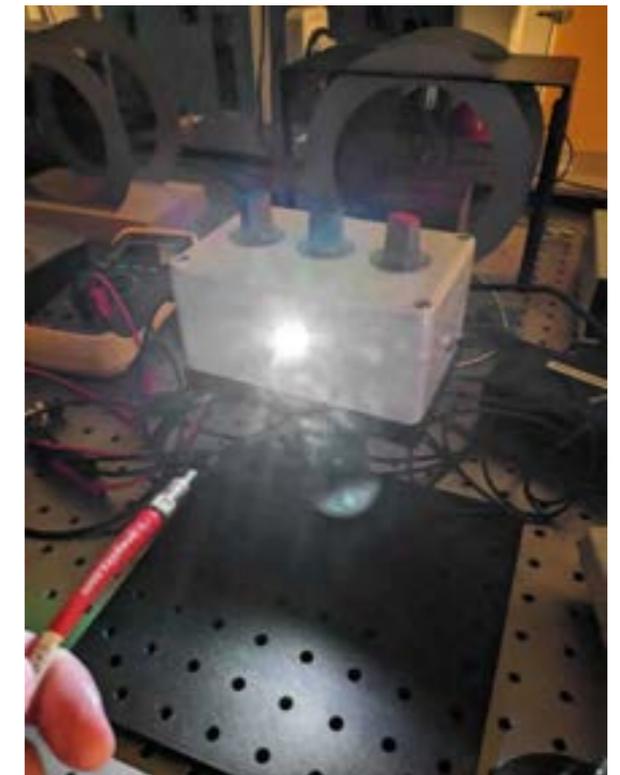


Weiß per Luxmeter

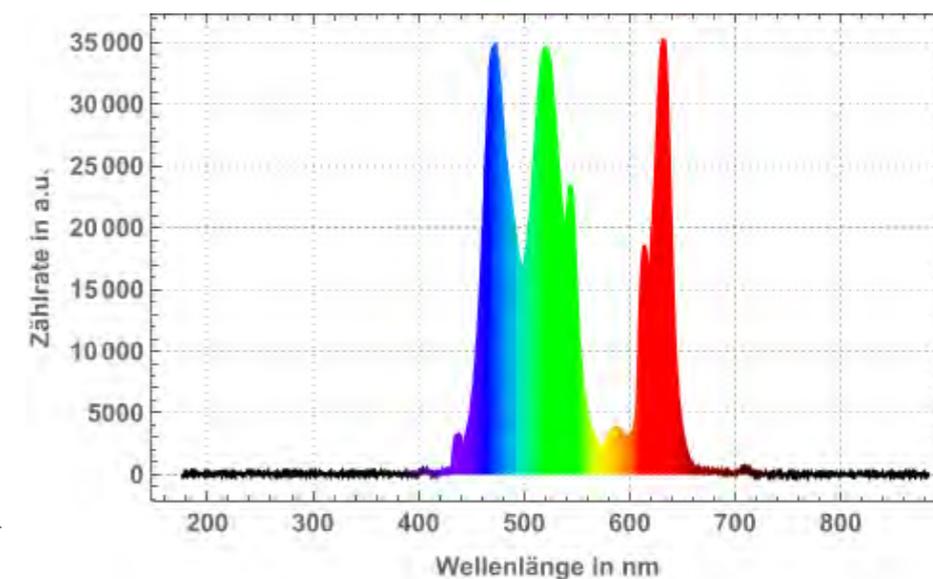
- Beide Farben sind weiß, aber dennoch unterschiedlich, wie man schnell erkennt, denn:
- das **Luxmeter** misst die **Leuchtstärke** in **Lux**, welche angibt, wie viel **Licht** auf eine **Fläche** fällt.
- das **Powermeter** misst die **Leistung** des Lichts in (Mikro)**Watt**, welche angibt, wie viel **Energie pro Zeiteinheit** abgestrahlt wird.
- das **Luxmeter-Weiß** erscheint etwas anders, weil die gemessene **Leuchtstärke** z.B. mehr **grüne** Anteile enthält als das **Powermeter-Weiß**.
- das liegt daran, dass das **Powermeter** aufgrund seiner **Messmethode alle Farben** des sichtbaren **Spektrums gleichmäßig** misst, während das **Luxmeter empfindlicher für grünes Licht** ist.
- Jetzt sieht das Licht mit dem Powermeter aber weißer aus?! Der Grund dafür ist ein evolutionärer und dadurch erklärbar, dass wir das Inverse der V-Lambda-Kurve betrachten. Daher siehst du bei der Luxmeter-Einstellung auch Lila.

Versuch II.2 - Alternative: Spektrometer

1. Mische die Einzelfarben so, dass du ein möglichst gutes Weiß siehst.
2. Alternativ kann Weiß auch mit dem **Spektrometer** im Versuch nebenan gemischt werden.
3. **Öffne** hierzu die **Software OceanView** auf dem Laptop und wähle *QuickView* aus. Schalte wieder den **Lichtmischer** an.
4. **Richte** das Glasfaserkabel des (intensitätsaufgelösten) **Spektrometers** nun auf das **Licht** des **Lichtmischers**, wie in der **Abbildung** rechts oben.
5. Du solltest jetzt das **Spektrum** analog zu der Abbildung rechts unten auf dem Bildschirm erkennen können. **Verändere** die **Intensitäten** der Einzelfarben, um dich mit dem **Programm** und den **Änderungen** im resultierenden **Spektrum** vertraut zu machen.
6. Versuche als nächstes, **Weiß** zu mischen, indem du die Intensitäten per Augenmaß gleich einstellst. Tipp: Augen zusammenkneifen und direkt in die LED gucken (das darfst du nur hier, weil die LED schwach genug ist, um dir nicht zu schaden). Versuche dann die **Intensitäten** durch das **Spektrometer** **gleich** zu verteilen.
7. **Variiere** die **Intensitäten**, bis das **Weiß** für dich **optimal** erscheint und vergleiche es gerne noch einmal mit den **Weißtönen** aus den **vorherigen Versuchen**.



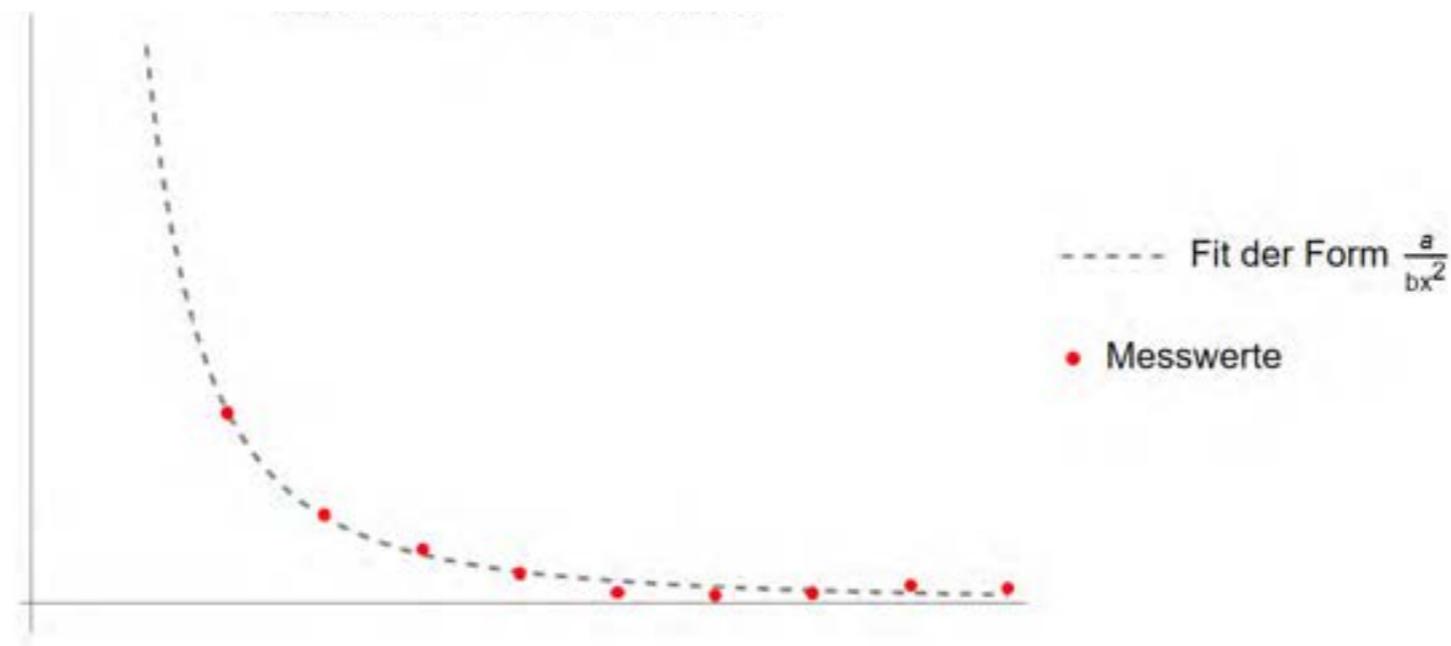
Weiß per Spektrometer



Aus der QuickView von Oceanview

Versuch III - Bestimmung der Empfindlichkeitskurve (Expertenversuch)

1. Dies ist ein **Expertenversuch(!)**, er wird also **vermutlich** viel **Zeit** kosten und ist für das **Verständnis** des Experiments **nicht a**.
2. Zuerst wollen wir überprüfen bzw. **zeigen**, dass die **Intensität** von **Licht** mit dem Abstand **quadratisch** abnimmt.
3. **Messe** hierfür z.B. mit dem **Luxmeter**. **Messe** also die **Leuchtstärke** in möglichst vielen verschiedenen **Abständen**. Erstelle hierfür eine Wertetabelle. Wenn du diese aufträgst, sollte ein **inverser quadratischer Zusammenhang** hergestellt werden können, erkennst du die **Form** der **Kurve**? Unten siehst du ein **Beispiel**:

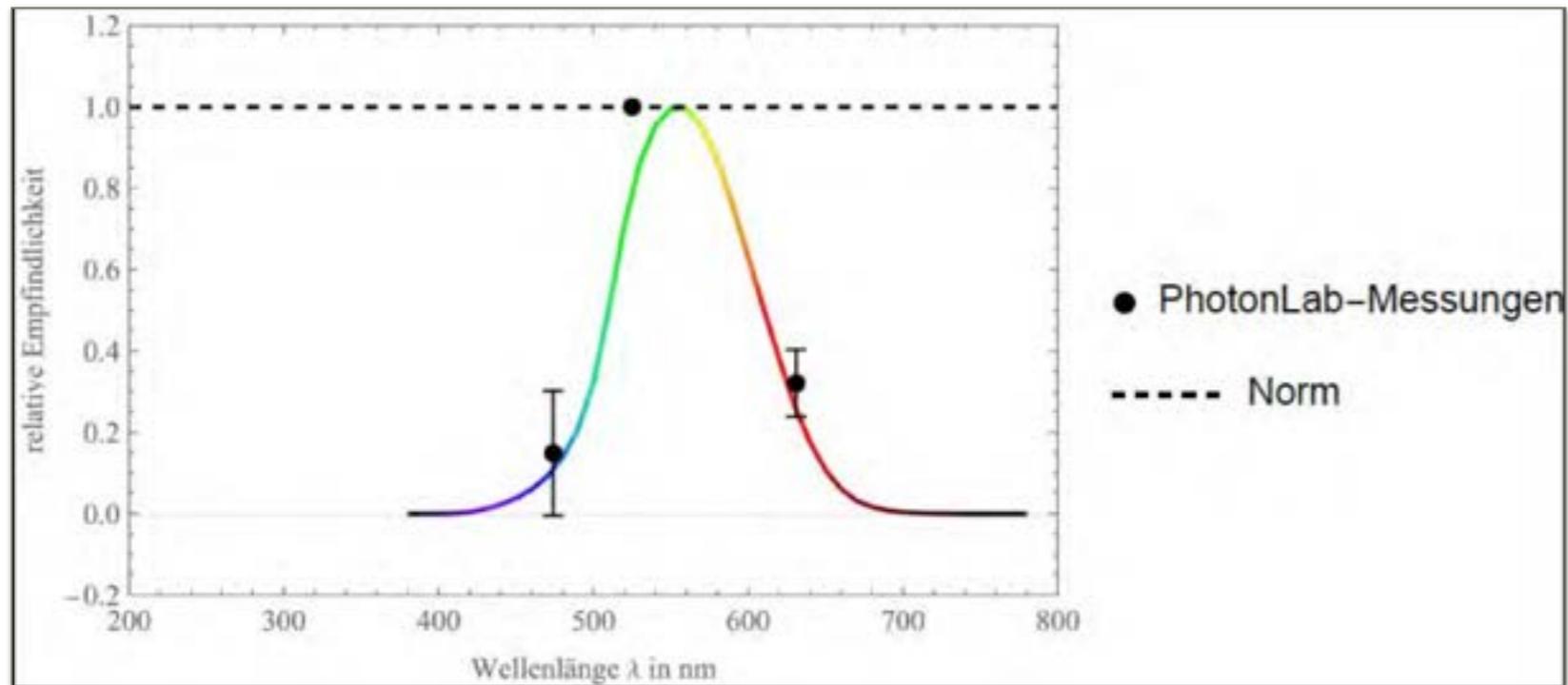


Versuch III - Bestimmung der Empfindlichkeitskurve (Expertenversuch)

1. Nun wollen die V-Lambda-Kurve quantitativ bestimmen, d.h. durch Messwerte bestätigen
2. Messe hierfür (einzeln!) die Leuchtstärke B in lux der drei Farben (Rot, Grün und Blau) mit dem Luxmeter in etwa 1cm Entfernung. Wenn du Teilversuch 2 schon gemacht hast, kannst du die Werte für diesen und den nächsten Schritt übernehmen. Drehe dabei die Intensität auf Stufe 10 und denke wie im vorherigen Versuch daran, die Korrekturfaktoren einzustellen (Rot: L2, Grün L4 und Blau L5).
3. Messe nun auch die Leistung des Lichts P in Mikrowatt (im selben Abstand, auch auf der Einstellung 10).
4. Wichtig ist die Einheiten zu beachten. Die Empfindlichkeitskurve ist definiert durch lumen/Watt, multipliziere also die gem. Leuchtstärken B (in lux) mit einem Faktor 10^{-4} und die Leistungen P (Mikrowatt) mit 10^{-6} . So erhältst du lumen bzw. Watt.
5. Um nun die V-Kurve zu erhalten, teilen wir die gemessenen Einzelwerte, also B durch P und normieren mit dem erhaltenen Wert für grün (das ist ganz schön kompliziert, die Gleichung unten erklärt das Vorgehen hoffentlich).

$$V(\lambda) := N \cdot \gamma(\lambda) \stackrel{\lambda=631nm}{\approx} \underbrace{\frac{P_{525nm} \cdot 10^{-6}}{B_{525nm} \cdot 10^{-4}}}_{\text{SI-Einheiten (Normierung)}} \cdot \frac{W}{lm} \cdot \underbrace{\frac{B_{631nm} \cdot 10^{-4}}{P_{631nm} \cdot 10^{-6}}}_{\text{Messwerte in SI-Einheiten}} \cdot \frac{lm}{W} \approx 29\%$$

Versuch III - Bestimmung der Empfindlichkeitskurve (Lösung)



Hier siehst du **unsere Messungen**:

Der **Messpunkt bei Grün** entspricht unserer **Normierung**, hieran orientieren wir uns.

Die **Messungen bei Blau** (links) und **Rot** (rechts) sollten in der **Nähe der Kurve** sein.

Wie in jedem **Experiment** stimmen die Werte **nicht** perfekt mit der Theorie/Literatur **überein**, was auch die **Fehlerbalken** oben zeigen

VERSUCH 9: FATA MORGANA

Fata Morgana



Wie können Schiffe fliegen und schwarze Straßen spiegeln?

Die Erklärung kennt man aus der Wüste unter dem Namen **Fata Morgana**. Weil heiße Luft einen anderen Brechungsindex als kalte Luft hat, können Lichtstrahlen am Übergang von Luftschichten abgelenkt werden. Deshalb treffen unser Auge Lichtstrahlen von Objekten aus einer anderen Richtung als die, in der die Dinge tatsächlich sind. So scheint es entweder als ob ein Schiff fliegt, oder als ob eine schwarze Straße spiegelt.

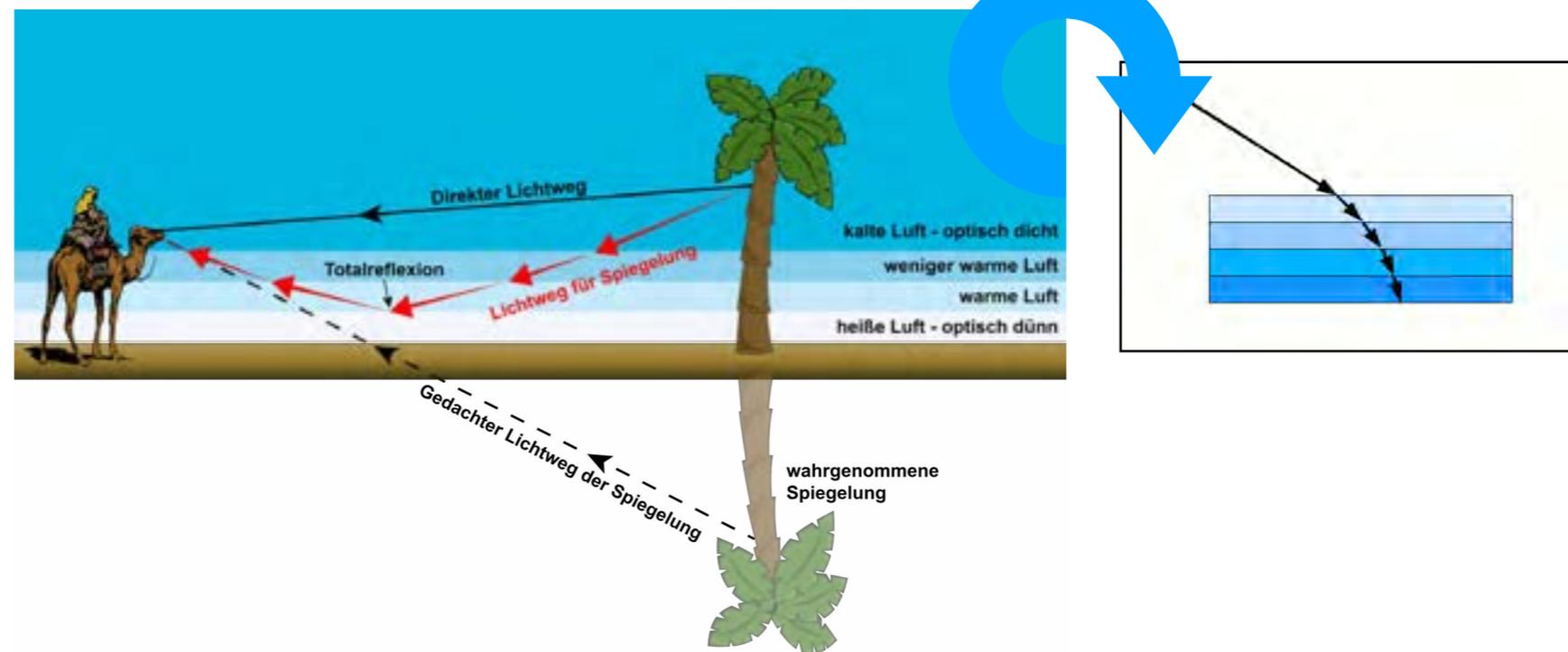


http://de.wikipedia.org/wiki/Fata_Morgana#mediaviewer/Datei:Spiegel100531.jpg

<https://www.watson.ch/wissen/international/436174308-fata-morgana-fliegendes-schiff-vor-englands-kueste-gesichtet>

Grundlagen

Weil heiße Luft einen anderen Brechungsindex als kalte Luft besitzt, wird Licht auch am Übergang von Luftschichten gebrochen oder sogar reflektiert. So treffen die Lichtstrahlen aus einer anderen Richtung unser Auge und man denkt, dass der betreffende Gegenstand an einem anderen Ort wäre, oder man sieht sein Spiegelbild. So wird auch im Bild der Lichtweg durch verschiedene Luftdichten gebrochen und wir sehen eine Fata Morgana.



Auch Zuckerlösungen unterschiedlicher Konzentrationen haben verschiedene Brechungsindices. Bei diesem Versuch wirst du eine Zuckerlösung verwenden, die oben eine geringere Konzentration als unten hat. Während das Licht den Übergang zwischen den verschiedenen Konzentrationsschichten durchläuft, wird es immer wieder abgelenkt. Es sieht aus, als ob das Licht "um die Kurve" fliegt.

Durchführung

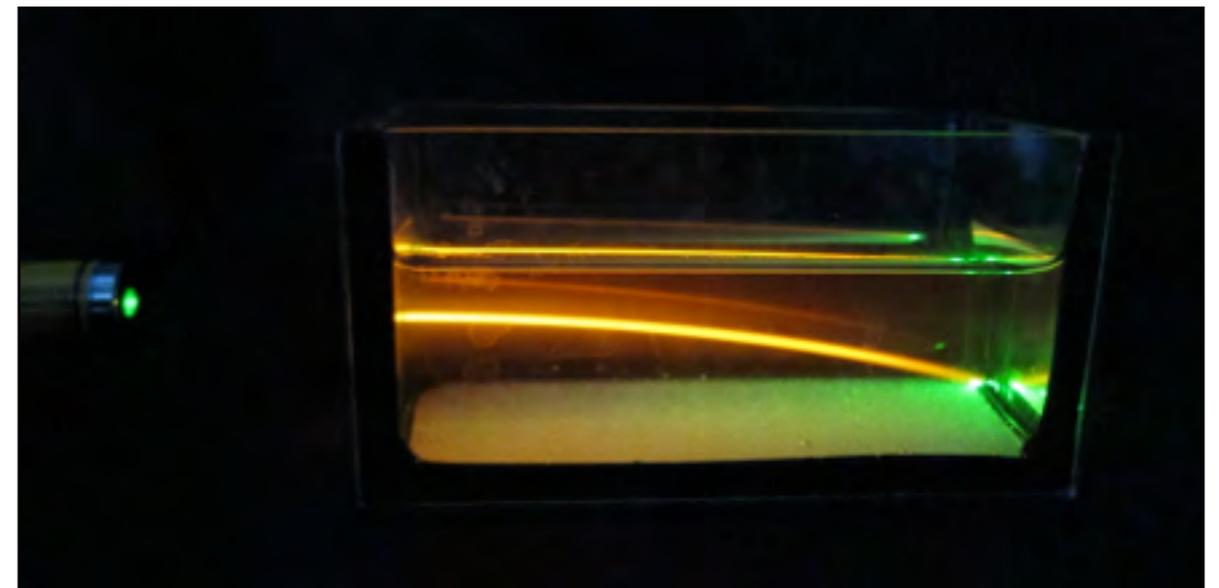
In der Küvette befindet sich Wasser mit Tonic Water. Das Tonic Water wird auf eine Zuckerschicht gegossen; dadurch entsteht ein Zuckergradient in der Lösung: Die Zuckerkonzentration nimmt also von oben nach unten zu.

Leuchte nun mit dem Laser in die Küvette.

Was beobachtest du?

Halte den Laserpointer so, dass der Strahl in flachem Winkel auf die Grenze zwischen Wasser und Luft auftrifft.

Was beobachtest du?



Lösung:

Wenn der Winkel groß ("flach") genug ist, kann Totalreflexion passieren. Das Licht wird dann an der Grenzschicht Luft/Wasser gebrochen und das Licht wird wieder zurückreflektiert.

VERSUCH 10: ZUCKERKONZENTRATION IN COLA

Zuckerkonzentration in Cola



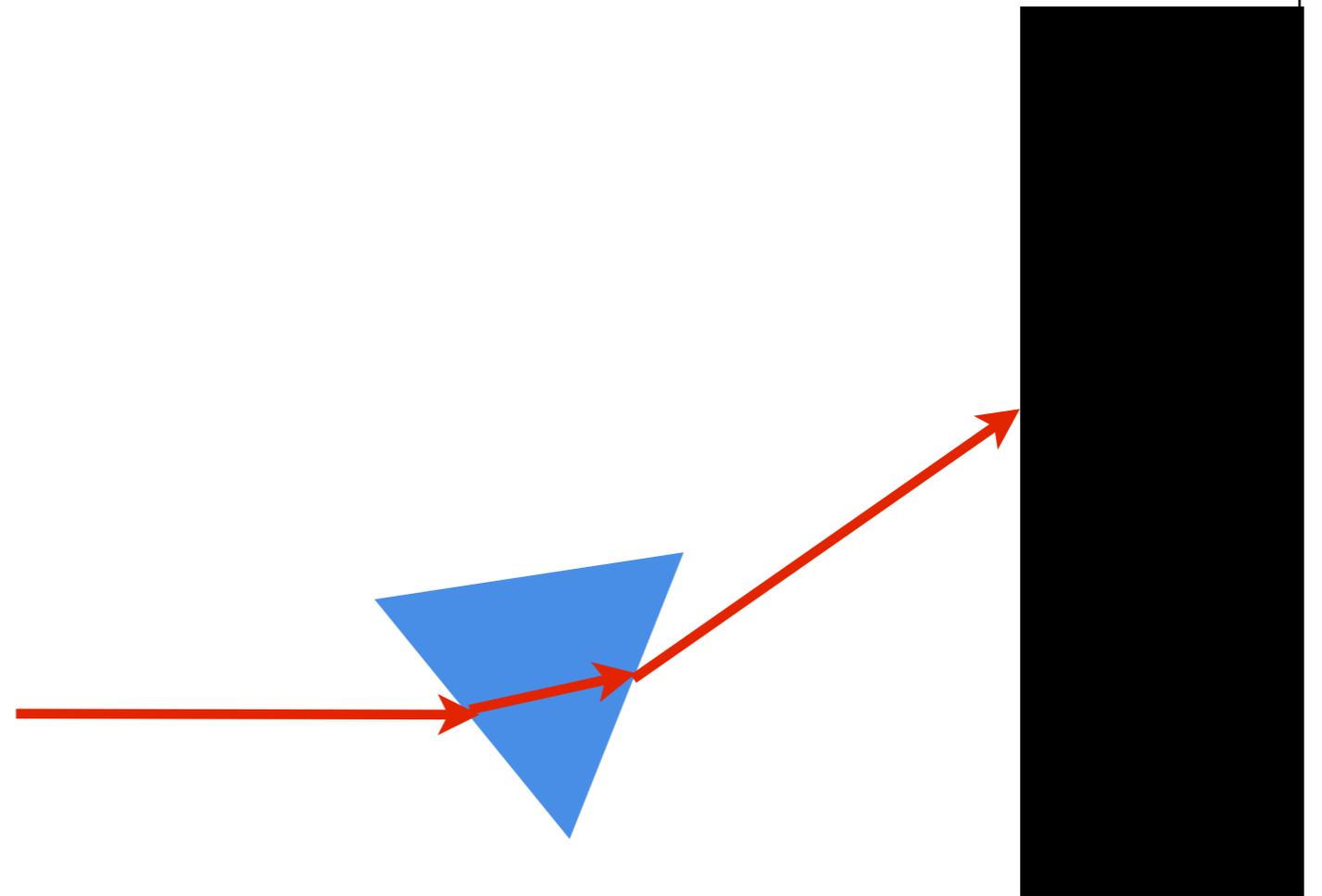
Wie viel Zucker ist in Cola und wie kann ich das mit Lasern rausfinden?

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenze zwischen Luft und einer Flüssigkeit, wird er gebrochen (d.h. abgelenkt). Zuckerlösungen verschiedener Konzentrationen brechen Licht verschieden stark. So kann man die Konzentration von Zucker in Flüssigkeiten bestimmen.



Grundlagen

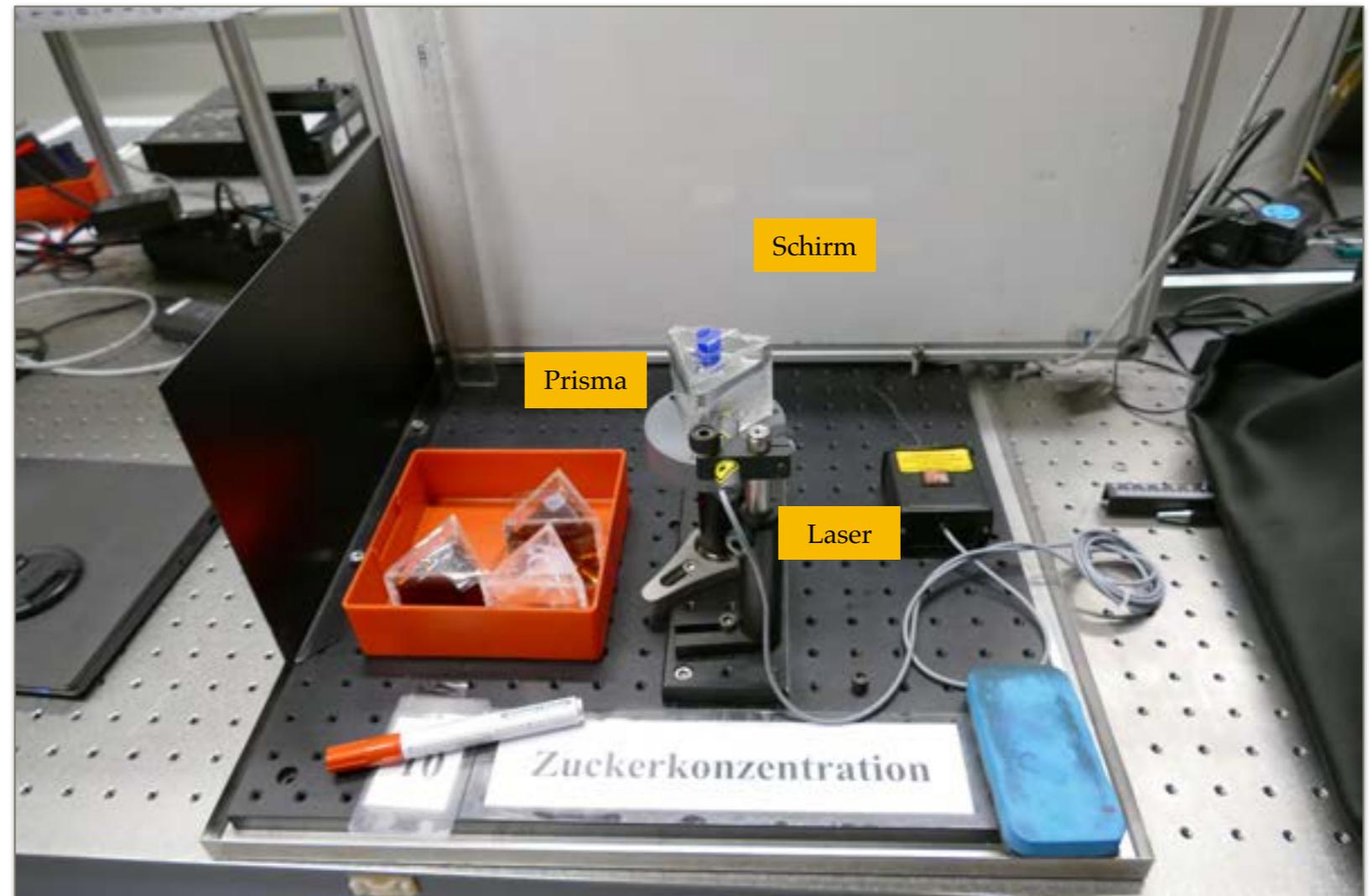
Licht wird am Übergang von Medien mit verschiedener optischer Dichte gebrochen, d.h. es bewegt sich danach in eine andere Richtung. Tritt es danach wieder aus dem Medium aus, wird es erneut gebrochen. Die beiden Ablenkungen addieren sich. Zuckerlösungen verschiedener Konzentrationen brechen Licht verschieden stark, sodass man anhand des Brechungswinkels die Konzentration des Zuckers bestimmen kann.



Aufbau

Platziere zum Aufbau das erste Prisma in die Halterung. Stelle dieses so auf, dass der Laser durch das Prisma hindurch und auf das Whiteboard leuchtet.

Wichtig: Der Laserstrahl muss die Seitenfläche des Prismas treffen und nicht die Kanten!



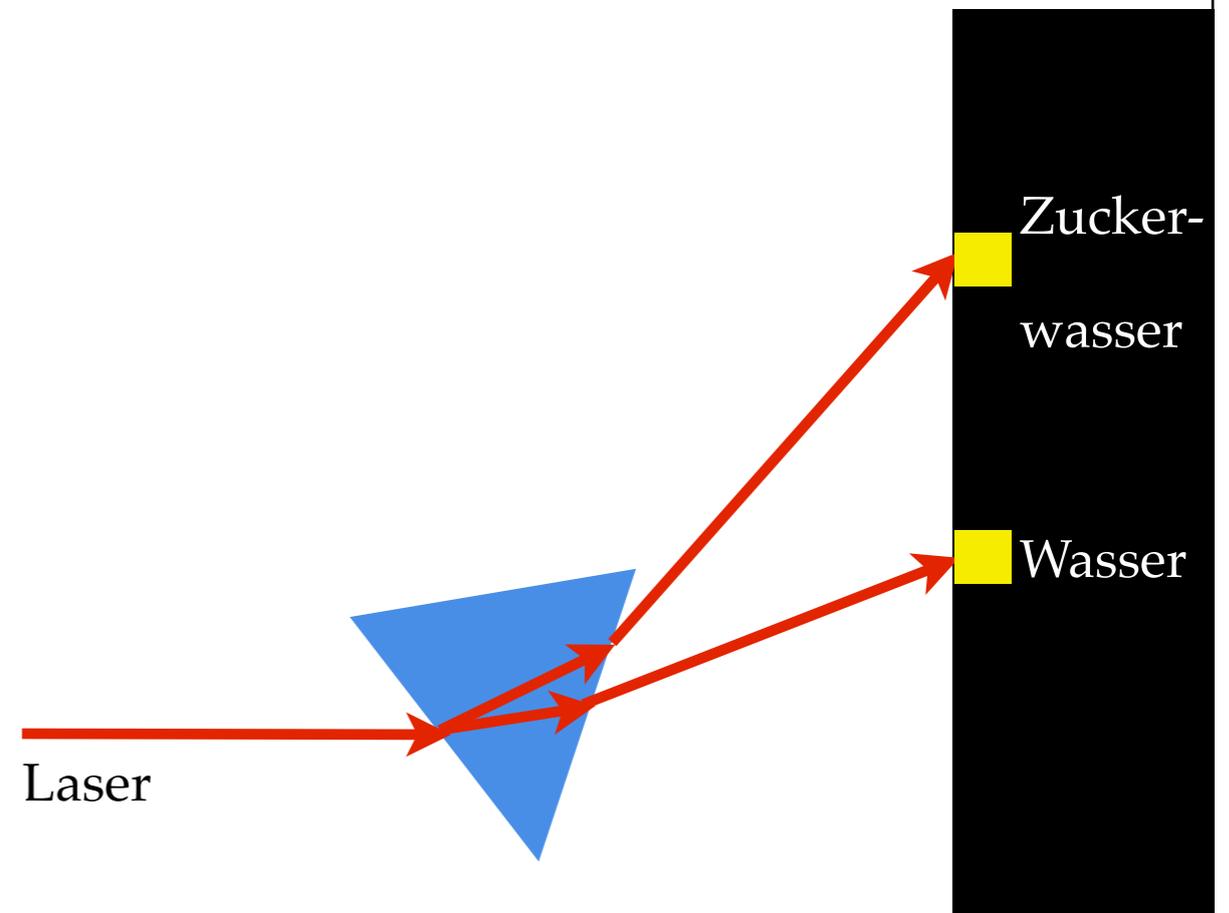
Durchführung

1. Justieren der Anordnung

Laserschutzbrille aufsetzen und Laserpointer einschalten!!!

Justiere das mit Wasser gefüllte Prisma so, dass die Ablenkung des Laserstrahls so gering wie möglich ist. Diesen Punkt findest du, indem du das Prisma so lange mit der Halterung in dieselbe Richtung drehst, bis sich die Bewegungsrichtung des Laserpunktes an der Wand ändert. Wenn du genau diesen Punkt gefunden hast, stellst du die Schrauben fest.

Stelle anschließend die Prismen mit Wasser bzw. mit Zuckerwasser (Zuckerlösung mit 17 Zuckerwürfeln) in die Halterung, durchleuchte diese mit dem Laser und markiere die Laserpunkte auf dem Whiteboard mit den Whiteboard-Markern!

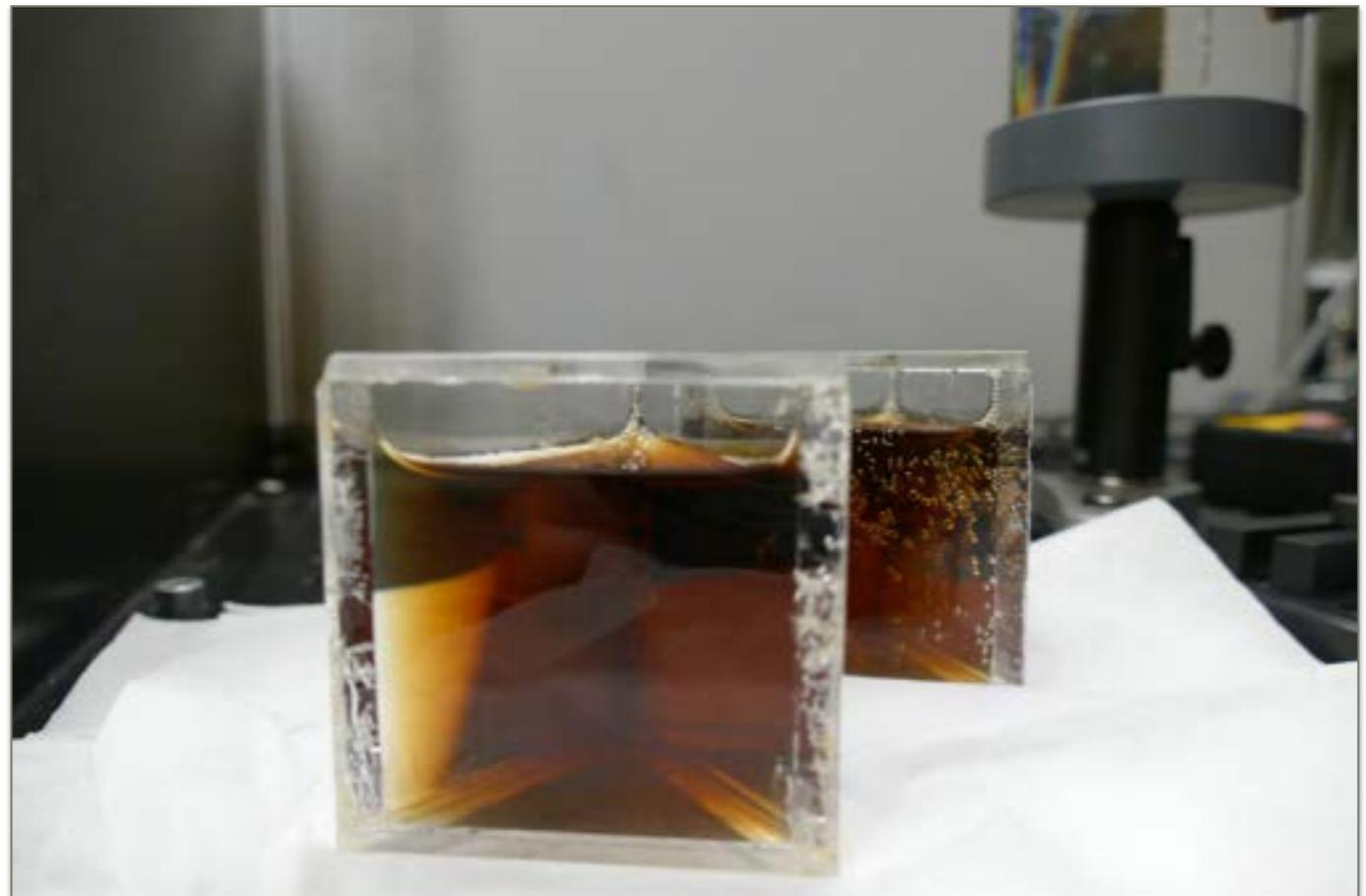


2. Cola oder Cola-Light?

Stelle diesmal die beiden mit Cola gefüllten Prismen in die Halterung, durchleuchte sie wieder und vergleiche die Punkte der beiden Colas mit denen von Wasser und Zuckerwasser.

In welchem Prisma ist die normale Cola?

(Die Cola light wird nicht mehr benötigt.)



3. Bestimmung des Zuckergehaltes in Cola

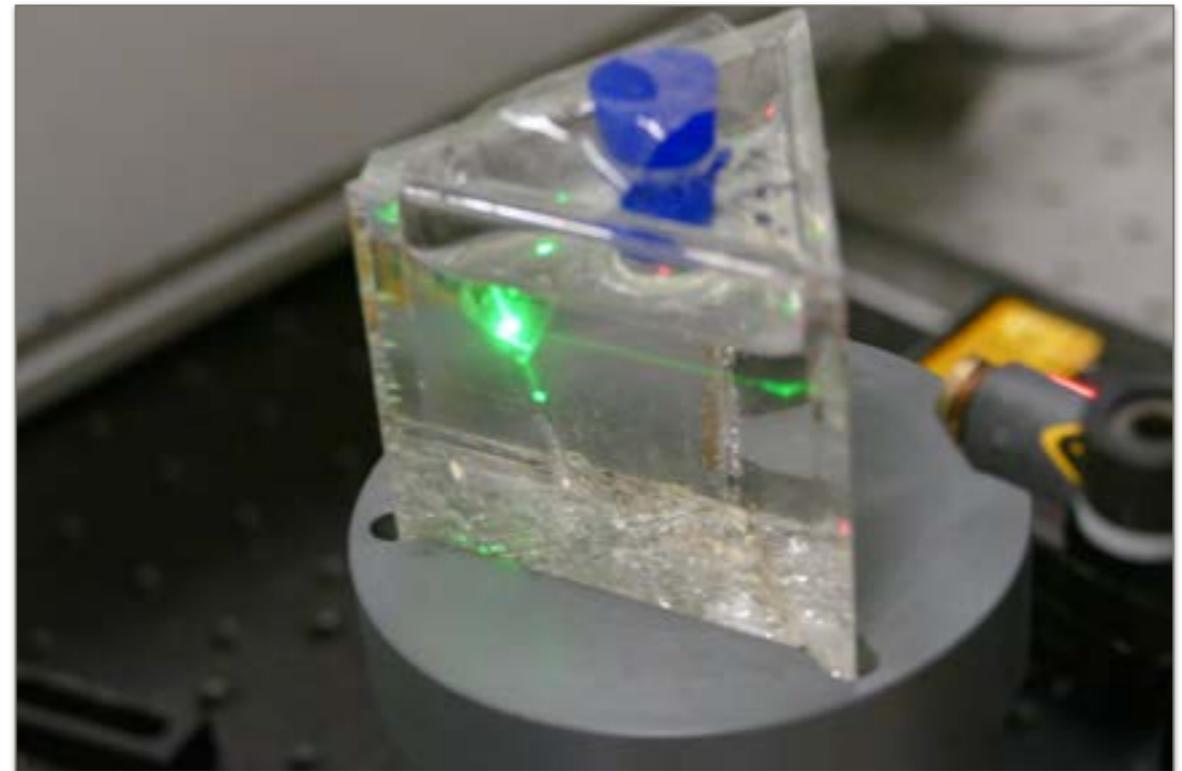
Markiere den Punkt der normalen Cola auf dem Whiteboard. Durch das Messen der Punktabstände auf dem Whiteboard berechnest du nun, wie viele Zuckerwürfel in einem Liter Cola sind.

Messe hierzu den Abstand des Punktes der bekannten Zuckerlösung, des reinen Wassers und den der normalen Cola. Die Ablenkung ist direkt proportional zur Konzentration.

Berechne diese mit dem [Dreisatz](#).

Wie viele Zuckerwürfel sind in einem Liter Cola?

- a) 24 - 33
- b) 34 - 43
- c) 44 - 53
- d) 54 - 63



Antwort b) ist richtig.

VERSUCH 11: Geheimbildschirm

Geheimbildschirm

Geheimschrift auf dem LCD Bildschirm knacken!



LCD Bildschirme gibt es nicht nur in Monitoren, sondern auch in Taschenrechnern, Digitaluhren und Fieberthermometern. Nimmt man aber die oberste Folie eines LCD (Liquid-Crystal-Display) Monitors ab, so erhält man nur ein weißes Bild. Hält man aber einen Polarisationsfilter im richtigen Winkel davor, so bekommt man nun das eigentliche Bild.

Funktion LCD



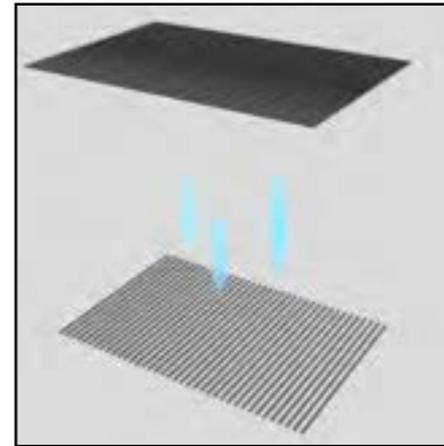
Für eine gute Hintergrundbeleuchtung gibt es im unteren Teil des Displays eine Reihe von Lampen, beispielsweise LEDs.



Nun wird das Licht durch mehrere über einander gelagerte Glasschichten gleichmäßig über die gesamte Fläche des Bildschirms verteilt.

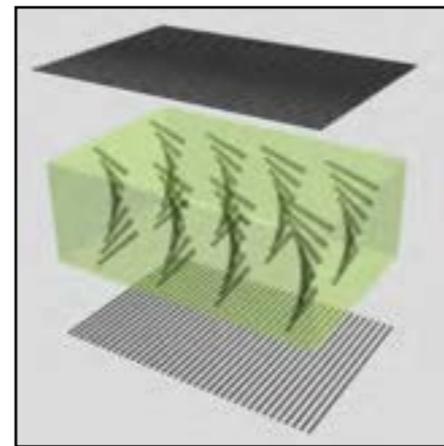


Das Geheimnis des LCD Displays liegt jedoch in der Glasplatte darüber.

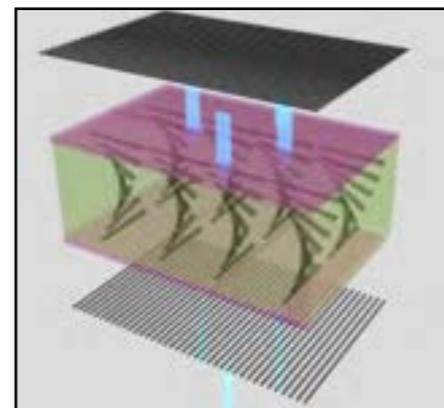


In dieser befinden sich zwei genau senkrecht versetzte Polarisationsfilter. Fällt das Licht durch den ersten Filter, kommt nur eine Polarisationsrichtung hindurch. Der andere jedoch absorbiert genau diese

Polarisationsrichtung, was dazu führt, dass am Ende gar kein Licht durchkommt.

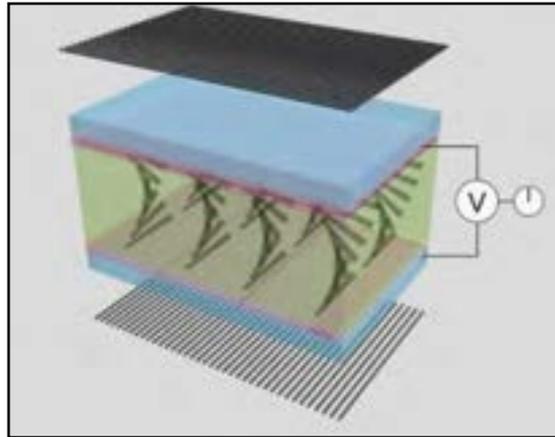


Nun fügt man jedoch den Flüssigkristall zwischen den beiden Polarisationsfilter ein. Durch seine optische Aktivität dreht der Kristall das polarisierte Licht in etwa um 90° , wodurch das Licht, das es durch den ersten Polarisationsfilter schafft, nun auch den Zweiten passieren kann.

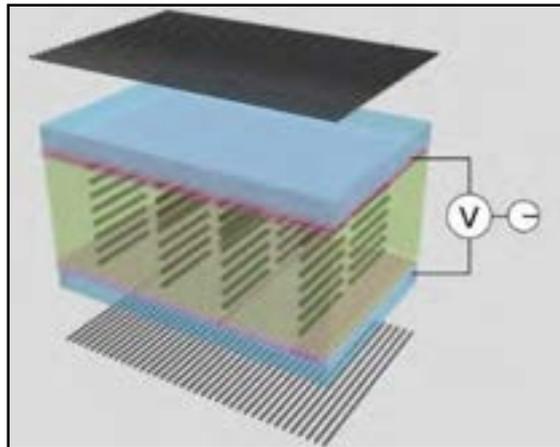


Zwischen den Polarisationsfiltern und dem Flüssigkristall wird eine dünne Schicht Polymid aufgetragen, die dafür sorgt, dass sich die Stabmoleküle des Kristalls perfekt ausrichten.

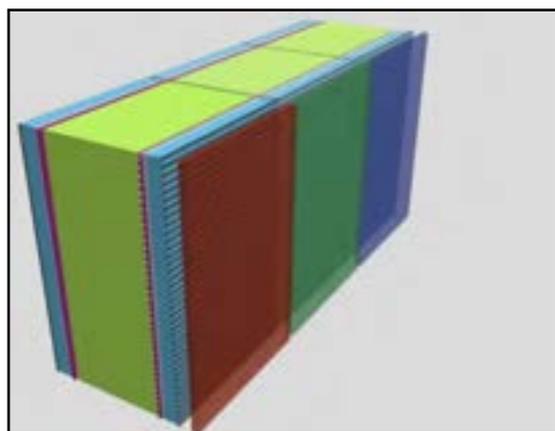
Geheimbildschirm



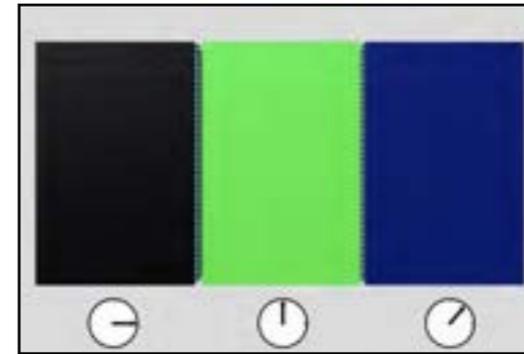
Nun wird die letzte Schicht eingefügt: Eine kleine Glas-scheibe, auf der eine Elek-trode befestigt ist, durch die eine Spannung an den Flüssigkristall angelegt werden kann.



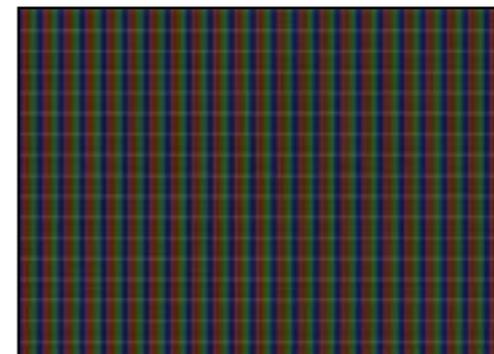
Je höher die angelegte Span-nung ist, desto weniger verdrehen sich die Stabmoleküle, wo-durch die Polarisation des Lich-tes weniger stark gedreht wird und somit nur ein geringerer Anteil den Polarisator (zweiter Filter) passieren kann.



Anschließend wird an jedem dieser Elemente, auch Pixel genannt, ein Farbfilter befes-tigt, welcher grün, blau, oder rot ist.



Je nach angelegter Spannung strömt unterschiedlich viel Licht durch. Dadurch kann man jegliche Farben mischen. Will man z.B. Lila erzeugen so setzt die grünen Pixel unter Spannung während man den roten und blauen keinerlei Span-nung aussetzt.



Von diesen Elementen gibt es an einem Bildschirm mehrere Tausend, die dann zusammen ein Bild ergeben, da die ein-zelnen, winzigen Elemente und ihre Farben im Auge ver-schmelzen.



Voilà! Das ist das Ergebnis!

Durchführung

Auf der einen Hälfte des Bildschirms wurde die Polarisationsfolie bereits entfernt.

1. Den Bildschirm (falls noch nicht getan) an den Computer anschließen.
2. Den Bildschirm anmachen (unten hinter dem Bildschirm).
3. Polarisationsfilter (von denen aus der Einführung) nehmen und durchschauen
4. Polarisationsfolie drehen bis Farben übereinstimmen

Quiz

Wieso verändern sich die Farben, wenn man den Polarisationsfilter dreht?

- a) Deine Augen spielen dir etwas vor, eigentlich verändern sich die Farben nicht.
- b) Durch das Drehen der Folie verändert man den Lichteinfall und somit die Farben.
- c) Keine der Antworten ist richtig.
- d) Durch das Drehen der Folie kann man mehrere Polarisationsrichtungen sehen.

VERSUCH 12: Zauberspiegel Miraskop

Zauberspiegel Miraskop



Wie kann die Spinne in der Luft schweben? Und warum kann ich hindurchgreifen?

Hier ist eine Spinnenphobie kein Problem, weil man die Spinne nicht anfassen kann. Sie schwebt in der Luft!

Entdeckungsgeschichte:

Das Miraskop wurde übrigens ganz zufällig entdeckt. Etwa 1969 hatte ein Arbeiter die Aufgabe, einen Schrank im Physik-Department aufzuräumen. In diesem Schrank waren sorgfältig Parabolspiegel wie Muscheln aufeinander gestapelt. Sie hatten ein Loch in der Mitte, damit man eine Bogenlampe durchstecken konnte. Der Arbeiter entdeckte hier Staub, den man nicht wegwischen konnte. Dies erzählte er einem jungen Physiker, der das Phänomen erklären konnte und mit dem Arbeiter zusammen ein Patent erhielt.

Durchführung



Stell das Miraskop vor dich und blicke auf die große Öffnung. Die Spinne schwebt mitten in der Öffnung! Wenn du versuchst, nach der Spinne zu greifen, fasst du durch sie hindurch.

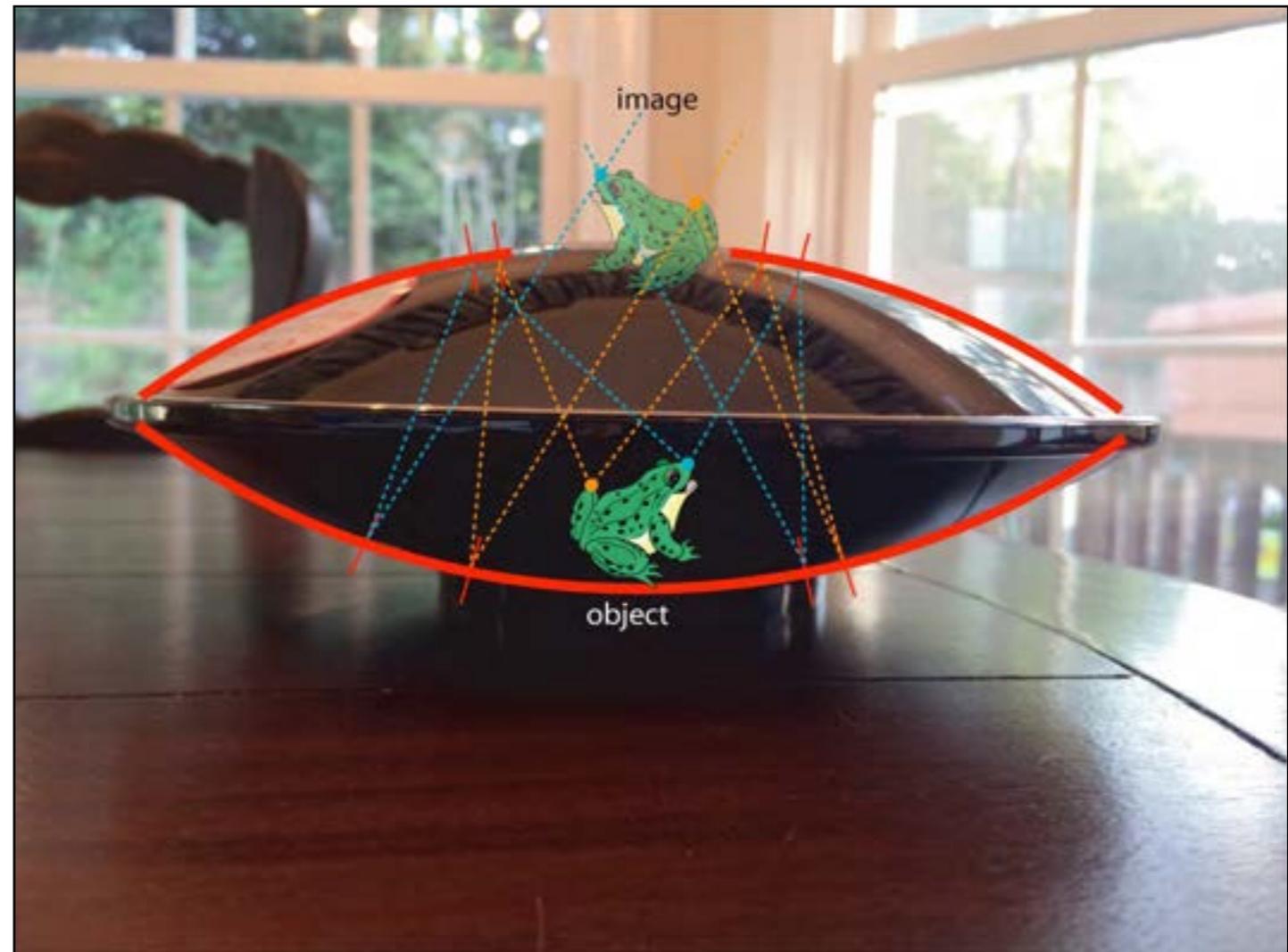
Kannst du das Phänomen irgendwie erklären?

Achtung!!! Bitte nicht reinfassen!!!!

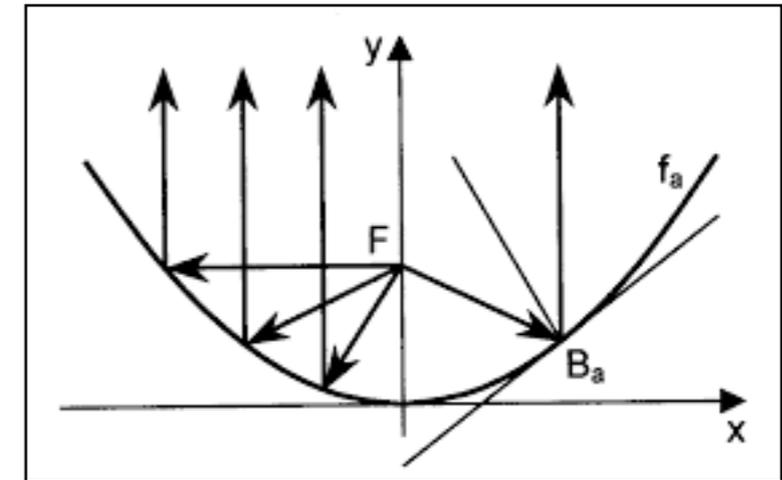
Zauberspiegel Miraskop

Erklärung (ungenau): Die verblüffende optische Täuschung entsteht durch zwei aufeinander gesetzte Hohlspiegel. Das Licht der unten liegenden Spinne wird am oberen Spiegel **reflektiert**, wieder nach unten geworfen und landet anschließend im (physisch nicht vorhandenen) Brennpunkt des oberen Hohlspiegels. So entsteht dort ein Bild der Spinne, das täuschend echt aussieht.

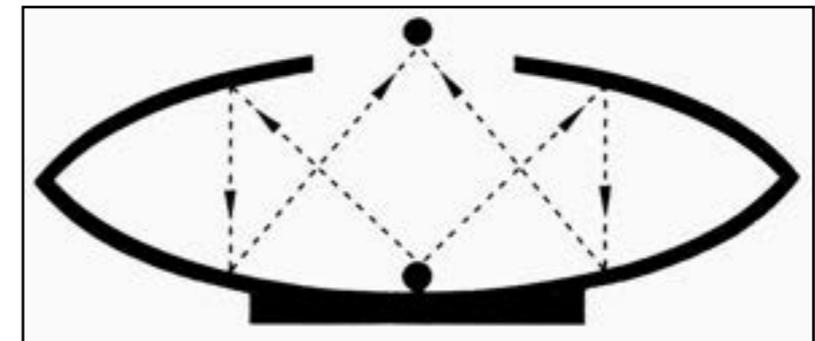
Übrigens: Dieses Phänomen ist **kein** Hologramm!



Erklärung (genau): Das Strahlendiagramm zeigt, dass sich parallel auf einen Parabolspiegel einfallende Lichtstrahlen im Fokus (=Brennpunkt) treffen. Das funktioniert auch umgekehrt, d.h. wenn die Lichtquelle im Brennpunkt angebracht wird, wie z.B. beim Leuchtturm.

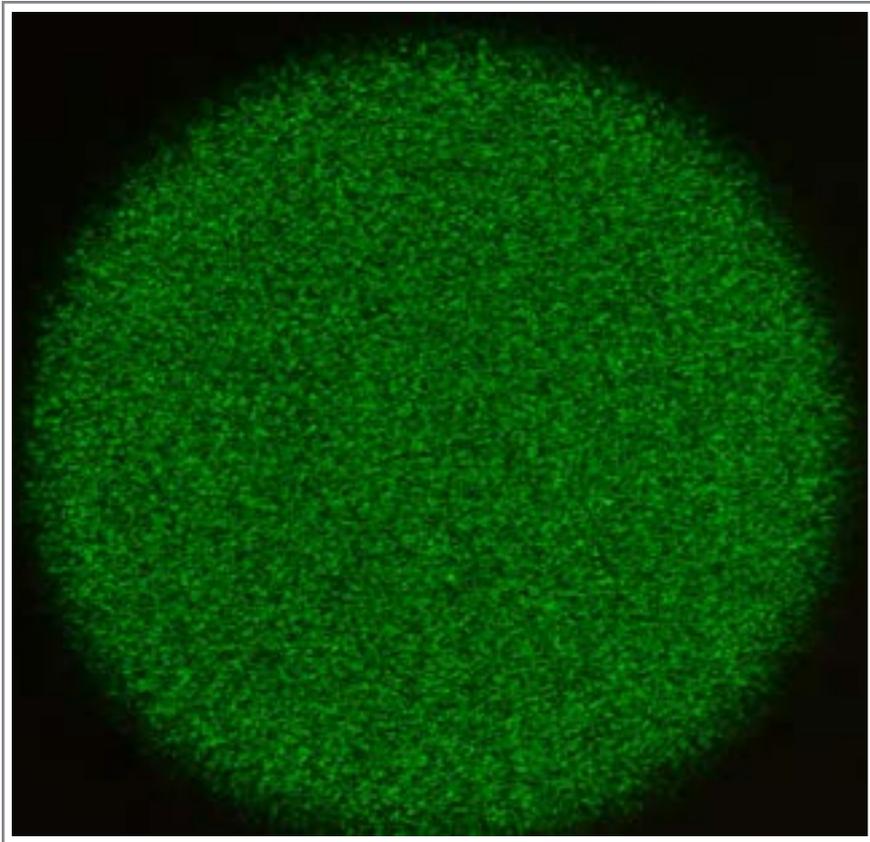


Werden nun zwei Parabolspiegel wie beim Miraskop aufeinander gestellt, liegt das Objekt, das betrachtet wird, im **unteren Fokus**. Das von hier ausgehende Licht wird vom oberen Spiegel in parallele Lichtstrahlen zum unteren Spiegel reflektiert. Dieser sammelt nun die parallel einfallenden Strahlen in seinem Fokus, der sich im Loch des oberen Spiegels befindet, wodurch dann das Bild erzeugt wird.



VERSUCH 13: LASERSPECKLES

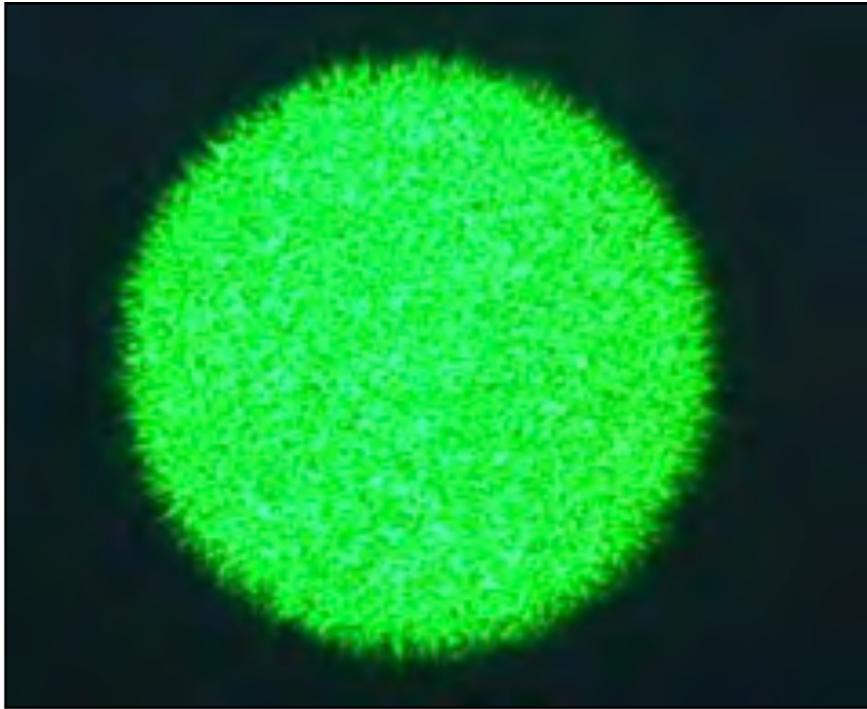
Laserspeckles



Bist du fehlsichtig?

Fällt ein Laser auf eine raue Oberfläche, entsteht ein Muster aus dunklen Punkten, anhand dessen man eine Kurz- oder Weitsichtigkeit feststellen kann. Man nennt dieses Muster "Laserspeckles".

Grundlagen



Das nebenstehende Muster entsteht, wenn ein Laser auf eine raue Oberfläche fällt, weil er von den verschiedenen Erhebungen reflektiert wird und die Lichtstrahlen, die von nebeneinander liegenden Oberflächenelementen reflektiert werden, interferieren.

Weil die hellen und dunklen Punkte aber keine Punkte auf der Leinwand sind, sondern tatsächlich helle und dunkle "Lichtzylinder", sieht man sie immer scharf, egal auf welche Entfernung das Auge eingestellt ist.

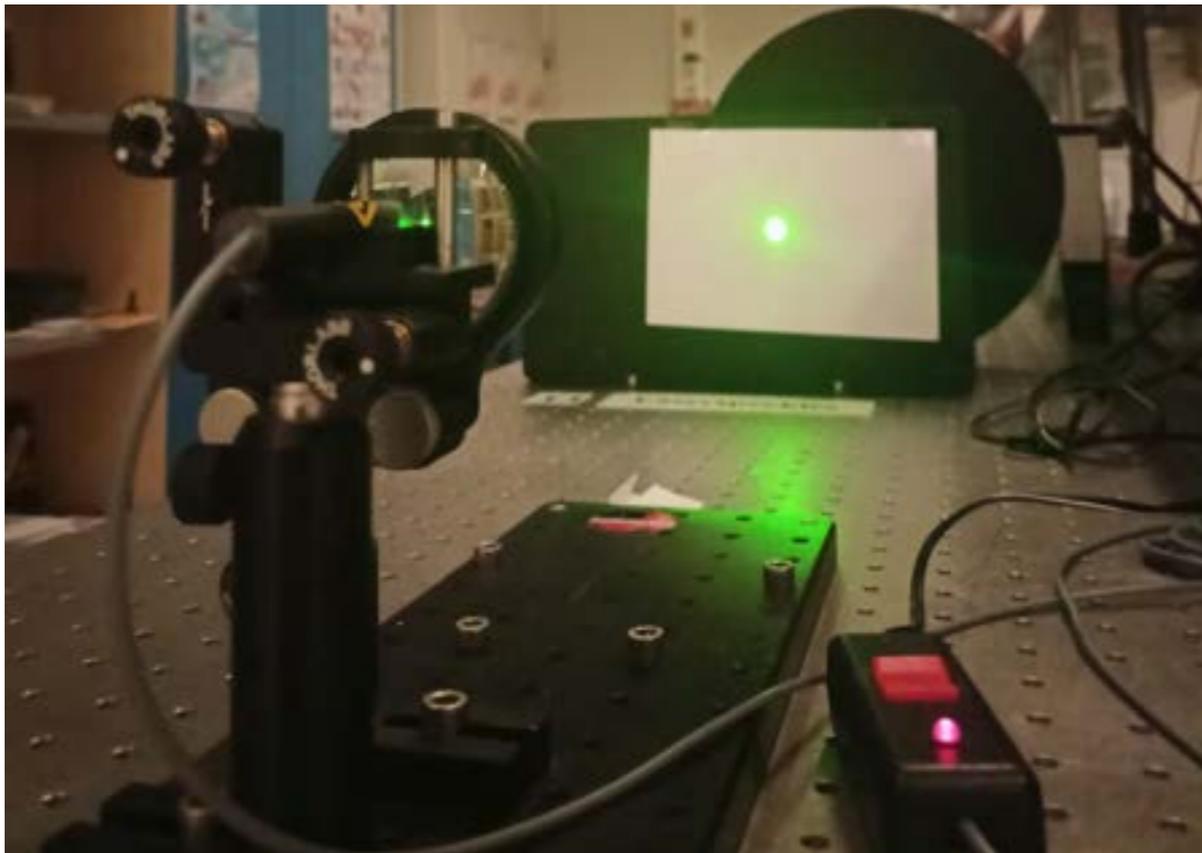
Das Auge stellt sich also auf die Leinwand scharf. Ist man fehlsichtig, ist das Bild der Leinwand entweder vor oder hinter der Netzhaut scharf (**Fehlsichtigkeit**).

Darum sieht ein Kurzsichtiger die Speckles scheinbar vor der Leinwand, ein Weitsichtiger scheinbar hinter dieser.

Bewegt man nun seinen Kopf, scheinen sich auch die schwarzen Punkte im Verhältnis zur Leinwand zu bewegen, obwohl dies nicht der Fall ist (Parallaxeneffekt).

Aufbau

Ordne den Laserpointer, die Linse und die Papierleinwand so an, dass der Laser durch die Linse aufgeweitet wird und dann auf die Leinwand fällt. Der Aufbau sollte schon wie im Bild aufgebaut sein.



Disclaimer: Die großen schwarzen Flecken sind Fehler in der Linse.

Durchführung

Laserschutzbrillen aufsetzen und Laserpointer einschalten!

Wenn du den Laserpointer einschaltest, erscheinen auf der Leinwand die Speckles. Blicke senkrecht darauf und bewege dann deinen Kopf nach rechts.

Bewegen sich die schwarzen Punkte **in Bewegungsrichtung** deines Kopfes, bist du **weitsichtig**.

Bewegen sich die schwarzen Punkte **entgegen der Bewegungsrichtung** eines Kopfes, bist du **kurzsichtig**.

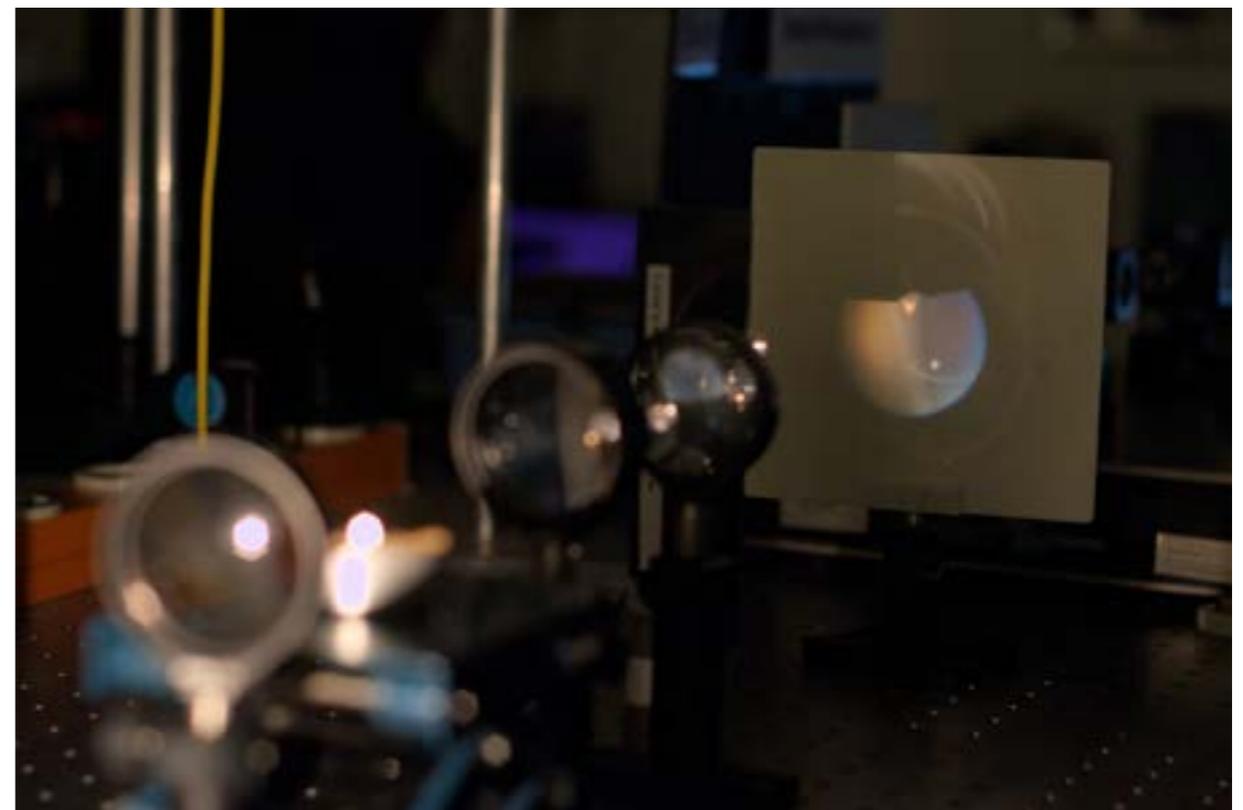
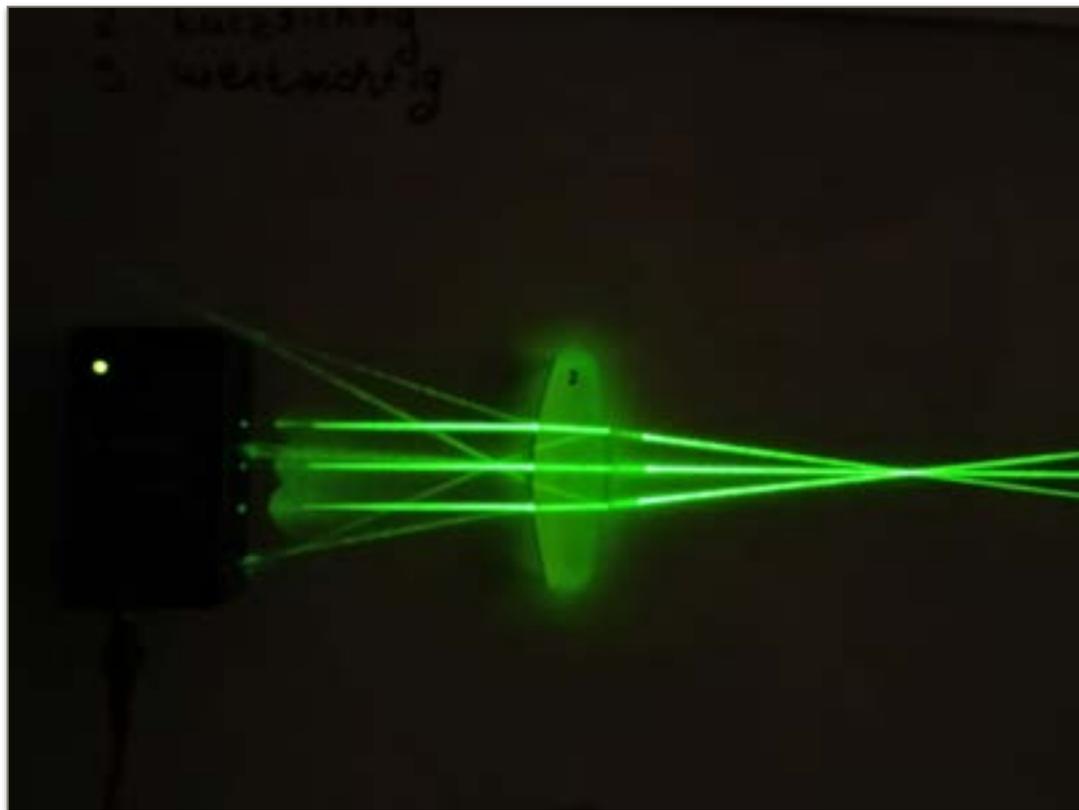
Bewegen sich die schwarzen Punkte im Verhältnis zur Leinwand **nicht**, hast du **keine Fehlsichtigkeit**.

Dieser Test ist sehr präzise, und eine hier festgestellte Fehlsichtigkeit kann auch an einer Ermüdung des Auges liegen.

VERSUCH 14: GEOMETRISCHE OPTIK

Geometrische Optik

Unsichtbares sichtbar machen?



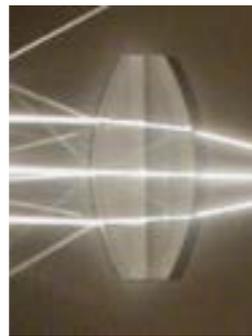
Die **geometrische Optik** befasst sich mit dem rein geometrischen Anteil der Optik (**Strahlenoptik**). Sie ein Modell, um die Entstehung von **Abbildungen** ausreichend genau zu untersuchen.

Übrigens: Verlaufen die Lichtstrahlen unter flachem Winkel nahe zur **optischen Achse**, spricht man von der **Paraxialoptik**.

Basics

Linsen

Transparente Scheiben, die den Verlauf eines Strahls beeinflussen.



Blenden

Eine Blende ist z.B. eine Scheibe mit einem Loch. Zweck einer Blende ist es, bestimmte Bereiche eines Bündels von Lichtstrahlen abzufangen.

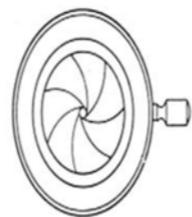


Abb. 197. Eine Irisblende.

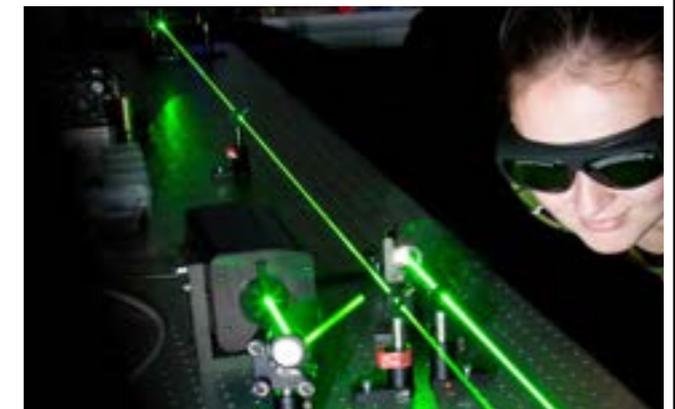
Optisches System

Gesamtes Equipment, das dazu führt, dass eine Abbildung entsteht. So ein System kann manchmal (hier: MPQ) ganz schön komplex werden.



Lichtquelle

Eine Lichtquelle ist der Ursprung der Strahlen (z.B. Laser, Halogenlampe).



Schirm

Auf einem Schirm landen z.B. die Bilder, nachdem dessen Strahlen ein optisches System durchlaufen haben.

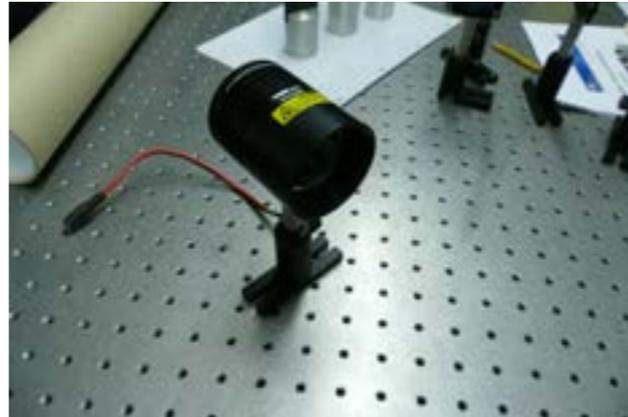


Equipment (Übersicht)

Schlierenkante



Halogenlampe (Lichtquelle)



Irisblende (wie Auge)



Einfachspalt



Roter und blauer Farbfilter



"Schrödinger Katze"
(Gegenstand)



Schienen mit metrischer
Beschriftung



Linse (Daten wie
Brennweite: siehe Linse)



Gitternetz (Gegen-
stand)

Versuch 1: Scharfe Katzenkrallen

Komponenten: Lichtquelle (Halogenlampe), **Linse** ($f=100\text{mm}$ bikonvex), Schirm, Schrödinger Katze (Gegenstand)

1. Setze die **Schrödinger Katze** 1 cm vor die **Halogenlampe** und **schalte** diese Lampe dann ein.
2. Stelle nun den **weißen Schirm** in einer Entfernung von etwa **60 cm** (beachte hier die **Beschriftung** der **Schienen**) vom **Gegenstand** (der Katze) auf. Nun solltest du das **Licht** der **Lichtquelle** auf dem **Schirm** sehen können. Das ist schonmal ein guter Anfang!
3. Nun kommt die **bikonvexe Linse** (Brennweite $f=100\text{mm}$) zum Einsatz. **Schiebe** diese zwischen **Gegenstand** und **Schirm** solange hin und her, bis du ein **scharfes Bild** der **Katze** beobachten kannst. Wichtig: **Messe** nun die **Gegenstandsweite g und die Bildweite b** und setze diese Werte in die **Linsegleichung** (siehe unten) ein.

Wenn du nach f auflöst, kommt dann ungefähr die Brennweite raus?

4. (optional) Gibt es eine zweite Gegenstandsweite (oder Bildweite), bei der du ein scharfes Bild erhältst? (**Lösung hier**)

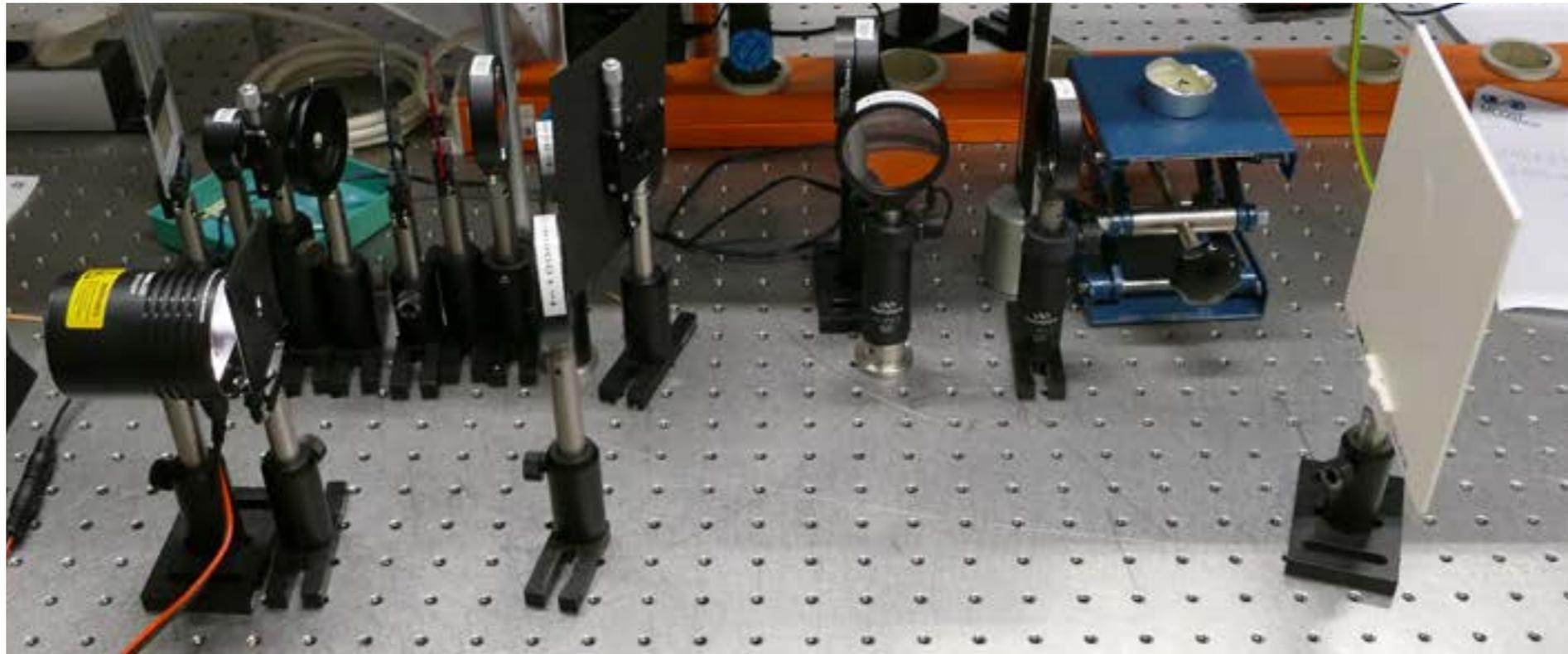
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

ERKLÄRUNG

Was du hier siehst:

Links im Bild siehst du die Lichtquelle. Gleich daneben die Katze (Gegenstand) und die Linse. Sieht dein Aufbau ähnlich aus?

Achtung! Die Katze wird schnell von der Lampe aufgeheizt - halte sie also nicht zu lange direkt vor die Halogenlampe!



Das war eine einstufige Abbildung. Möchtest du nun eine zweistufige Abbildung untersuchen, deren Ziel es ist, eine Vergrößerung darzustellen, wie rechts im Bild? Dann klicke [hier](#) für diesen Versuch!



Versuch 2: Was ist der Fehler?

Komponenten: Lichtquelle (Halogenlampe), Linse ($f=100\text{mm}$) bikonvex, Schirm, Gitternetz, Irisblende

1. Zuerst verwenden wir den **letzten Aufbau**, um wieder ein **scharfes Bild** auf dem **Schirm** zu erzeugen. Dieses Mal verwenden wir aber nicht die **Schrödinger Katze** als **Gegenstand**, sondern das **Gitternetz**. Wenn du ein **Bild** auf dem **Schirm** hast, sind dann alle **Bereiche** der **Abbildung** **scharf**? Nein? Wenn du wissen willst, warum, schaue dir das Kapitel zur **sphärischen Abberation** an.

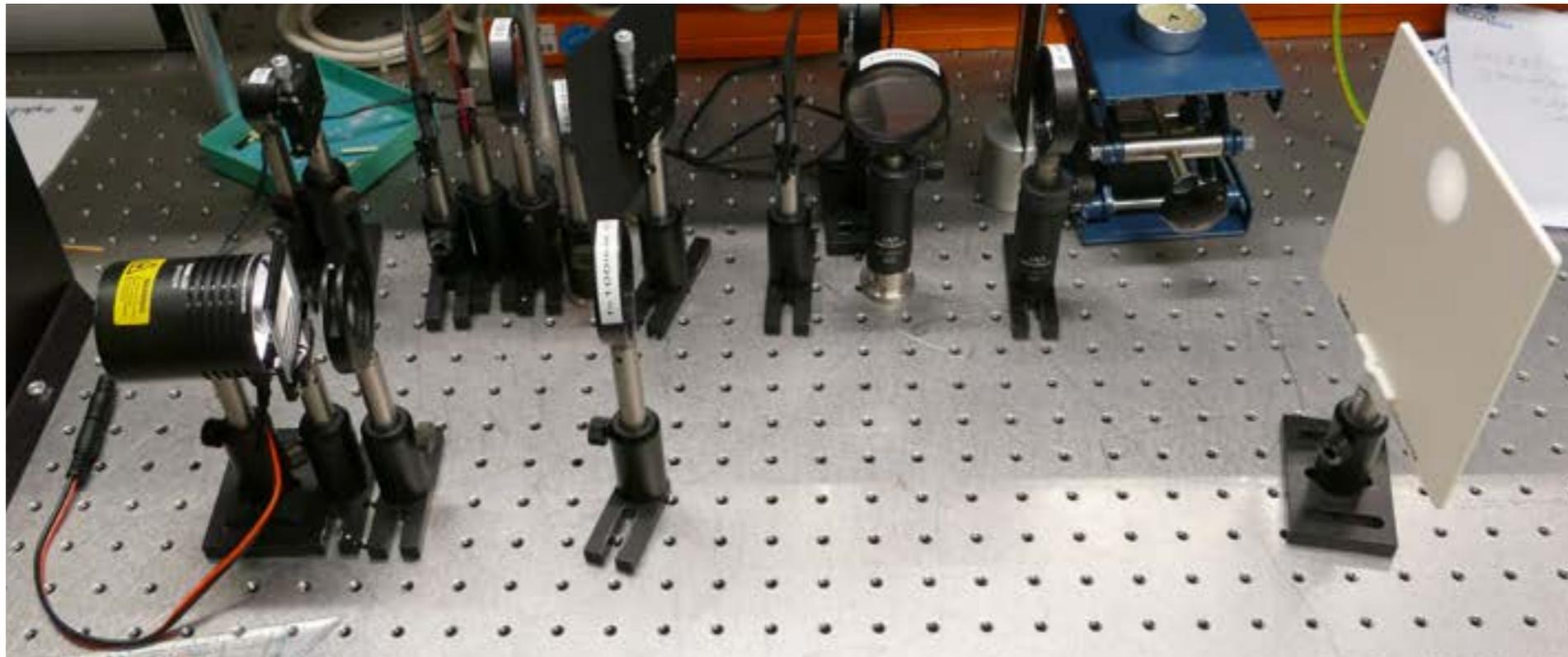
2. Nun wollen wir herausfinden, wie wir die **unscharfen Bereiche** des **Bildes** **entfernen** können, wir wollen also den **Abbildungsfehler** minimieren. Stelle die **Irisblende** zwischen **Gegenstand (Gitternetz)** und **Linse**. Variiere dann die **Öffnung** der **Irisblende**, indem du den **Regler** verschiebst. **Probier** es mal **aus!**

Was kannst du unter welchen Bedingungen beobachten?

VERSUCH 2

Was du hier siehst:

Links im Bild siehst du wieder die Halogenlampe, daneben das Gitternetz, dann die Irisblende und die Linse. Ungefähr so sollte dein optisches System aussehen.



Wenn du noch mehr Versuche zur [Abberation](#) machen möchtest, klicke [hier](#) für den Versuch zur chromatischen Abberation!

Versuch 3: Schlierenoptik

Jetzt kommt das Highlight dieser kleinen Versuchsreihe: Du kannst hier unsichtbares sichtbar machen. Oder ist alles nur heiße Luft?

Was du brauchst:

Lichtquelle (Halogenlampe), 2x Linse ($f=200\text{mm}$, plankonvex),
Linse ($f=150\text{mm}$, bikonvex), Kerze, Schrödinger Katze, Schirm,
Streichhölzer, Schlierenkante (**ACHTUNG! SCHARF!**)



1. Stelle zuerst eine von den beiden plankonvexen Linsen im Abstand von der Brennweite direkt vor die **Halogenlampe**. Achte dabei darauf, dass die plane (ebene) Seite der Linse zur Lampe zeigt. **Kontrollcheck**: Überprüfe mit einem kleinen Stück Papier, ob der Strahldurchmesser bei variabler Entfernung zur Lichtquelle konstant bleibt (dann verlaufen die Lichtstrahlen parallel).

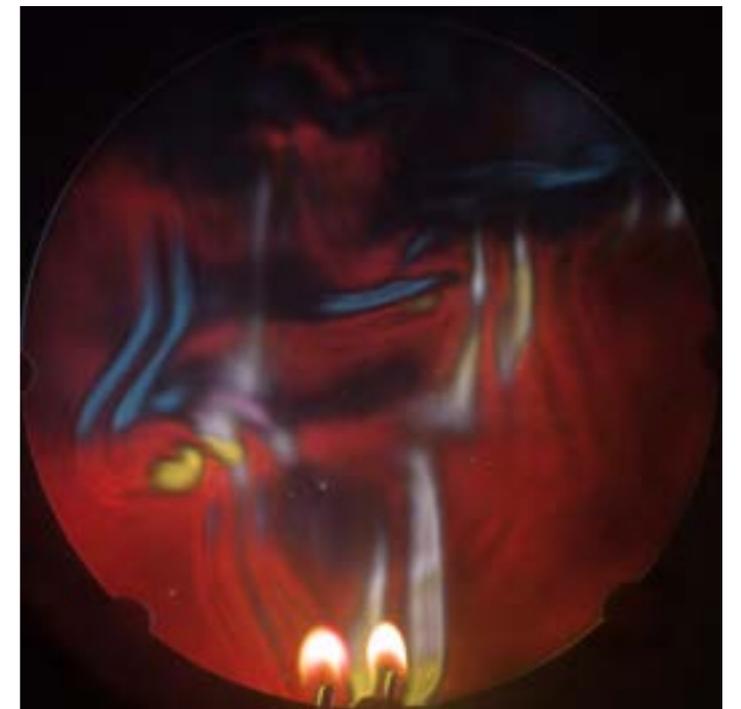
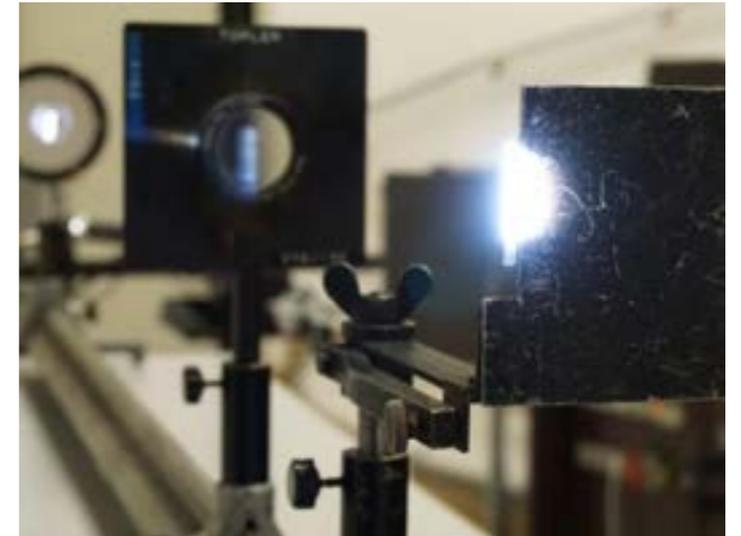
2. Nun kommt die **zweite plankonvexe Linse** ($f=200\text{mm}$) **rechts** neben der eben aufgestellten **ersten plankonvexen Linse**. Stelle nun die **Kerze** (**noch nicht anzünden!**) zwischen die beiden Linsen. Achte wieder darauf, dass die **plane** Seite **Richtung Schirm** zeigt (merke: "Die Bäuche zeigen zueinander"). Beachte hierbei, dass der Abstand zwischen zweiter Linse und Schirm genau $L=50\text{ cm}$ sein soll!

HIGHLIGHT

ACHTUNG: Die Schlierenkante ist eine **Rasierklinge!!!** Extrem scharf und gefährlich, nicht anfassen!!!

3. Die **letzte Linse (bikonvex mit $f=150\text{mm}$)** kommt **zwischen Schirm und zweiter (plankonvexer) Linse**. Diese **letzte, bikonvexe Linse** musst du so ausrichten, dass das **Bild der Kerze scharf auf dem Schirm** abgebildet wird. **Tipp: Benutze anfangs den Docht der Kerze (oder das Gitternetz), um ein scharfes Bild zu erzeugen!** Danach kannst du die Kerze vorsichtig anzünden.

4. Im **letzten Schritt** setzen wir die **Schlierenkante** zwischen 2. und 3. Linse ein und verschieben sie so im Strahl, dass der Lichtpunkt minimal wird. Das ist der **Brennpunkt**. **Schiebe die Kante** nun vor bzw. zurück, dass sie **im Brennpunkt** einen Großteil des **Lichtes abdeckt** und nur der letzte "Hauch" daran **vorbeikommt (wie rechts oben)**. Nun müsstest du die **Dichtefluktuationen** um die **Kerze** herum auf dem **Schirm** beobachten können. Ansonsten schiebe die Kante etwas mehr vor bzw. zurück.

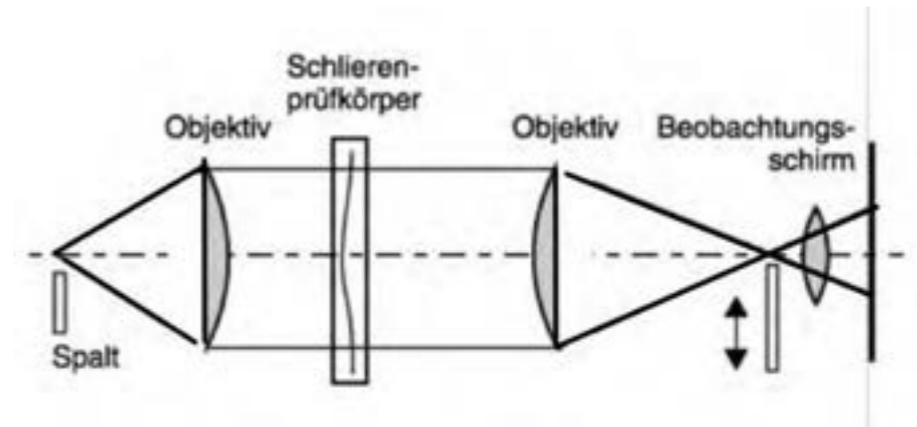
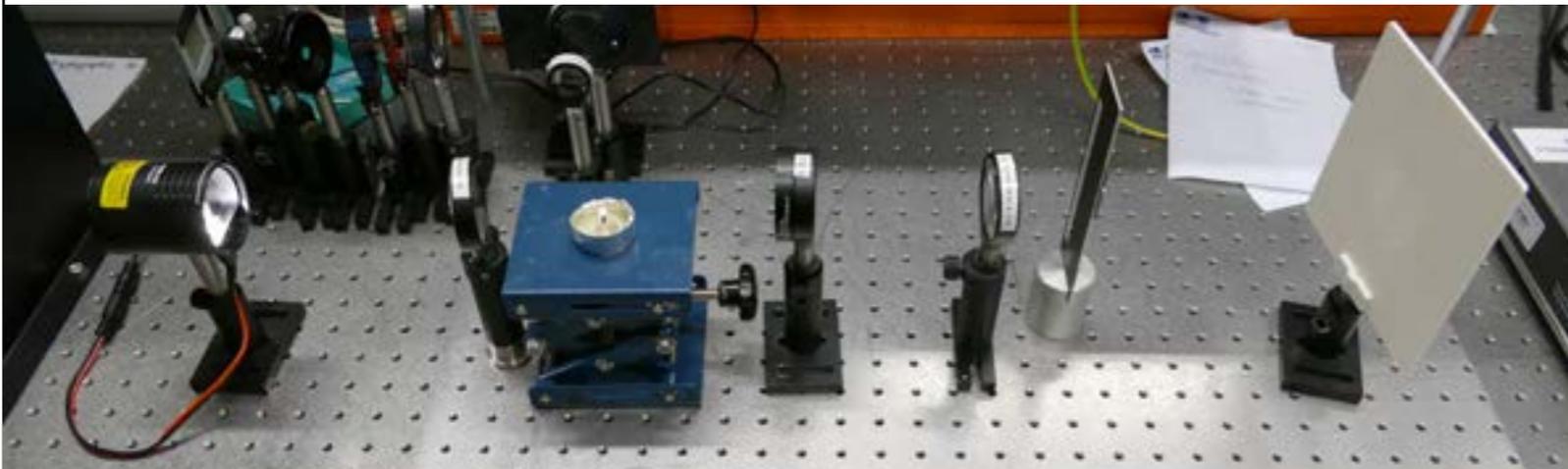


Auf dem Bild zu sehen ist ein Kerze in einem Einzelspiegelschlierenfotografieapparat, welcher statt einer Rasiermesserklinge zum Trennen des gebrochenen Lichts vier FarbfILTER benutzt. Dadurch wird die horizontale bzw. vertikale Trennung des Lichts sichtbar. Hiermit kann man mehr als nur "dichte Luft von weniger dichter Luft" trennen, sondern auch die 3-dimensionale Form sichtbar machen

ERKLÄRUNG

Was du hier siehst:

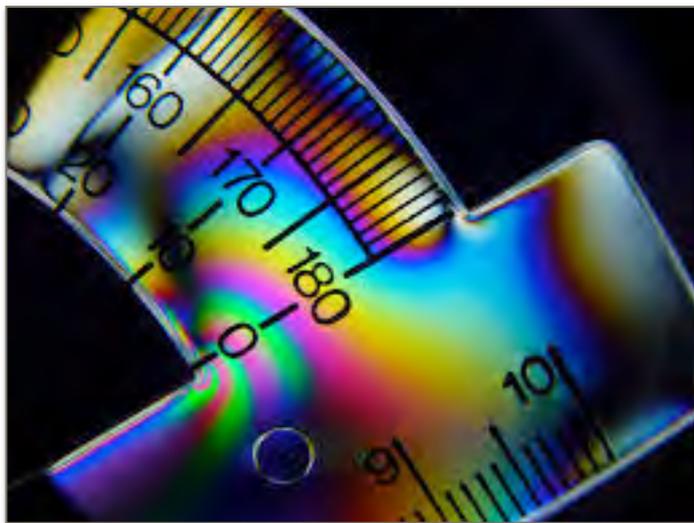
In Richtung rechts beleuchtet die Lichtquelle die beiden plankonvexen Linsen, dazwischen die Kerze, dann die Schlierenkante, die Linse und den Schirm.



Wieso eigentlich eine Schlierenkante? Luft ist ja normalerweise ein homogenes Medium. Hier kommt die Kante ins Spiel: Diese "blendet" die parallel verlaufenden Strahlen zwischen den ersten beiden Linsen (plankonvex) aus. Bei einer Kerze sieht das aber anders aus! Durch die Dichteunterschiede, die ihr ja mit dem Versuch abgebildet habt, werden nicht alle Lichtstrahlen im Brennpunkt vereint und können an der Kante vorbei abgebildet werden.

Für Profis: Jetzt habt ihr schon fleißig experimentiert! Überlegt euch nun, wie ein Regenbogen zustande kommt. Die Lösung findet ihr [hier](#)!

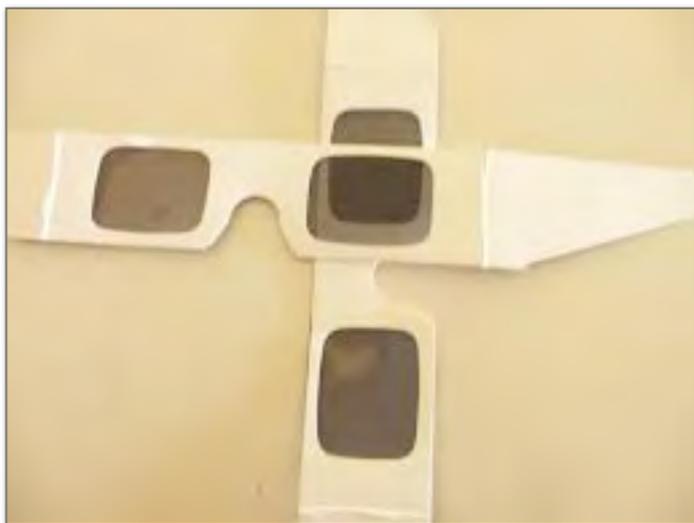
Polarisation



Was haben 3D-Brillen, schillernde Farben und Limonaden gemeinsam?

Hier kommt jeweils eine Eigenschaft des Lichtes, die Polarisation, zum Tragen:

- Mit polarisiertem Licht kann man die Beanspruchung von Materialien (z. B. Werkzeugen) untersuchen.
- Mit Hilfe von polarisiertem Licht kannst du im Kino Filme in 3D sehen (Versuch: 3D-Sehen).
- Mit einem Polarimeter stellt der Hersteller die richtige Zuckerkonzentration in der Limo ein.



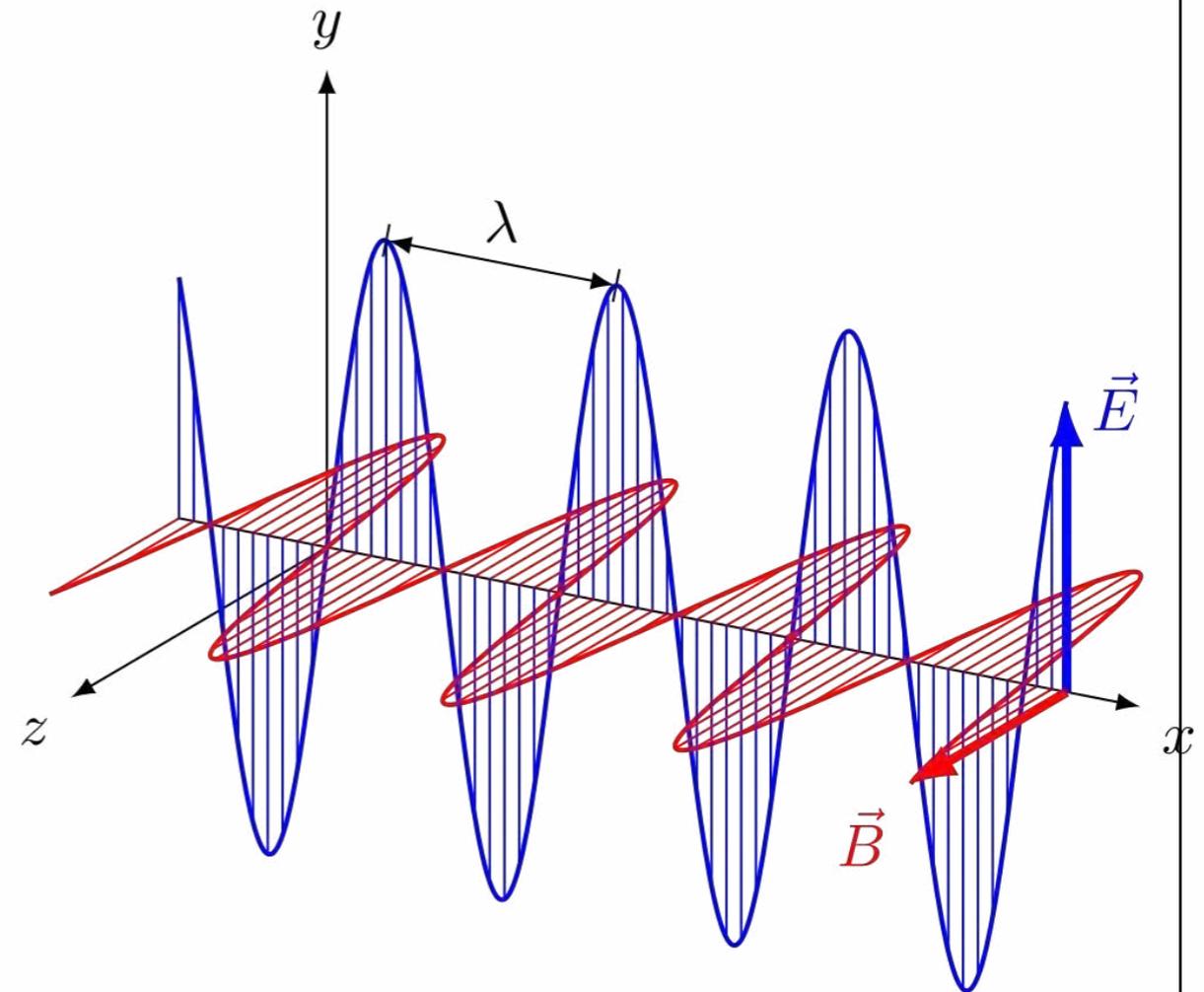
Grundlagen

Bevor wir uns näher mit der Polarisation beschäftigen, müssen wir uns die Eigenschaften von Licht anschauen. Licht kann man als elektromagnetische Welle beschreiben.

Was sind elektromagnetische Wellen?

Elektromagnetische Wellen sind sogenannte Transversalwellen, deren magnetisches B-Feld senkrecht zum elektrischen E-Feld schwingt. Die hier gezeigte Welle ist **monochromatisch** (hat also eine feste Wellenlänge λ und ist "einfarbig") und breitet sich in x-Richtung aus:

Elektromagnetische Wellen entstehen auf unterschiedliche Art und Weise, beispielsweise durch Bremsstrahlung in der Röntgenröhre oder durch schwingende Elektronen in einer Antenne (Hertz'scher Dipol).

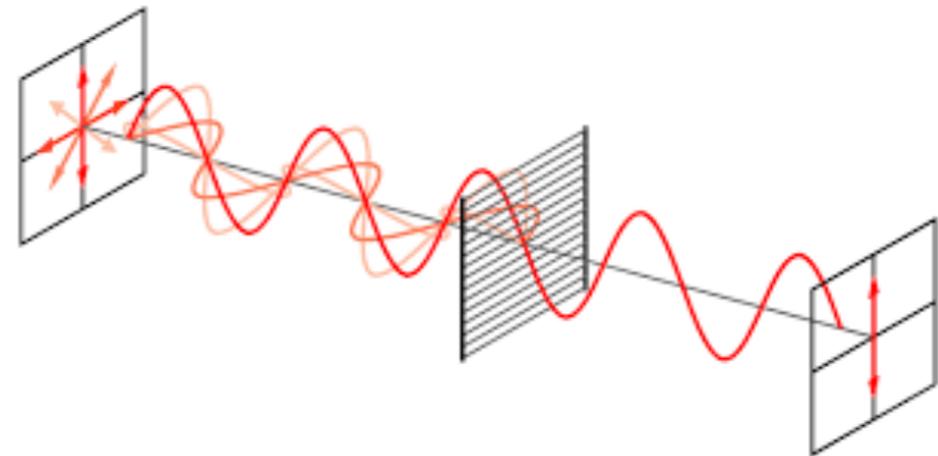


Was ist Polarisation?

Wenn man von **Polarisation** spricht, meint man die **Schwingungsrichtung** einer elektromagnetischen Welle (elektrischer Anteil im E-Feld). Ist eine Welle polarisiert, so schwingen ihr elektrischer bzw. magnetischer Feldvektor **senkrecht** zueinander in jeweils einer Ebene. Ist eine Welle **unpolarisiert**, schwingen ihre elektrischen Feldvektoren in viele unterschiedliche Richtungen (und ihre magnetischen natürlich jeweils senkrecht dazu). Ein Beispiel hierfür ist das unpolarisierte Licht einer Glühlampe (siehe Bild rechts).

Im Allgemeinen bezieht man sich auf den **elektrischen** Feldvektor, weil der magnetische immer senkrecht dazu steht.

Übrigens: Der **Polarisationsgrad** gibt an, wie "geordnet" eine Welle ist. Je **höher** der Polarisationsgrad, desto "**geordneter**" die Welle. Eine linear polarisierte Welle ist dann also eine Welle mit nur einer Schwingungsrichtung.



TV1: Mikrowellenversuch

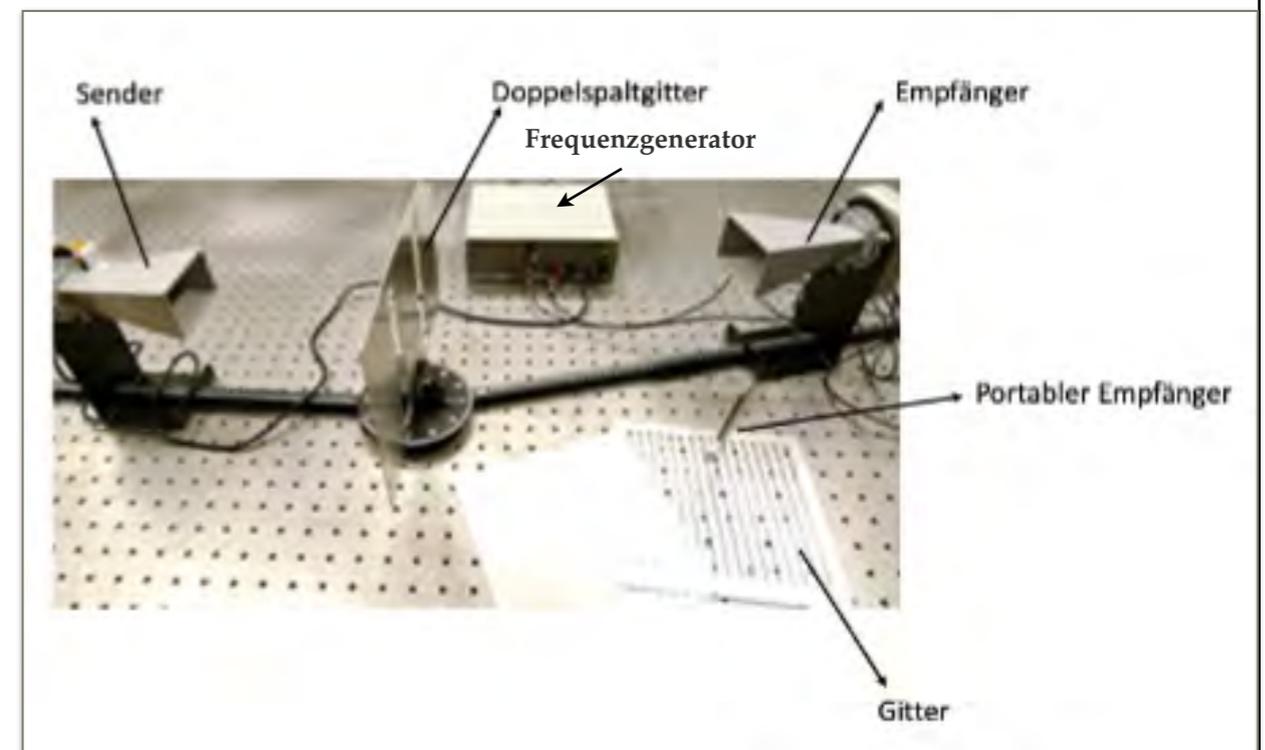
(TV=Teilversuch)

Mikrowellen sind ebenso wie Licht elektromagnetische Wellen, haben aber eine viel größere Wellenlänge im Bereich von Millimeter bis Dezimeter. Deshalb lassen sich Versuche zur Polarisation sehr leicht durchführen.

Beim Mikrowellen-Versuch handelt es sich um einen Aufbau bestehend aus einem **Mikrowellensender** auf der linken Seite, der linear polarisierte Mikrowellen aussendet, einem **Empfänger** auf der rechten Seite und einem **portablen Empfänger** (Gerät in der Mitte).

1. Senden und Empfangen

Das erste Experiment ist das Senden und Empfangen der Mikrowellen, wenn sich Sender und Empfänger direkt gegenüberstehen. Verbinde das dünne schwarze Kabel des Empfängers mit dem Frequenzgenerator (Buchse "Receiver"). Stelle sicher, dass bei "Modulator" der Schalter auf "INT" steht. Man hört nun einen Ton: Je lauter er ist, desto höher ist die Intensität des gemessenen Signals.



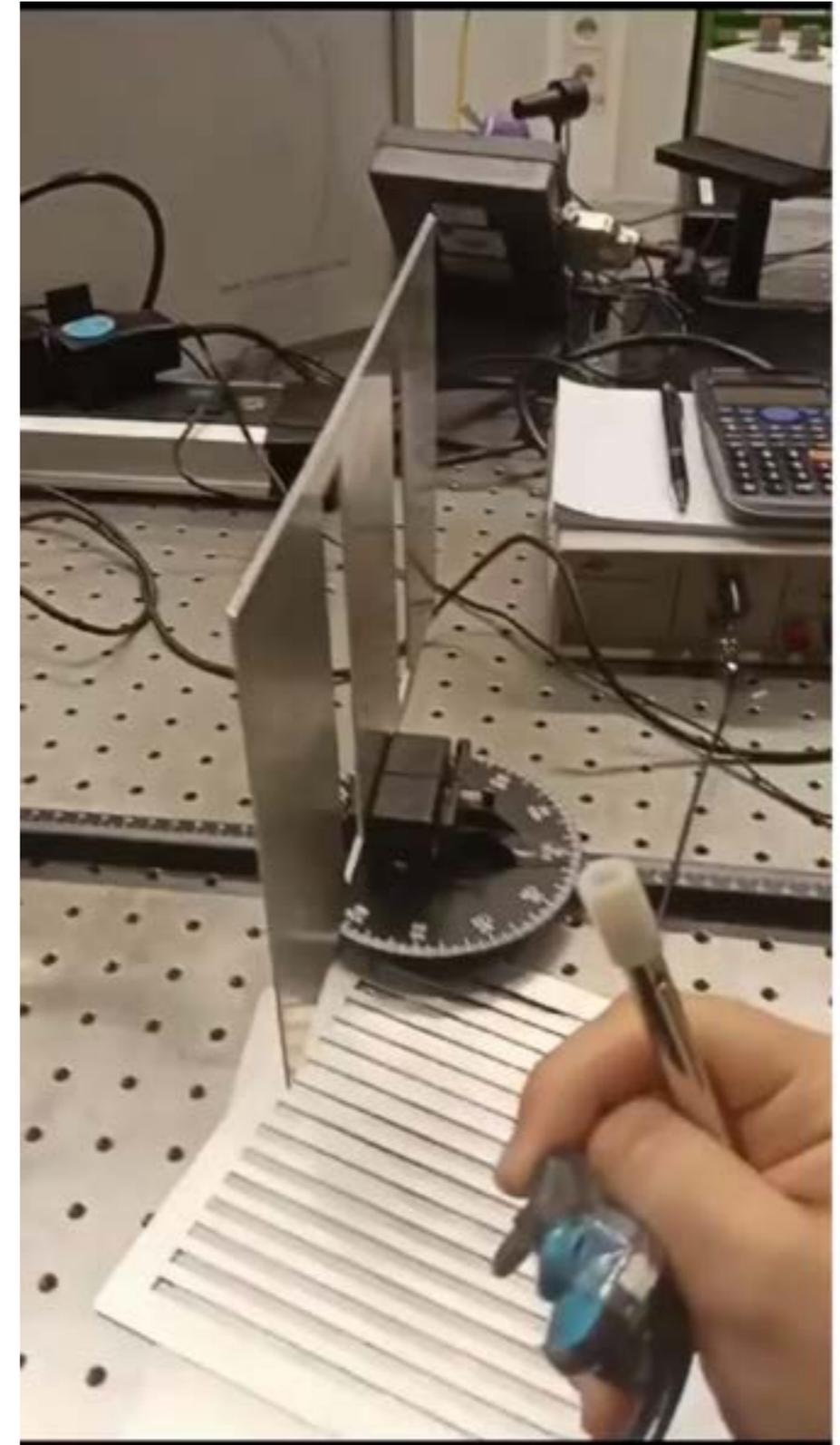
2.a: Metallplatte

Weiter kann mit einer Metallplatte mit mehreren Schlitzen (Gitter) geforscht werden. Stelle dieses senkrecht zwischen Sender und Empfänger auf den Tisch. Drehe es nun in der Ebene des Gitters um 90° . Was kannst du hören?

Erklärung: Der Sender emittiert linear polarisiertes Licht. Dieses trifft auf das Gitter. Je nach Orientierung des Gitters wird die polarisierte Schwingung absorbiert (kein Ton) oder transmittiert (durchgelassen, Ton). Das Gitter hier wird auch als Polarisationsfilter bezeichnet.

2.b: Doppelspalt

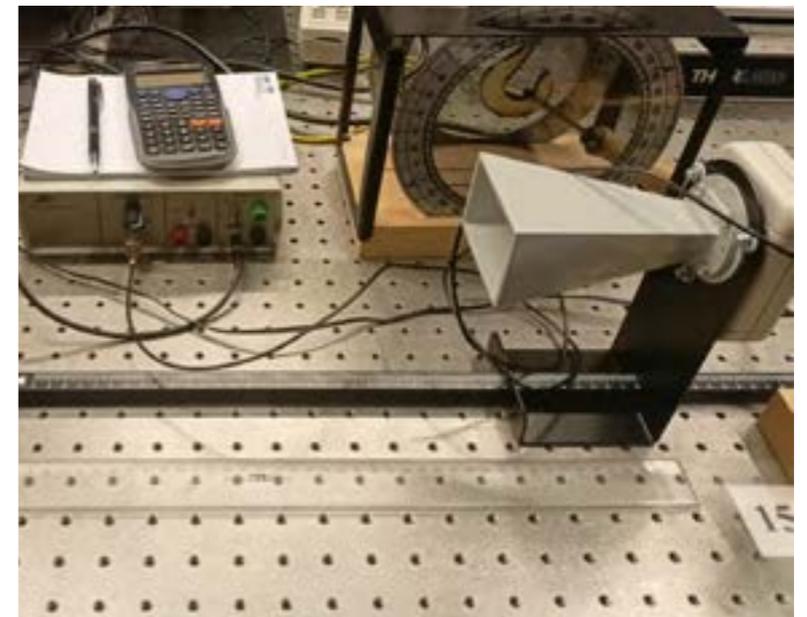
Ersetze nun das Gitter durch die Metallplatte mit den zwei Schlitzen (Ton an für den Doppelspalt im Video). Nehme dir einen mobilen (portablen) Empfänger zur Hilfe. Verbinde den portablen Empfänger dazu mit dem Frequenzgenerator an der Buchse, wo zuvor der Empfänger angeschlossen war. Durch den portablen Empfänger können wir das entstandene Interferenzmuster hinter dem Doppelspalt an einer beliebigen Position messen bzw. hören.



Frequenz selber ermitteln?

Theoretisch können wir durch den Abstand zweier Extrema die Frequenz ermitteln. Dafür nutzen wir aus, dass die gesendete und reflektierte Welle sich nun zu einer **stehenden** Welle übertragen.

Du kannst hören: Wenn du den Empfänger (auf dem Bild rechts) langsam nach vorne schiebst, verändert sich der Ton. Er soll im Idealfall gleichmäßig lauter und wieder leiser werden und eine Sinuswelle beschreiben. An Knotenpunkten ist es leiser, am Bauch lauter. Leider ist es im Labor zu laut dafür und der Aufbau zu fehlerbehaftet. Du kannst wahrscheinlich nicht herausfinden, dass die Frequenz 9,6 GHz hat und der Abstand zwischen zwei Extrema 1,6 cm (entspricht der halben Wellenlänge) beträgt.



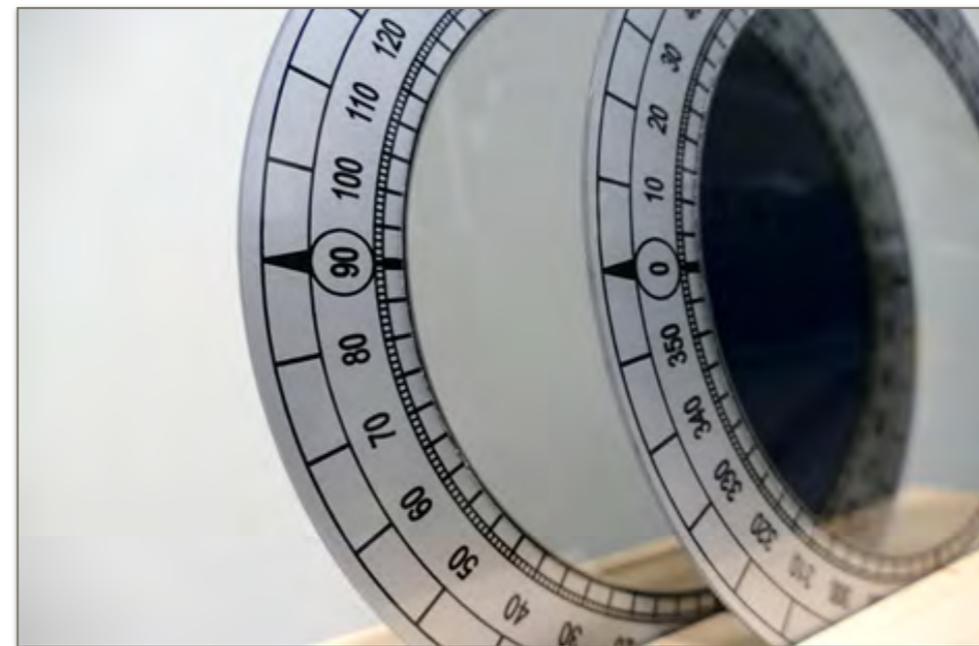
TV 2: Zwei-Filter-Versuch

Zur Wiederholung: Ein linearer Polarisationsfilter (kurz: Polfilter) ist ein Filter, der nur elektromagnetische Felder einer Schwingungsrichtung durchlässt (Durchlassrichtung). Licht, das senkrecht dazu polarisiert ist, wird nicht transmittiert (Sperrrichtung).

Jetzt bist du dran!

Untersuche, unter welchem Winkel die Polfilter zueinander lichtundurchlässig sind.

Unter welchem Winkel sind die Polfilter lichtdurchlässig?



Strahlt man unpolarisiertes Licht durch **zwei zueinander senkrechte Polfilter**, kann kein Licht transmittiert werden: Sie erscheinen dunkel (siehe vorherige Seite).

Erklärung:

Das liegt daran, dass das Licht nach dem ersten Polfilter **nur in eine Richtung** schwingt. Sobald dieses polarisierte Licht auf einen weiteren Polfilter trifft, der senkrecht zum ersten Polfilter steht, wird kein Licht durchgelassen (**Sperrrichtung**).*

Für Interessierte:

Fällt eine elektromagnetische Welle der Intensität $I(0)$ auf zwei unter einem Winkel α zueinander angeordnete lineare Polarisationsfilter, so lässt sich die transmittierte Intensität I mit dem Gesetz von Malus berechnen. Es gilt: $I = I(0) \cdot \cos^2(\alpha)$

*Polfilter bestehen aus langgezogenen Molekülketten aus Iod, deren innere Ladungsverteilung mit dem elektrischen Feld des Lichts wechselwirkt.

Versuch es selbst!

Stelle die nachfolgenden Bilder nach! Verstehst du deine Beobachtungen?



Jetzt veränderst du die Stellung der beiden Filter relativ zueinander. Was kannst du beobachten? Was passiert bei 45° ?

Für Interessierte: Wie hoch ist die transmittierte Intensität bei 45° ?

TV 3: Drei-Filter-Versuch

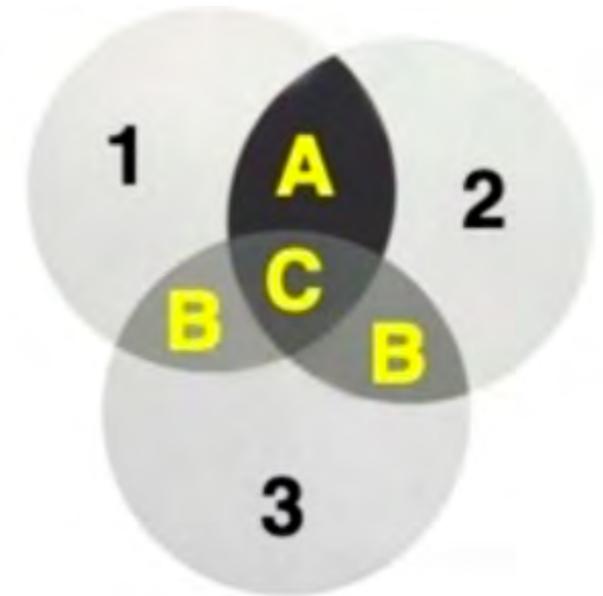
Wir fangen mit dem schon bekannten Zwei-Filter-Versuch in Sperrrichtung an. Nimm einen dritten Polfilter und halte ihn zwischen die ersten beiden. Nun rotierst du den dritten Filter.

WOW! Obwohl zunächst kein Licht transmittiert wurde, hast du es sicherlich geschafft, dass wieder Licht durchkommt! Wie kann das sein?

Du hast bestimmt folgendes beobachtet: Je näher der dritte Filter um 45° relativ zu den anderen beiden gedreht wird, desto mehr Licht lässt er durch.

Wieso wird bei 45° wieder Licht durchgelassen?

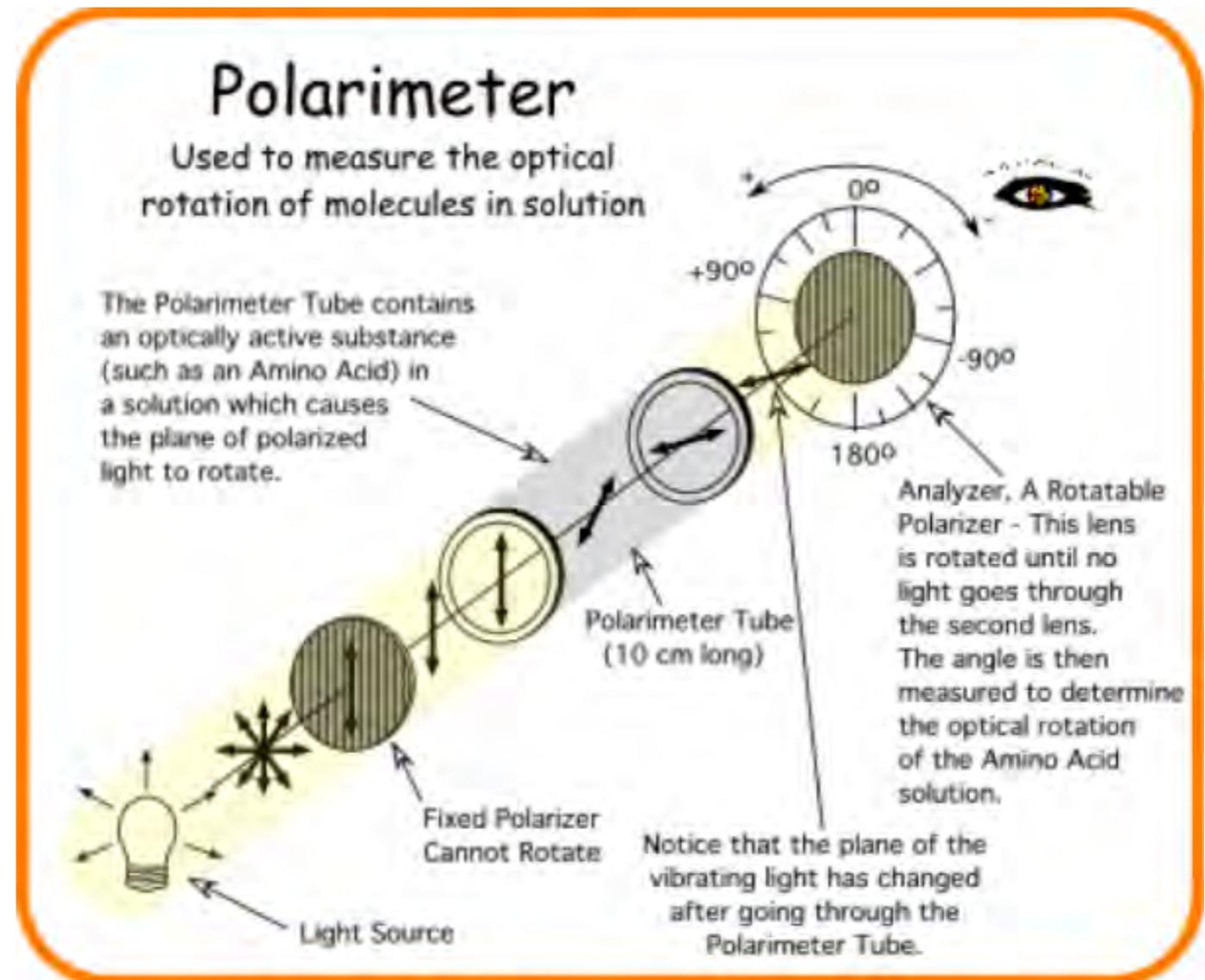
Wie du beim Zwei-Filter-Versuch schon beobachtet und berechnet hast, wird laut dem Gesetz von Malus unter 45° 50% der Intensität $I(0)$ des einfallenden Lichts durchgelassen. Da wir hier drei Polfilter unter jeweils 45° zueinander stehen haben, ist die insgesamt transmittierte Intensität $50\% \cdot 50\% = 25\%$.



TV 4: Polarimeter

Schalte den Laser an, indem du den großen roten Schalter umlegst. Mithilfe der Polarisation können wir nun die Zuckerkonzentration mit einem "Polarimeter" messen! Dazu stellen wir erst die Polarisatoren ohne die Küvette (Glasgefäß) senkrecht zueinander ein (der hintere Filter steht auf Null: Nullposition, da kein Licht auf den Bildschirm fällt). Stellen wir nun die Küvette dazwischen, muss aufgrund der **Chiralität** der optisch aktiven Substanzen wieder etwas Licht durchgelassen werden.

Diesen Effekt nutzen wir aus, indem wir den Analysator so lange drehen, bis der Bildschirm wieder dunkel ist. Dieser Rotationswinkel ist der **Drehwinkel α** , der in Verbindung mit dem Volumen der Flüssigkeit in die oben genannte Formel eingesetzt werden kann, um die Konzentration des Zuckergehalts (in g) zu bestimmen.

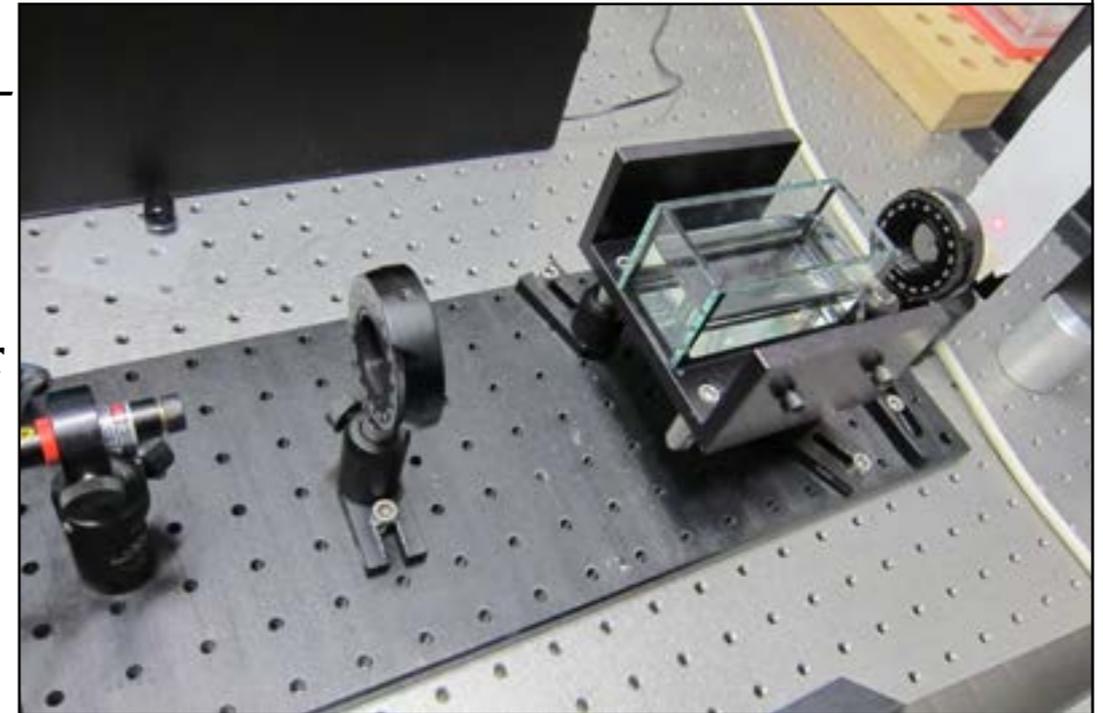


Der Drehwinkel der Polarisationsrichtung ist direkt proportional zur Konzentration c (d.h. Masse m pro Volumen V) der optisch aktiven Substanz und der Länge d der durchlaufenen Strecke (hier: der Länge d der Küvette). Wenn man ihn misst, kann man die Konzentration von z.B. **Zuckerwasser** messen.

$$c = \frac{\alpha}{\alpha_0 \cdot d} = \frac{m}{V} \quad \alpha_0 = 6,5 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ für Haushaltszucker}$$

α_0 heißt spezifisches Drehvermögen und ist eine Stoffkonstante.

1. Zunächst werden die Polarisatoren **ohne** Küvette senkrecht zueinander eingestellt. Dies ist die Nullstellung in der kein Licht auf den Schirm fällt. Tipp: Am besten erst den Analysator auf Null Grad stellen, dann den Polarisator drehen bis kein Licht mehr auf den Schirm fällt.
2. Dann wird die Küvette zwischen Polarisator und Analysator platziert und der Analysator so weit verdreht, bis der Bildschirm wieder dunkel ist (**weniger** als 180 Grad!).
3. Jetzt kann man den Drehwinkel α am Analysator ablesen und mit der Formel auf der vorhergehenden Seite die Konzentration c berechnen.
4. Messe jetzt das Volumen der Flüssigkeit und berechne damit die wie viel g Zucker in der Küvette sind.



TV 5: Doppelbrechung

Jetzt kommt ein weiterer cooler Effekt, mit dem du doppelt sehen kannst!

Lege ein Bild unter den Kalkstein. Hier erkennst du, dass das Licht, das von dem Bild unter dem Kalkstein ausgeht, **zwei** Bilder erzeugt.

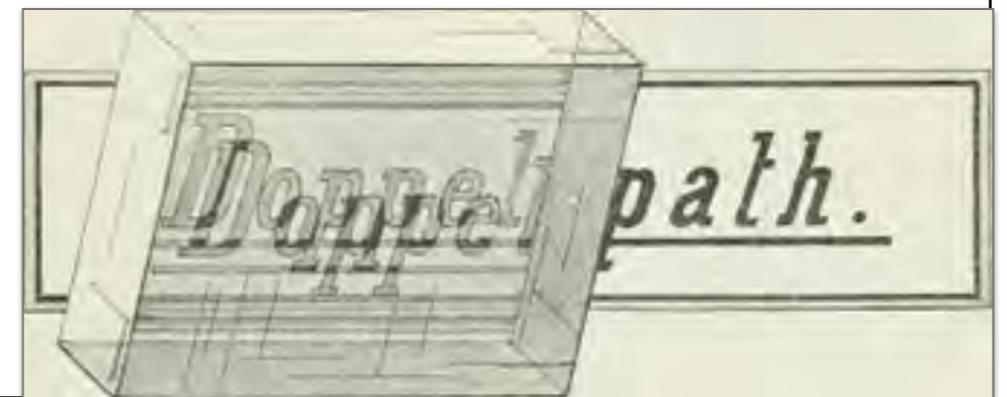
Unter Doppelbrechung wird das Aufteilen eines Lichtstrahles in zwei zueinander senkrechte, polarisierte **Teilbündel** verstanden.

Genauer gesagt werden elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Polarisation jeweils unterschiedlich stark gebrochen, sodass das Bild unter dem Kalkstein **doppelt** erscheint.

Untersuche die beiden Bilder mithilfe des Polfilters. Wie unterscheiden sie sich?

Erklärung: Legt man einen **Polfilter** auf den Kalkstein, so kann jeweils **nur eine Schwingungsrichtung** transmittieren und beobachtet werden. Man sieht bei **Rotation des Polfilters** die beiden „unterschiedlichen“ Bilder.

Versuche beide Bilder durch Rotation des Polfilters zu finden.



TV 6: Spannungsdoppelbrechung

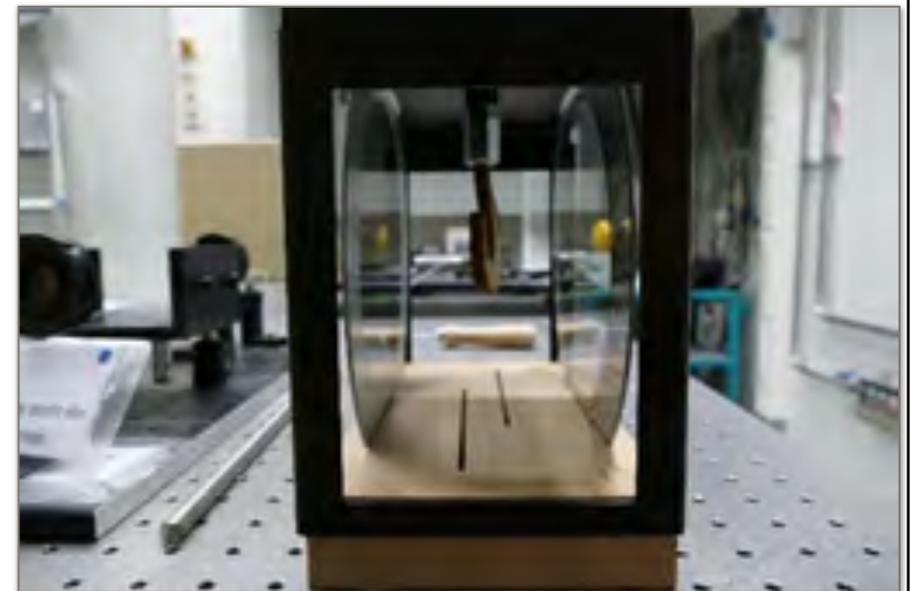
Wo bricht der Haken bei Belastung zuerst?

Mithilfe einer Erweiterung des **Zwei-Filter-Versuches** kann mechanische Spannung* (z.B. das Verbiegen eines gummiartigen Gegenstandes) **visualisiert** werden.

Um das Verbiegen zu visualisieren, musst der Gegenstand, der sich verbiegt, zwischen die beiden senkrecht zueinander (**Dunkelfeldanordnung**) eingestellten Polfilter platziert und dann verbogen werden. Ziehe also mit dem Holzhaken am Gummihaken: Du siehst bunte Streifen.

Das sind **Isochromaten**, die Linien gleicher Wellenlänge oder Frequenz darstellen und die mechanische Spannung visualisieren. Je mehr Isochromaten an einer Stelle zu sehen sind, desto stärker wirkt dort die mechanische Spannung.

*Hier darf die mechanische Spannung σ nicht mit der elektrischen Spannung U verwechselt werden: σ ist ein Maß für die innere Beanspruchung eines Körpers infolge einer äußeren Belastung (Kraft, Druck). Sie wird berechnet aus der Kraft auf eine Fläche und hat die Einheit N/m^2 bzw. Pa. Somit ist die mechanische Spannung nur ein spezifisch angewandtes Synonym von Druck.



Siehst du die Streifen bei der Dehnung? Versuche zu entdecken, wo die meiste mechanische Spannung herrscht ohne den Gegenstand zu zerstören!

Erkläre anhand der Infos, die du aus dem Text entnehmen kannst, folgende Bilder:



VERSUCH 16: ABSTANDSMESSUNG

Abstandsmessung

Wie schnell ist Licht?

Licht braucht von der Sonne zur Erde etwa acht Minuten und 19 Sekunden. Bis zum Pluto sind es dagegen schon 5,5 Stunden. Licht hat also eine **festgelegte Geschwindigkeit**. Diese ist bereits seit langer Zeit mit ca. 300.000 km/s bestimmt.

Man kann also auch den Abstand eines Objektes bestimmen, wenn man weiß, wie lange das Licht von einem selbst bis zu dem Objekt braucht. Genau dieses Verfahren wird auch genutzt, um den Abstand des Mondes von der Erde zu messen. Die Astronauten der Apollo Missionen haben diese Laserreflektoren auf dem Mond zurückgelassen, mit denen heute immer noch minimale Abweichungen (im cm-Bereich) in der Mondbahn gemessen werden. Das machen auch Sheldon und seine Freunde in der Serie "The Big Bang Theory".



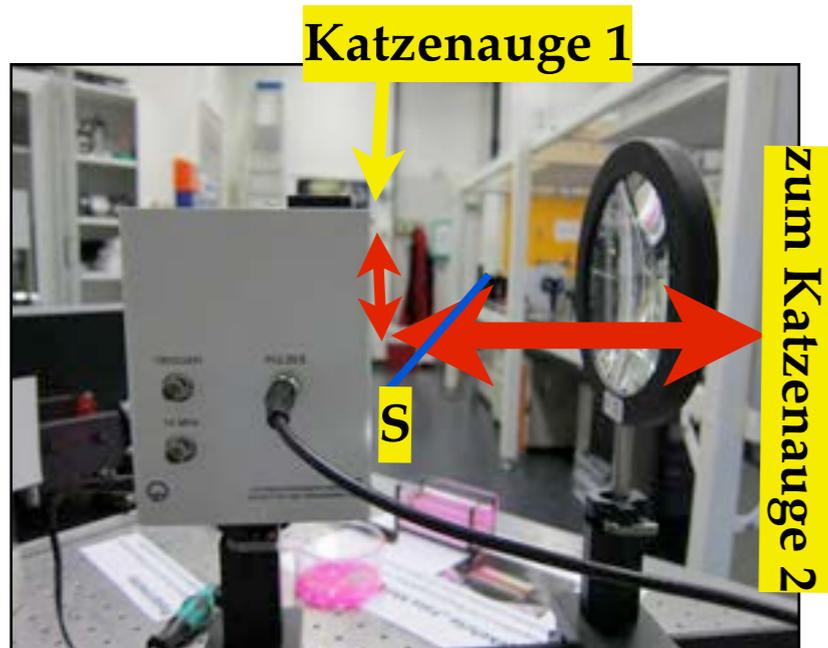
Sonne

Erde

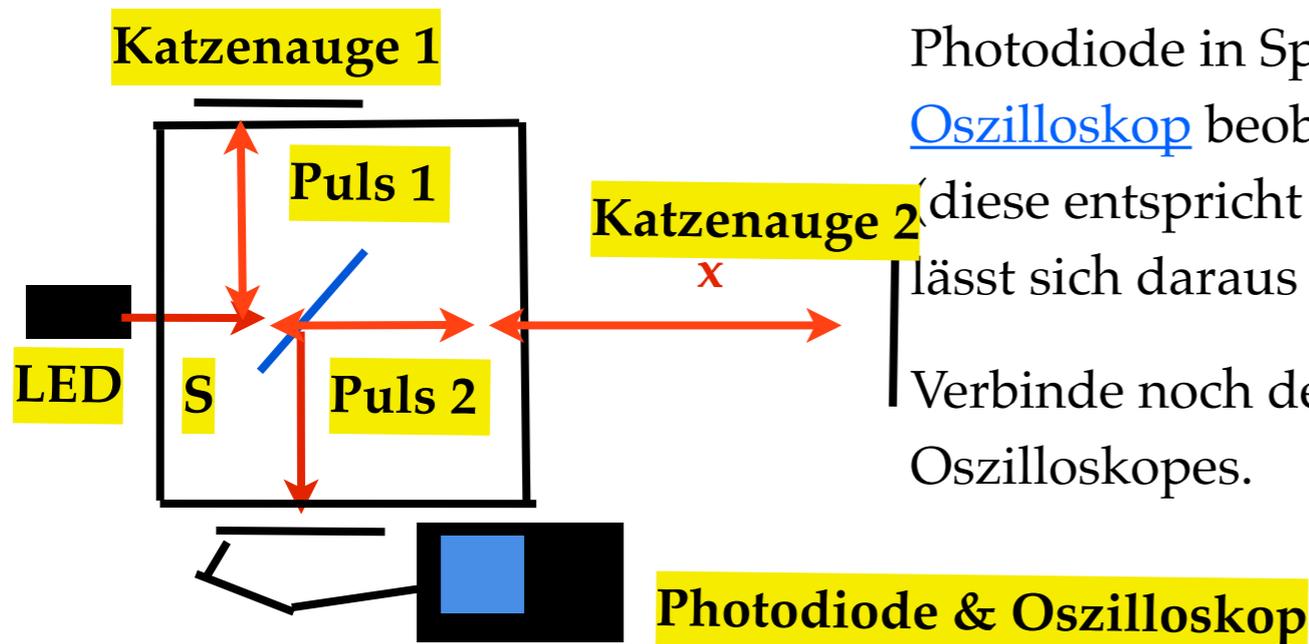
Pluto



Versuchsaufbau



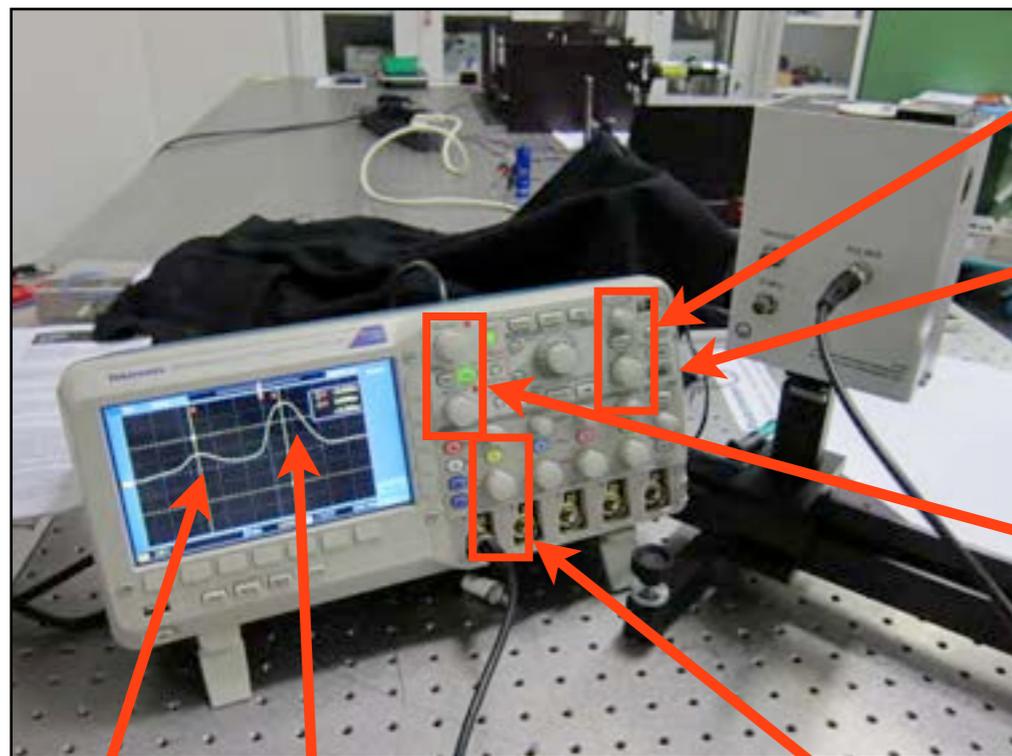
Das Lichtgeschwindigkeits-Messgerät sendet über eine Hochleistungs-LED sehr kurze, rote Lichtpulse von etwa 20 ns Länge aus. Die Lichtpulse werden durch den Strahlteiler S in zwei Teilstrahlen aufgespalten und von den Katzenaugen 1 bzw. 2 reflektiert. Puls 2 legt die zu messende Strecke x zurück, während Puls 1 als Vergleichsmessung nur die Strecke im Kasten zurücklegt. Dadurch ist der Laufzeitunterschied der beiden Lichtpulse exakt die Zeit, die das Licht von der Apparatur bis zum Katzenaugen 2 und zurück benötigt.



Nach Hin- und Rücklauf werden die Lichtpulse mit Hilfe einer Photodiode in Spannungsimpulse umgewandelt und mit einem Oszilloskop beobachtet, um die Laufzeitdifferenz zu messen (diese entspricht $2x$). Mit Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit lässt sich daraus die Entfernung des Katzenauges 2 bestimmen.

Verbinde noch den Ausgang des Pulses mit dem Channel 1 des Oszilloskopes.

Durchführung



Puls 1 Puls 2

y-Achse

x-Achse

Autoset

Taste

Marker

Damit das Oszilloskop das Signal alleine findet, drücke die Taste „Autoset“. Verändere die x- und die y-Skalierung, indem du an den im Bild markierten Knöpfen drehst. Damit die beiden Pulse gleich groß werden, kann die optische Bank mit der Linse leicht (!) verschoben werden. Dies sollte aber normalerweise nicht nötig sein! Am diesem Oszilloskop steht die **Zeit auf der x-Achse** und auf der y-Achse die Spannung, die der Intensität des Lichtstrahls entspricht.

Lese die Zeitdifferenz Δt der beiden Signale ab und bestimme mit Hilfe dieses Messwertes und der Größe der Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s) den Abstand x des „Katzenauges“.

Quiz

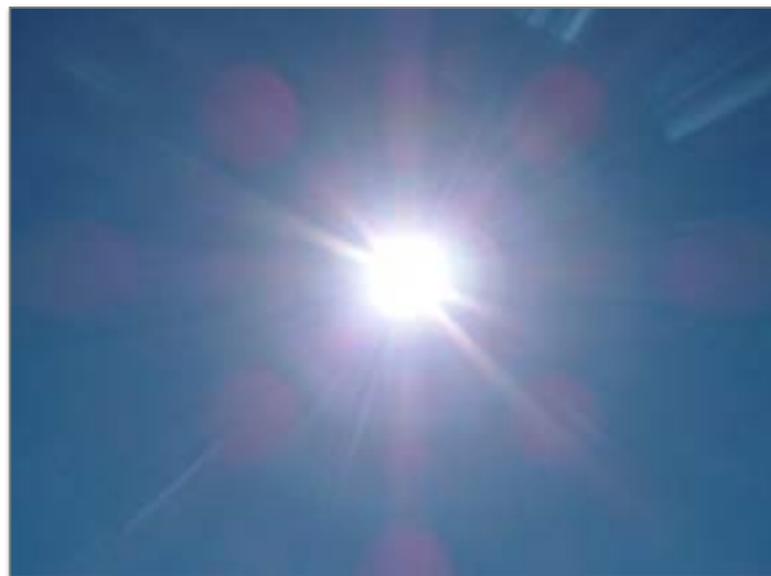
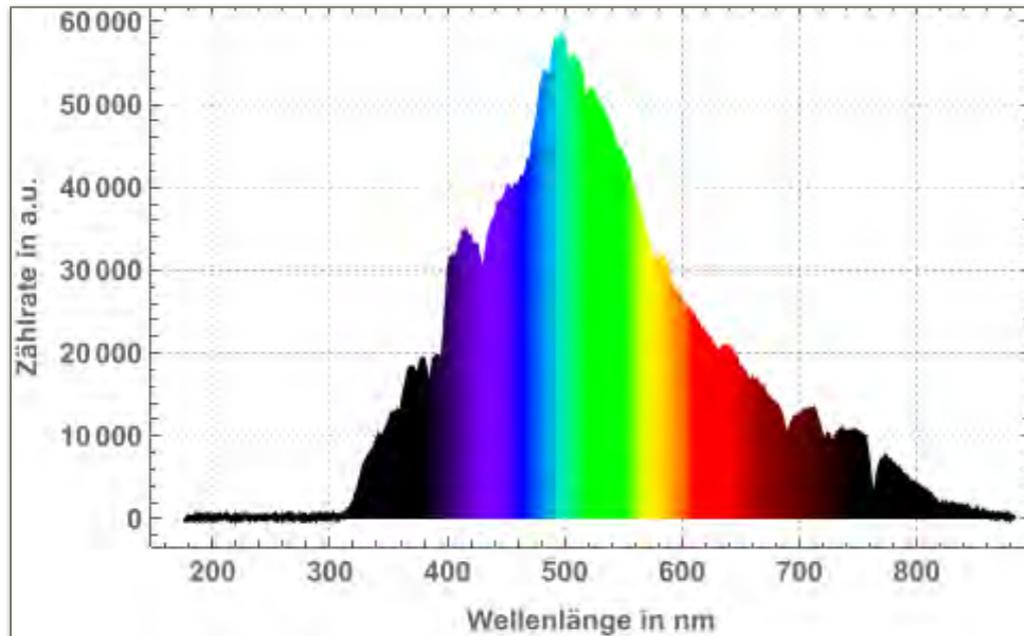
Wie weit ist das Katzenauge von der Messapparatur entfernt?

- a) ca. 4,5 Meter
- b) ca. 5,2 Meter
- c) ca. 7,5 Meter
- d) ca. 8,9 Meter

Antwort c) ist richtig.

VERSUCH 17: SPEKTRALANALYSE

Spektralanalyse



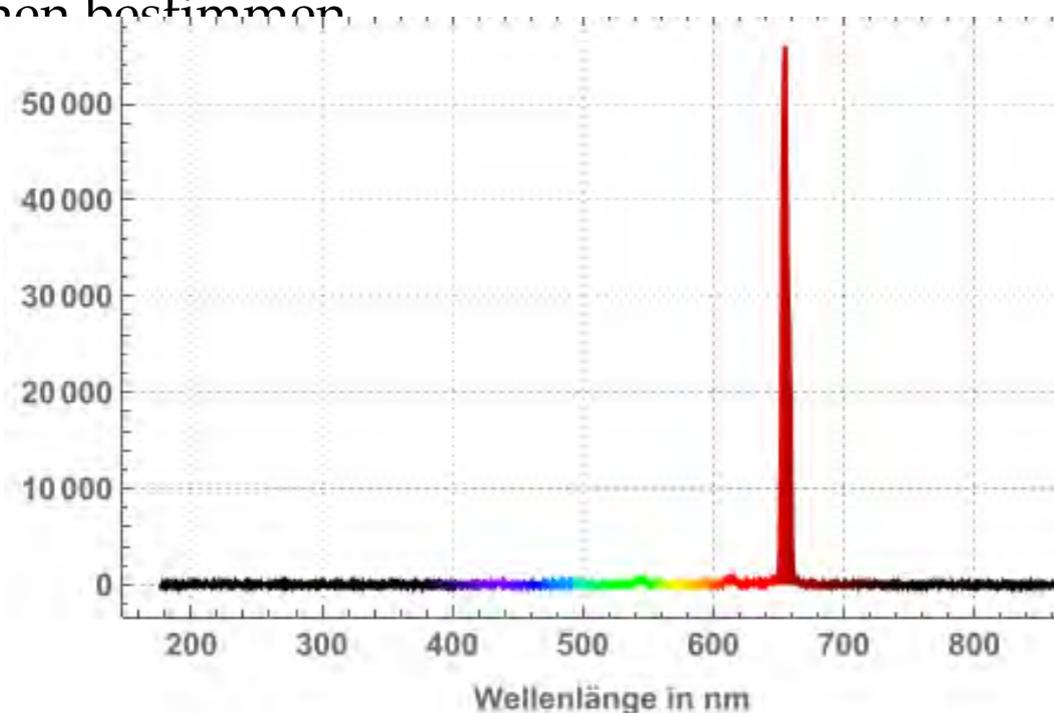
Welches Gas ist in der Deckenlampe?

Jeder Stoff strahlt, wenn er leuchtet, nur Licht bestimmter Wellenlängen ab. Das Bild all dieser Wellenlängen mit der jeweiligen Intensität nennt man das Spektrum einer Lichtquelle. Jeder Stoff bzw. jedes Element hat ein charakteristisches, einzigartiges Spektrum, sodass man ihn anhand seines Leuchtens identifizieren kann. Mit diesem Effekt kann man z.B. auch herausfinden aus welchen Elementen die [Sonne](#) besteht.

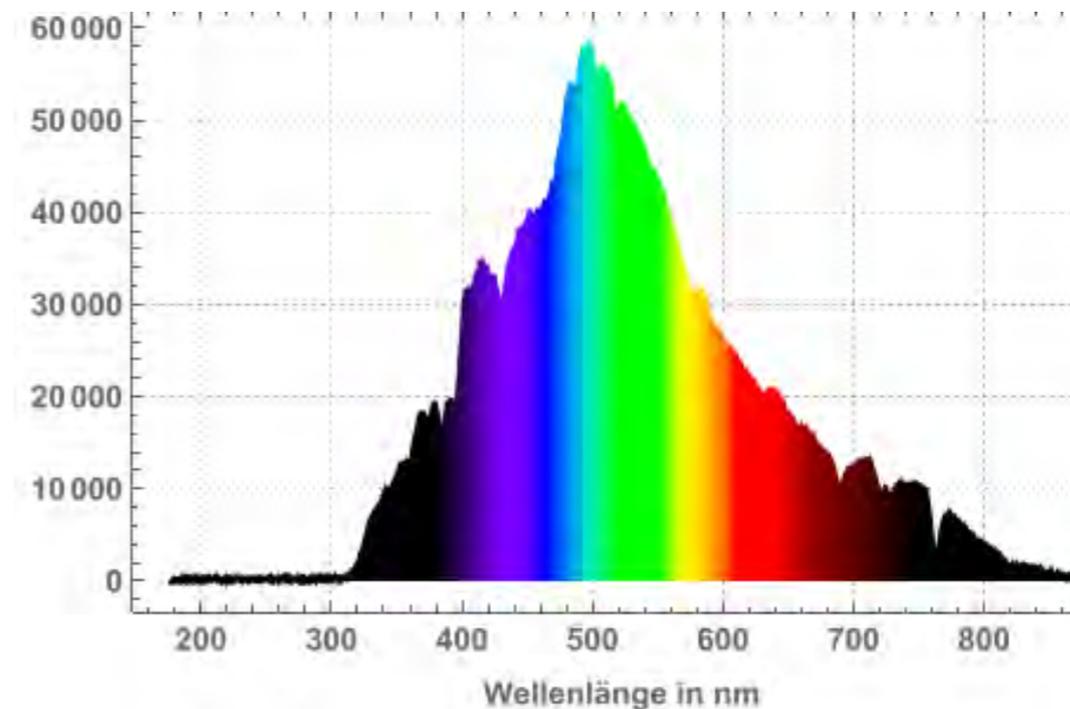
Grundlagen

Die Wellenlänge einer Lichtwelle, bestimmt die Farbe des Lichtes. Weil Licht meistens aus verschiedenen Farben zusammengesetzt ist, muss man, um die genauen Wellenlängen zu erkennen, das Spektrum des Lichtes bestimmen, d.h. man ermittelt für jede Wellenlänge mit welcher Intensität sie vertreten ist. Unten sind zwei solcher Spektren abgebildet. Eines gehört zu einem Laser, der wirklich nur eine Wellenlänge emittiert, das andere ist das Sonnenspektrum.

Weil jeder Stoff, wenn er zum Leuchten angeregt wird, ein charakteristisches Spektrum aussendet, kann man so die Bestandteile unbekannter Substanzen oder weit entfernter Objekte wie z.B. von Sternen bestimmen.



roter Laser



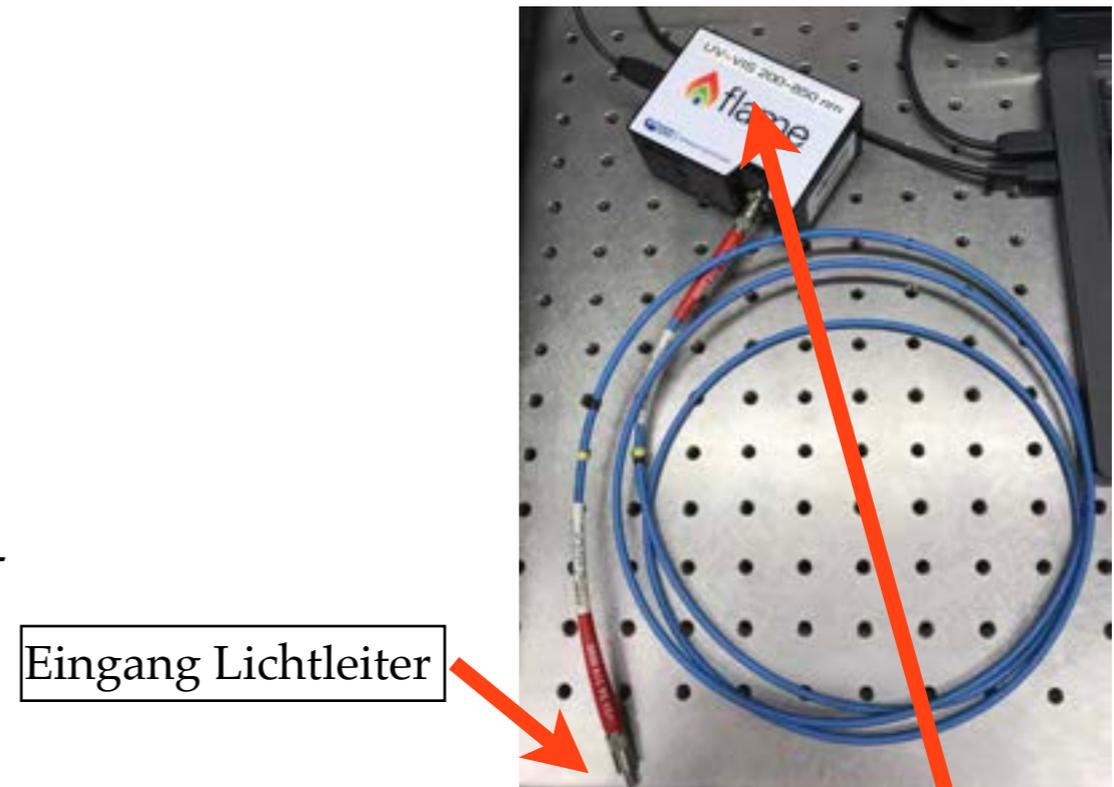
Sonnenspektrum

Aufbau

Achtung: Den Lichtleiter nicht knicken!!!

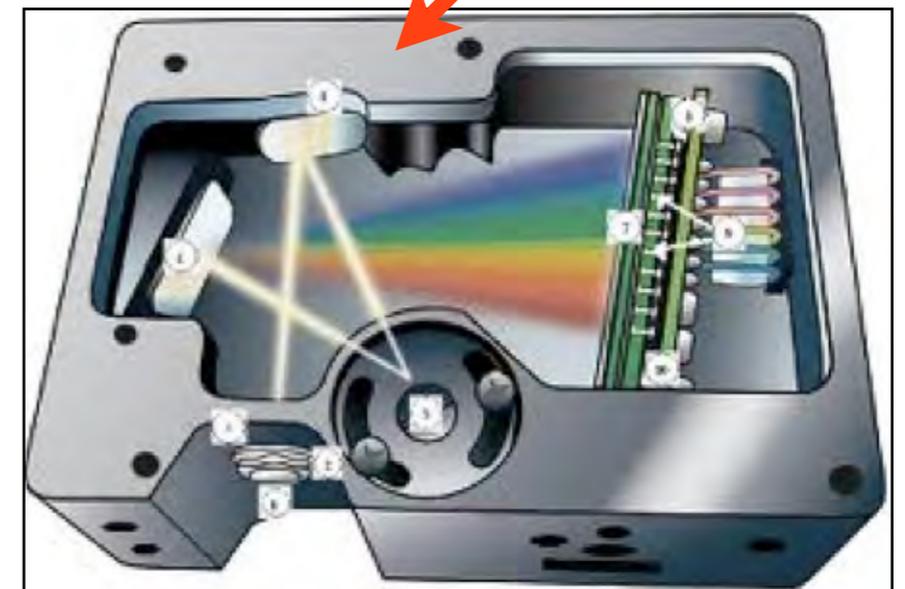
In den Eingang eines Ocean Optics Spektrometers ist ein blauer / metallischer Lichtleiter (=Glasfaser) geschraubt. Das Spektrometer ist mit dem Laptop verbunden. Das Programm OceanView sollte laufen, sonst starte es (Quick View). Leuchte mit einer Lichtquelle vorne in den Lichtleiter (=Glasfaser) hinein, dann siehst du das zugehörige Spektrum auf dem Bildschirm.

Auf dem Bild rechts siehst du, wie das **Spektrometer** von innen aufgebaut ist. Es spaltet Licht wie ein Prisma in alle seine Wellenlängen auf und zeigt das Ergebnis auf dem Bildschirm an.



Eingang Lichtleiter

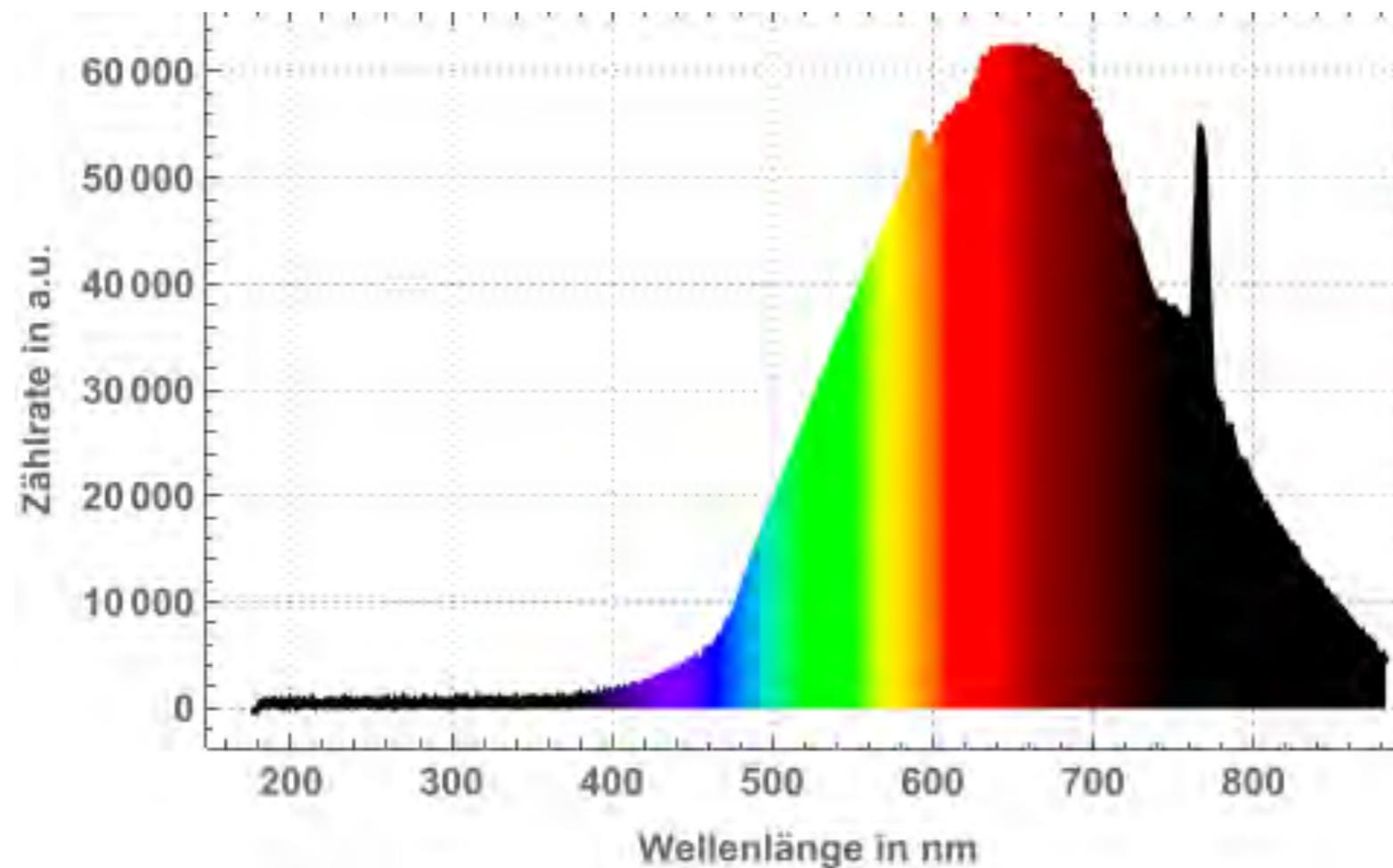
Spektrometer



Aufgabe

1. Ordne diese Spektren den Lichtquellen in der Schachtel zu!

[Lösungen](#)



Untertitel

2. Welcher Stoff ist in der Deckenlampe enthalten?

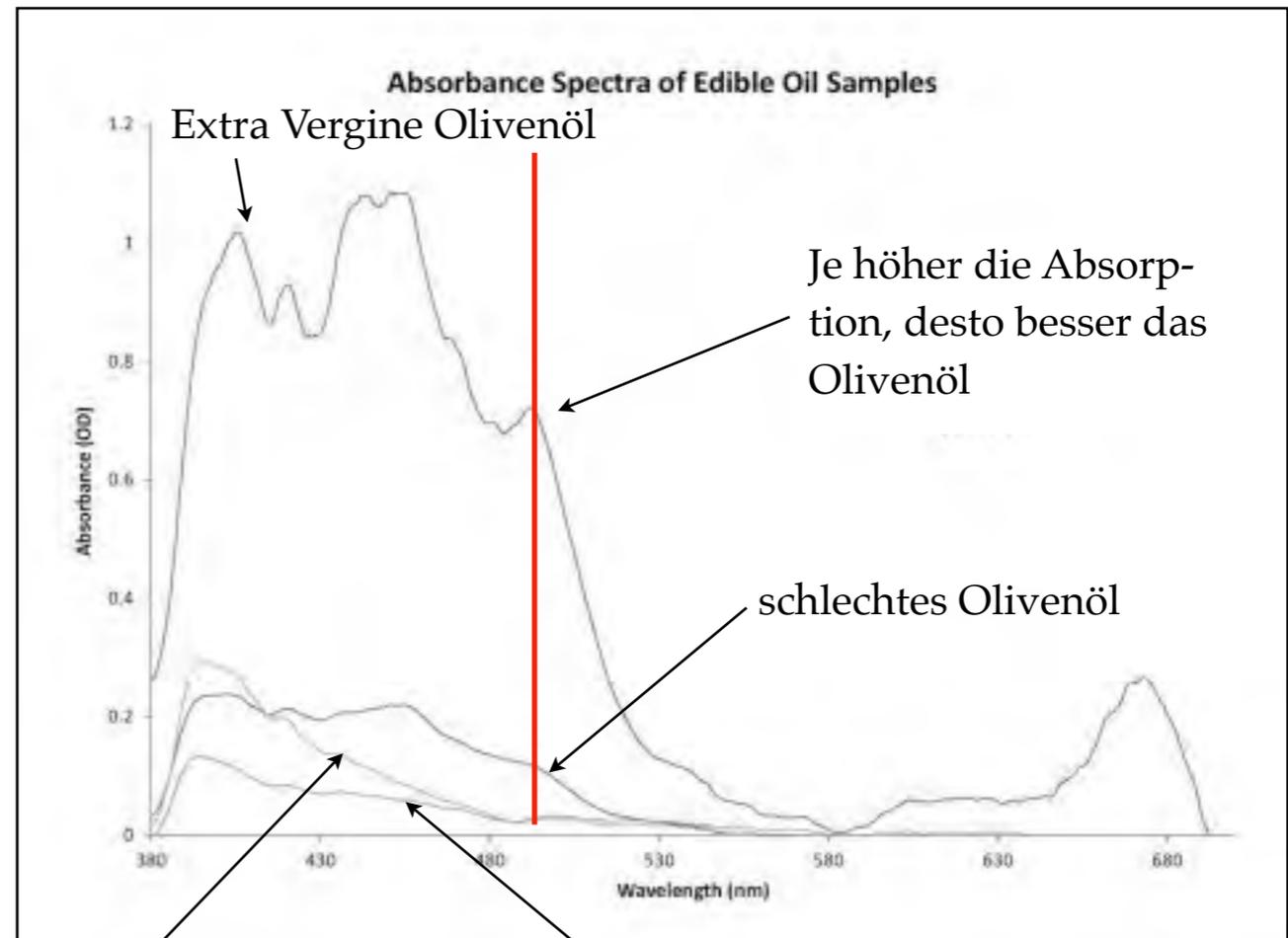
Ziehe dazu mit dem Whiteboard-Marker und dem Lineal Striche an den Stellen auf der Spektraltafel, an denen du Maxima im Spektrum siehst - aber nicht mehr im roten Bereich. Vergleiche das Linienspektrum der Deckenlampe mit dem der anderen Stoffe!

- a) Neon
- b) Quecksilber
- c) Wasserstoff
- d) Xenon

3. Qualitätscheck: Olivenöl

Die Olivenöl-Industrie ist Milliarden schwer und gutes "Extra-Vergine-Öl" teuer. Betrüger versetzen deshalb Olivenöl mit billigeren Ölen, um ihren Profit zu erhöhen. Häufig werden sogar Chlorophyll und Aromen beigemischt. Deshalb ist es von großem Interesse, auf einfache Weise die Qualität von Olivenöl zu bestimmen.

Hier im PhotonLab kannst du die Absorption verschiedener Öle messen. Die Programmeinstellungen findest du auf der nächsten Seite. Vergleiche dann erst einmal deine Spektren mit der Abbildung unten!

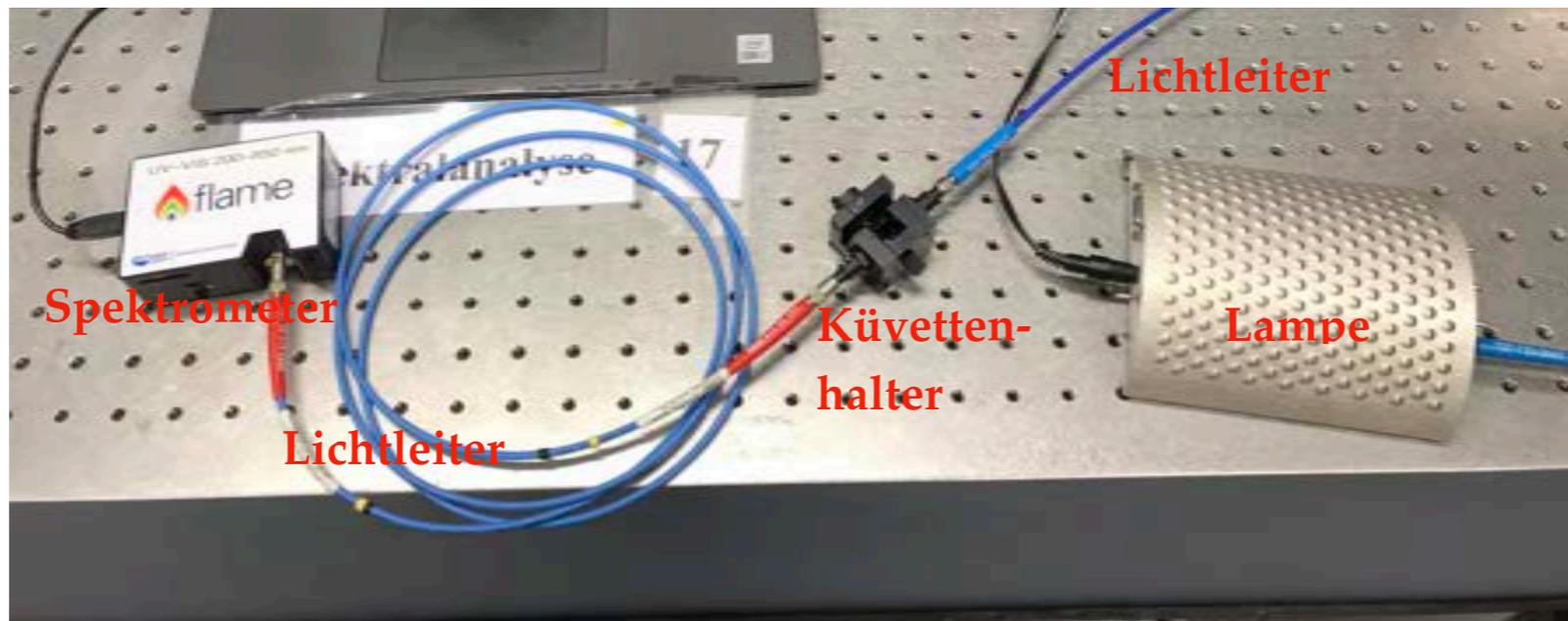


Rapsöl

Sonnenblumenöl

Qualitäts-Check Olivenöl

1. Zum Messen benötigst du zwei Glasfasern/Lichtleiter und die silberne, halbrunde Lampe, die mit dem Küvettenhalter über eine Glasfaser verbunden ist. Schraube den Lichtleiter, der vom Spektrometer kommt, in den dafür vorgesehenen Anschluss am Küvettenhalter. Vom Küvettenhalter führt ein Lichtleiter zu Lampe.



2. Klicke in den „Rechtsklick“ auf „Quick View“ und



Programm „Ocean View“



Links: „Quick View“

Qualitäts-Check: Olivenöl

3. Absorbance auswählen „Absorbance only“ -> next
4. Integrationszeit auf 3 ms stellen -> next
5. Deuterium und Halogen Lampe anmachen, Shutter öffnen (On)
6. Dann auf „Glühlampe“ klicken ->next
7. Shutter schließen (Off), dann auf schwarze „Glühlampe“ klicken -> finish
8. Shutter öffnen



Klicke dann auf „Absorbance“



Hier auf „Next“ klicken

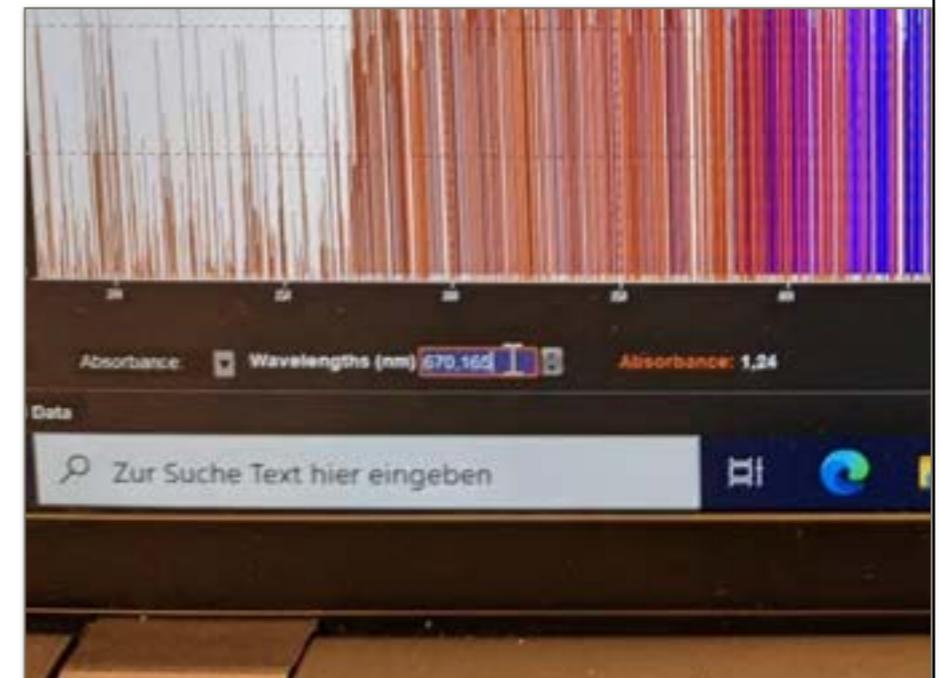
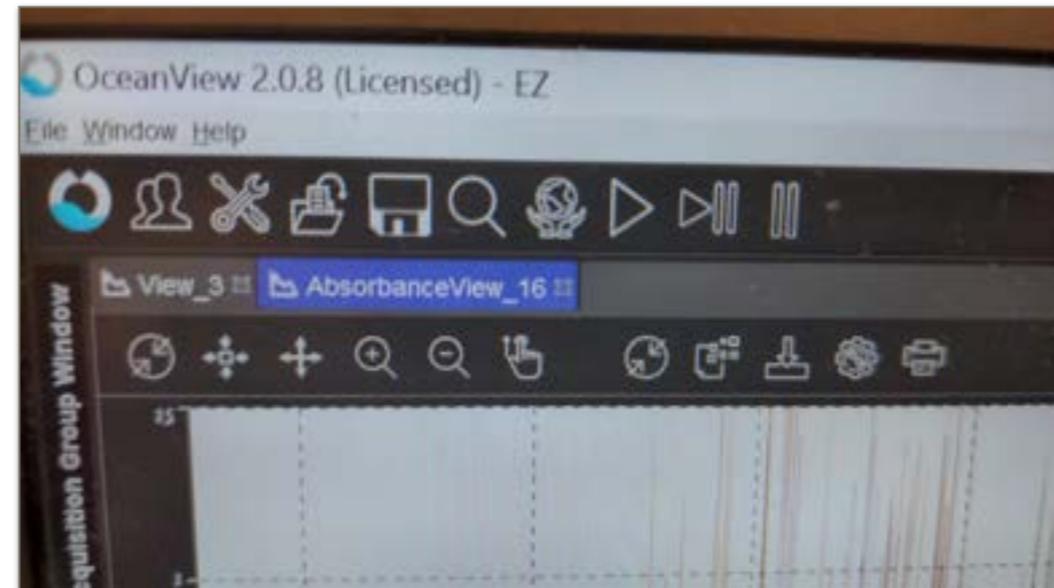
Qualitäts-Check: Olivenöl

9. Am Reiter oben „Absorbance view“ auswählen. Das Spektrum sollte um Null rumzappeln, da noch keine Probe im Probenhalter ist.

10. Stelle die Probe in die Halterung. Achtung: Die **klare** Seite der Küvette sollte durchleuchtet werden!

11. Um genauer beobachten zu können, drücke auf die Lupe, um **heranzuzoomen** und vergrößere auf den Bereich um **670 nm**. Um den genauen Wert abzulesen, klicke unter der x-Achse auf "Wavelength (nm)" und gib 670 (nm) an. So kannst du den exakten Wert der Absorption ablesen!

10. Schreibe dir die Werte der 5 unterschiedlichen Oliven-Öle auf.



Qualitäts-Check: Aufgaben

Welche Küvette ist mit gutem/schlechtem Olivenöl gefüllt?

Je höher die Absorption bei 670 nm, desto besser das Olivenöl. Wähle die Olivenöle aus und ordne sie in der Reihenfolge zunehmender (von schlechtesten-beste) Qualität! Überprüfe die Zahlenfolge!

Für Profis: Erkläre die Intensitätsschwankung der Messwerte (auf dem Bildschirm).

Übrigens: Das schlechteste Olivenöl hat ein Praktikant von einem Bauern auf Kreta geschenkt bekommen. Aldi-Öl ist relativ gut.

Welche Zahlenreihe ist richtig?

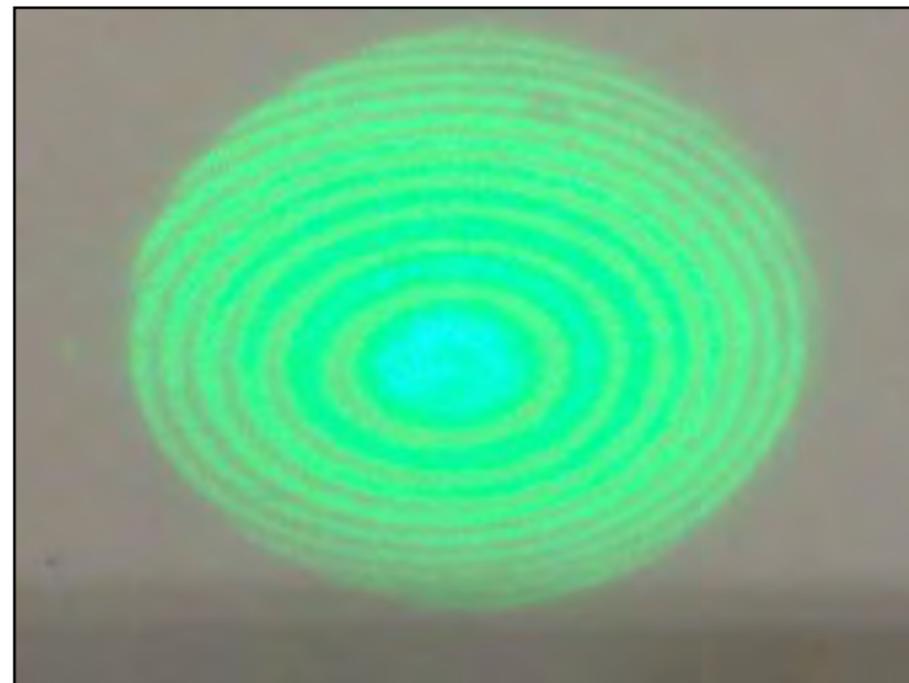
- a. 4-3-1-5-2
- b. 5-1-2-3-4
- c. 1-2-3-4-5

Antwort: a

VERSUCH 18: MICHELSON INTERFEROMETER

Michelson Interferometer

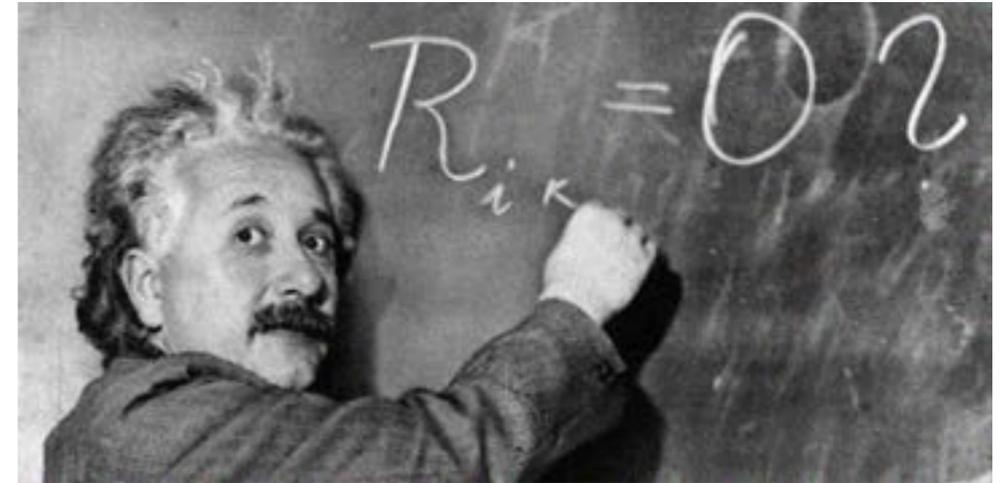
Interferenz mit Licht - wie geht das?



Wanted: Gravitationswellen

Die Entdeckung der Gravitationswellen im Jahre 2016 sorgte eine ganze Zeit lang für Schlagzeilen. Doch wie wurden diese Wellen überhaupt gemessen und was sind Gravitationswellen?

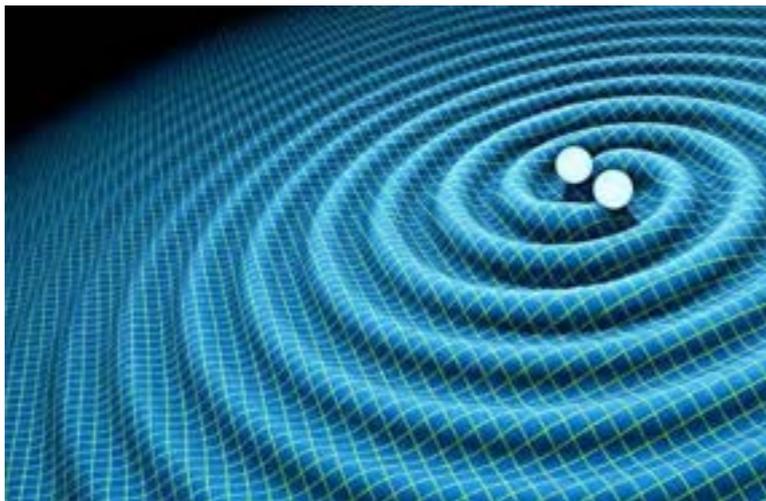
Einsteins Relativitätstheorie wurde im Jahre 1915 veröffentlicht. Über 100 Jahre später wird eine der Folgen dieser Theorie, die Gravitationswellen, erstmals bestätigt.



Tipp: Diese Infos und mehr findet ihr auch in dem Video über Gravitationswellen auf dem iPad!

Was sind Gravitationswellen?

Gravitationswellen werden von Massen erzeugt, die eine Beschleunigung erfahren. Je größer die Massen desto "größer" die Welle (also desto höher ist die Amplitude).



Warum dauerte es ein Jahrhundert bis man diese Wellen nachweisen konnte? Die Signale, die wir bisher mit den Detektoren messen konnten, sind wesentlich größer als die Signale, die von Gravitationswellen ausgelöst werden. Die Detektoren waren bisher nicht genau genug .

Nachweis von Gravitationswellen

Gravitationswellen verursachen Stauchungen und Streckungen von Längen im Raum durch ihre Ausbreitung.

Diese Längenänderungen können gemessen werden.

Da die Differenzen jedoch sehr gering sind

10^{-18}m also 0,000000000000000001m

müssen die Wissenschaftler sehr genaue

Detektoren zu verwenden.

Ein Detektor, mit dem sich derart kleine Längenunterschiede messen lassen, ist das Michelson Interferometer, mit dem wir uns im PhotonLab beschäftigen.

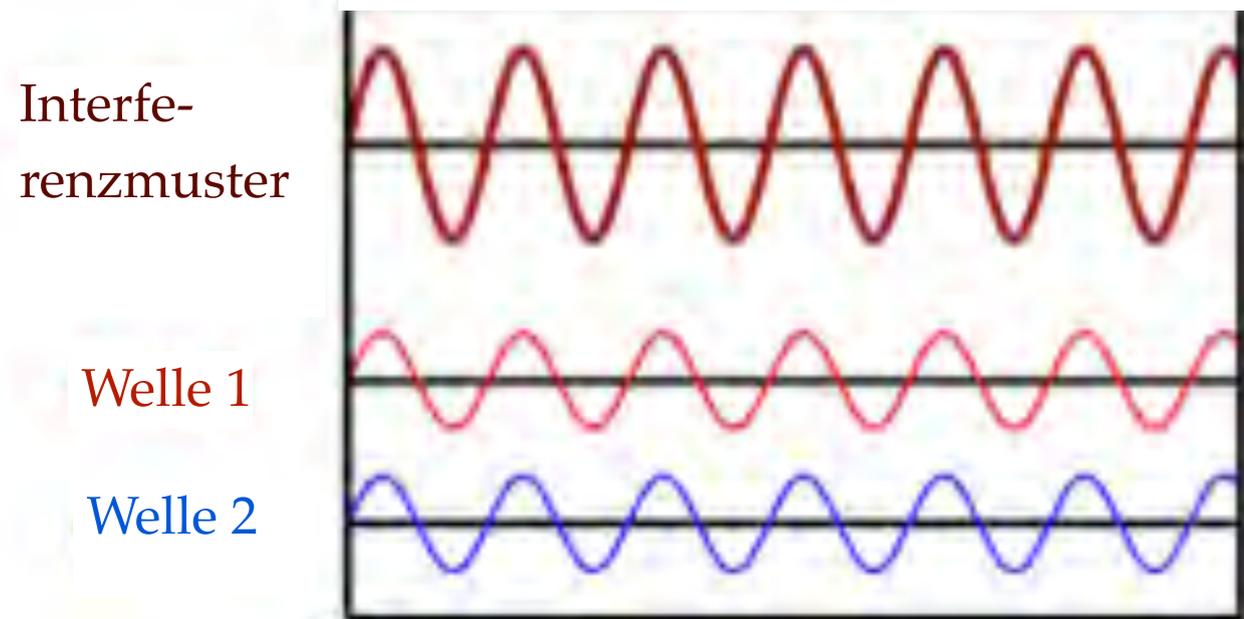


Gravitationswellen können zum Beispiel bei der Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern entstehen.

Was ist Interferenz?

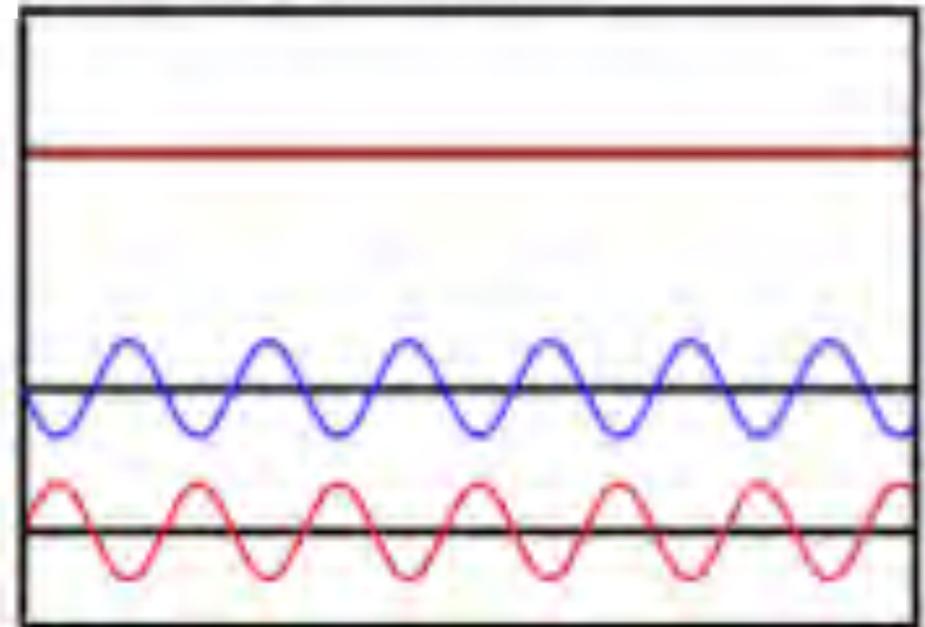
Neben dem Michelson Interferometer gibt es noch viele andere optische Interferometer. Generell handelt es sich bei einem Interferometer um einen Versuch, in dem Wellen überlagert werden. Sie [interferieren](#).

konstruktive [Interferenz](#)



Wenn sich zwei Wellen überlagern und dabei ein Maximum auf ein Maximum trifft, entsteht ein doppelt so hohes Maximum (konstruktive Interferenz)

destruktive [Interferenz](#)

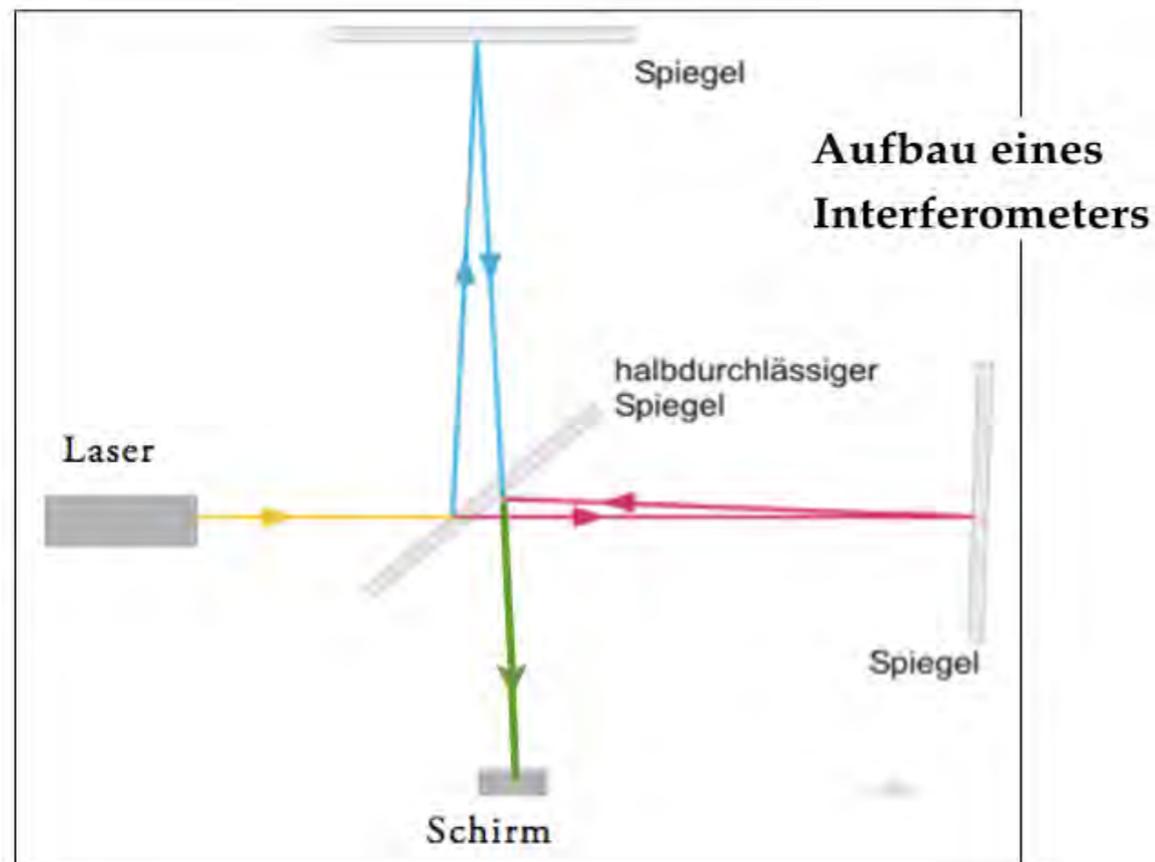


Trifft dagegen immer ein Maximum auf ein Minimum, löschen sich die Lichtwellen gegenseitig aus (destruktive Interferenz)

Das Interferometer

Nun können mit dem Michelson Interferometer nicht nur Gravitationswellen bestimmt werden. Es gibt viele Anwendungszwecke. Einige davon sollen in den folgenden Versuchen genauer betrachtet werden.

Der Versuchsaufbau



Für diesen Versuch benötigt man:

- 2 Spiegel
- 1 halbdurchlässigen Spiegel
- 1 Beobachtungsschirm
- 1 Laser

Der halbdurchlässige Spiegel wird oft auch [Strahlteiler](#) genannt. Er teilt den Laserstrahl in zwei Strahlen auf, indem er 50% des Laserlichts **reflektiert** und die anderen 50% **hindurchlässt**. (Eine genauere Beschreibung findet unter dem Link)

Die beiden Strahlen werden an den Spiegeln reflektiert und treffen beide erneut auf den Strahlteiler. Dort überlagern die beiden Strahlen und treffen auf den Beobachtungsschirm.

Durchführung

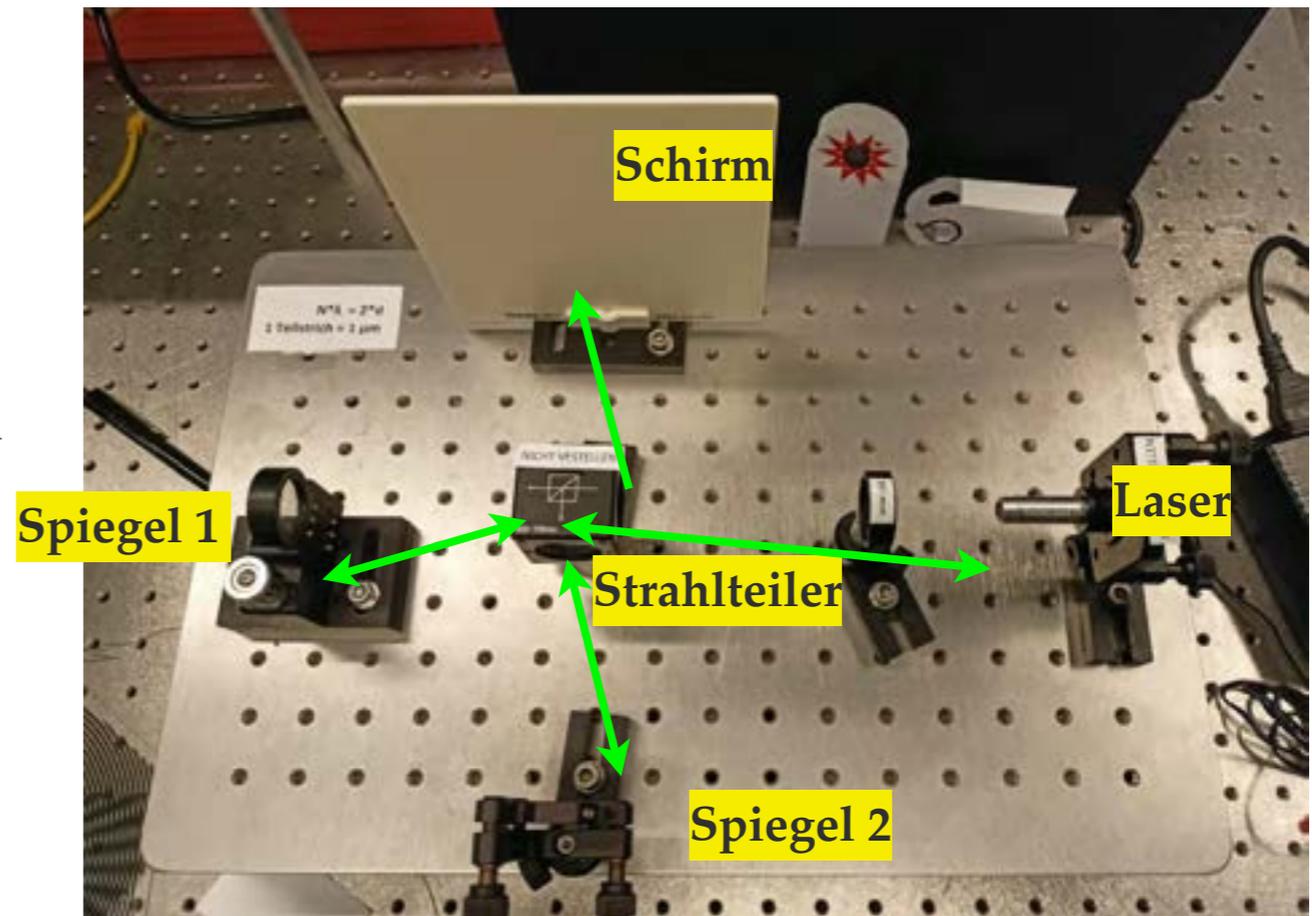
Die erste Herausforderung ist es, das Interferometer richtig zu justieren.

Justieren nennt man den Vorgang bei dem man einzelne Komponenten des Versuchsaufbaus (zum Beispiel die Spiegel) so verstellt, dass man ein gutes Ergebnis erhält.

In der Optik ist das der erste Schritt bei jedem Experiment. Davon hängt ab, wie genau wir später messen können (und ob wir überhaupt etwas messen).

Vor euch seht ihr den dejustierten Versuchsaufbau. Die Spiegel und der Strahlteiler sind zwar richtig positioniert, aber nicht richtig justiert.

Laserschutzbrillen aufsetzen!!

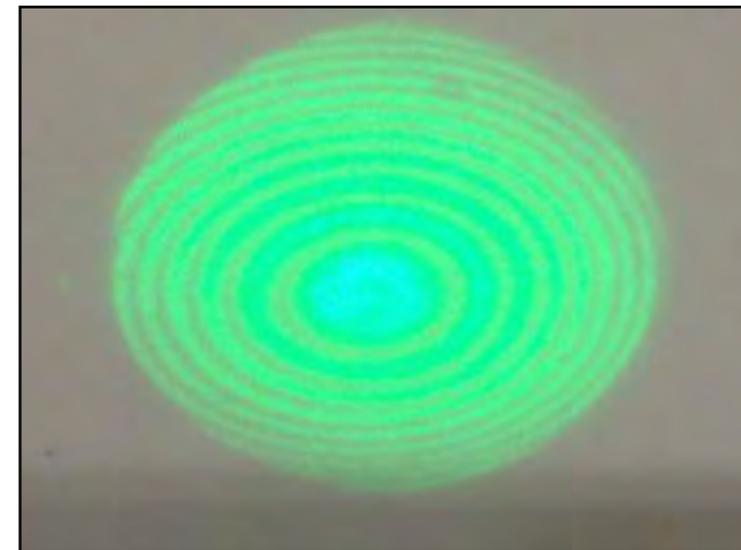


Justieren des Interferometers

Im Folgenden sind einige Tipps aufgelistet, die bei der Justierung helfen:

- Alle Komponenten sollten auf **derselben Höhe** sein
- Mit Hilfe eines Papiers kann der Strahlengang genau nachvollzogen werden
- Der Laserstrahl sollte die Spiegel oder den Strahlteiler möglichst **zentral** treffen (auf keinen Fall sollte zum Beispiel ein Teil des Laserstrahls auf dem Rand eines Spiegels auftreffen)
- Falls nur zwei Reflexe auf dem Schirm erkennbar sind, müssen diese durch Justierung der Spiegel zur Deckung gebracht werden.

Ob der Versuch erfolgreich justiert wurde, lässt sich an dem Muster auf dem Beobachtungsschirm erkennen.



Wellenlänge bestimmen

In folgendem Versuch wird die Wellenlänge des Lasers bestimmt. Ist das Licht im sichtbaren Bereich so befindet sich seine Wellenlänge im Bereich zwischen 400 nm und 700 nm ($\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$). Die Wellenlänge gibt uns die Länge an, ab der sich die Lichtwelle des Lasers wiederholt (also die Länge der Periode).

Wie unser [Interferenzmuster](#) aussieht hängt unter anderem von der Wellenlänge des Lichts ab. Im Allgemeinen gilt je näher die Interferenzmaxima (die hellen Streifen) des Musters bei gleichem Aufbau liegen, desto kleiner ist die Wellenlänge.

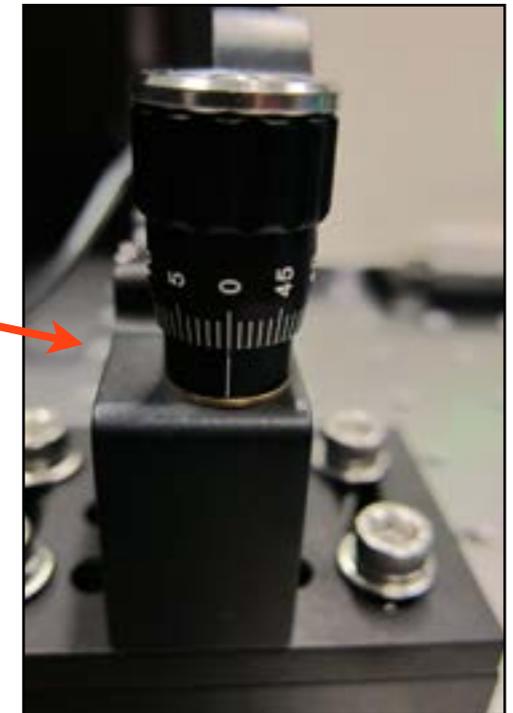


Bestimmung der Laserwellenlänge λ

Merkt euch genau die Einstellung der Mikrometerschraube. Verstellt nun langsam die Mikrometerschraube am Verschiebetisch und zählt die dabei verschwindenden dunklen Ringe. Jeder verschwindende dunkle Streifen entspricht einer Weglängenänderung im Interferometerarm von genau einer Wellenlänge.

1 Teilstrich auf dem drehbaren Teil der Mikrometerschraube entspricht einer Verschiebestrecke von

$$d = 1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$$



Notiert euch die Anzahl der durchlaufenen Wellenlängen N und die Verschiebestrecke des Spiegels d .

Berechnet dann mit folgender Formel die Wellenlänge des Lasers:

$$N \lambda = 2 \cdot d \text{ [nm]}$$

**Achtung: Das Licht legt die Verschiebestrecke zweimal zurück:
auf dem Hin- und auf dem Rückweg!!**

$$\lambda = \frac{2d[\text{nm}]}{N}$$

Quiz

Wie groß ist die Wellenlänge λ des Lasers?

- a) 532 Nanometer
- b) 632 Nanometer
- c) 532 Mikrometer
- d) 632 Mikrometer

Antwort a) ist richtig.

Gravitationswellen erkennen

Um Gravitationswellen zu bestimmen, braucht es Interferometerarme, die mehrere Kilometer lang sind.

Das Interferometer muss so groß sein, um derart kleine Signale messen zu können.

Unser Interferometer im Versuch ist leider zu ungenau.

Trotzdem können wir die Gravitationswellen simulieren:



Durch leichter Erschütterungen des Versuchsaufbaus (zum Beispiel durch Klopfen auf den Versuchstisch) können wir die Wellen simulieren (und natürlich ist dieses Signal wesentlich stärker).

Was kannst du beobachten?

Auswertung

Für die Teilnehmer des **Quantenphysikkurses**:

Welches Muster konntet ihr nach Teilversuch 1 (Justierung des Interferometers) auf dem Schirm erkennen? Fertigt eine Skizze an.

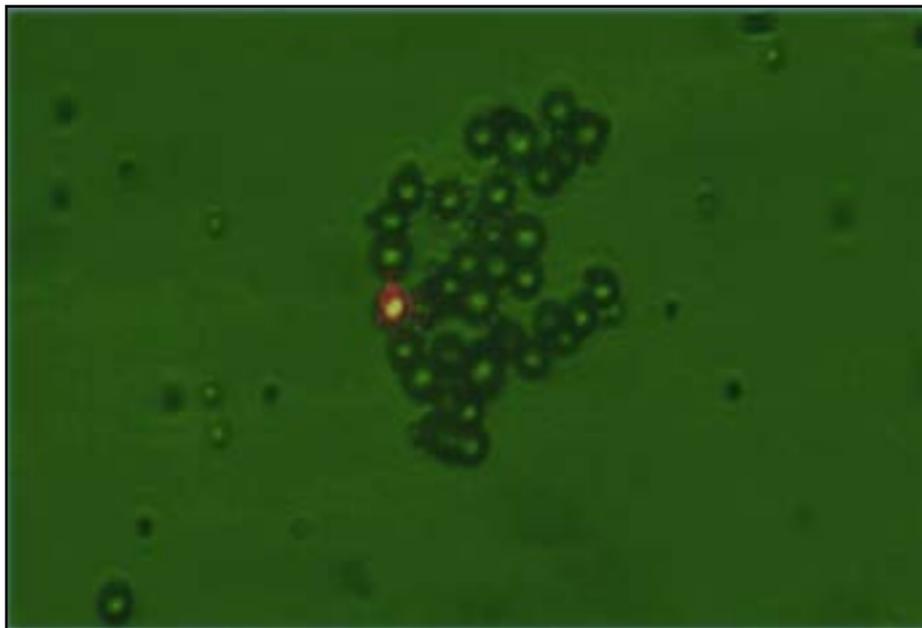
Erläutert die Entstehung dieses Musters. Beschreibt den Zusammenhang zum Wellencharakter von Licht.

Beschreibt, wie mit Hilfe des Michelson-Interferometers die Wellenlänge des Lasers bestimmt werden kann.

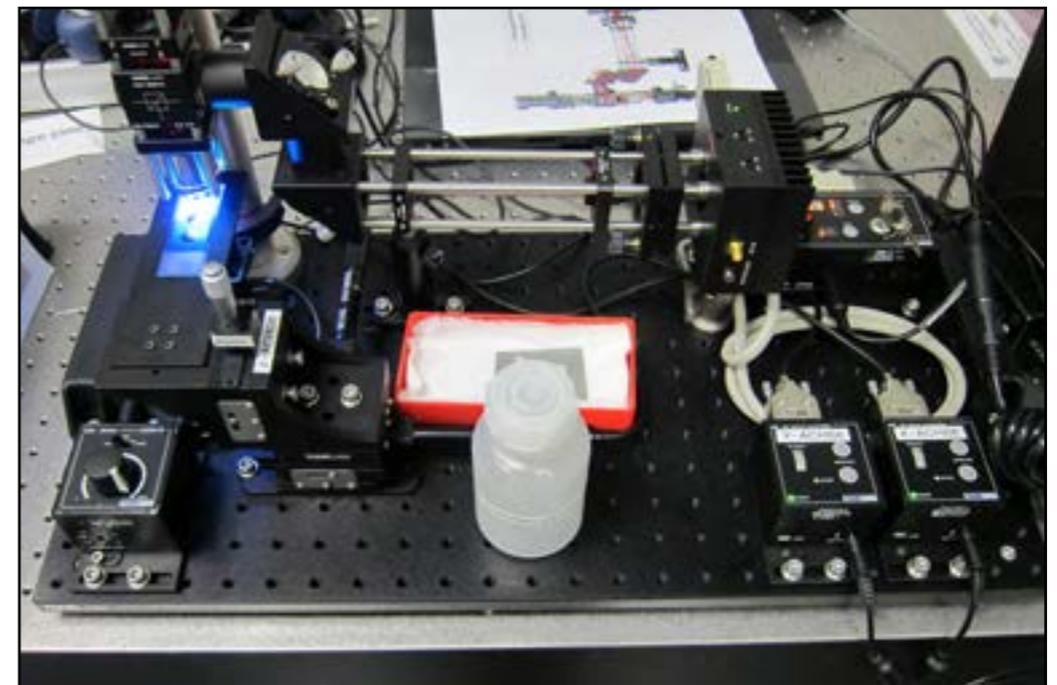
VERSUCH 19: OPTISCHE PINZETTE

Optische Pinzette

Wie kann man einzelne Zellen festhalten und präzise herumschieben?



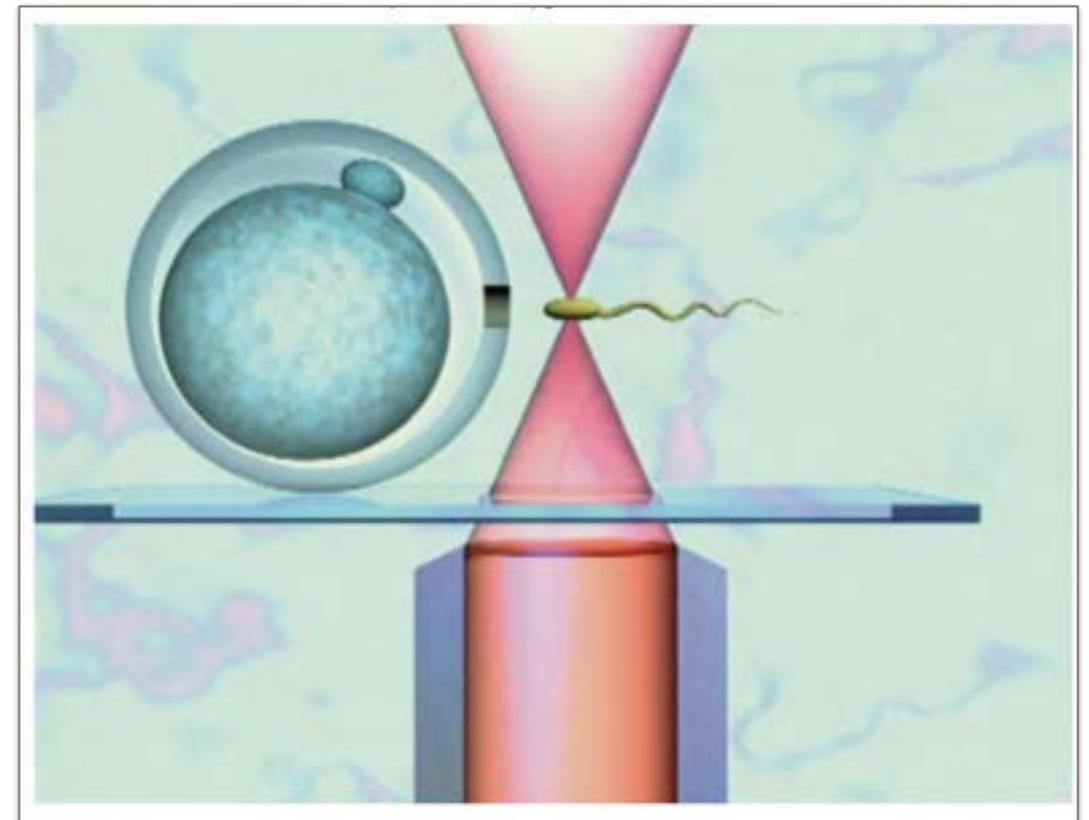
Möchte man wenige μm -große Kugeln herumschieben, ist jede mechanische Pinzette zu groß. Aber man kann hier die Impulsübertragung von Photonen nutzen, die gerade stark genug ist, um diese Kugeln festzuhalten.



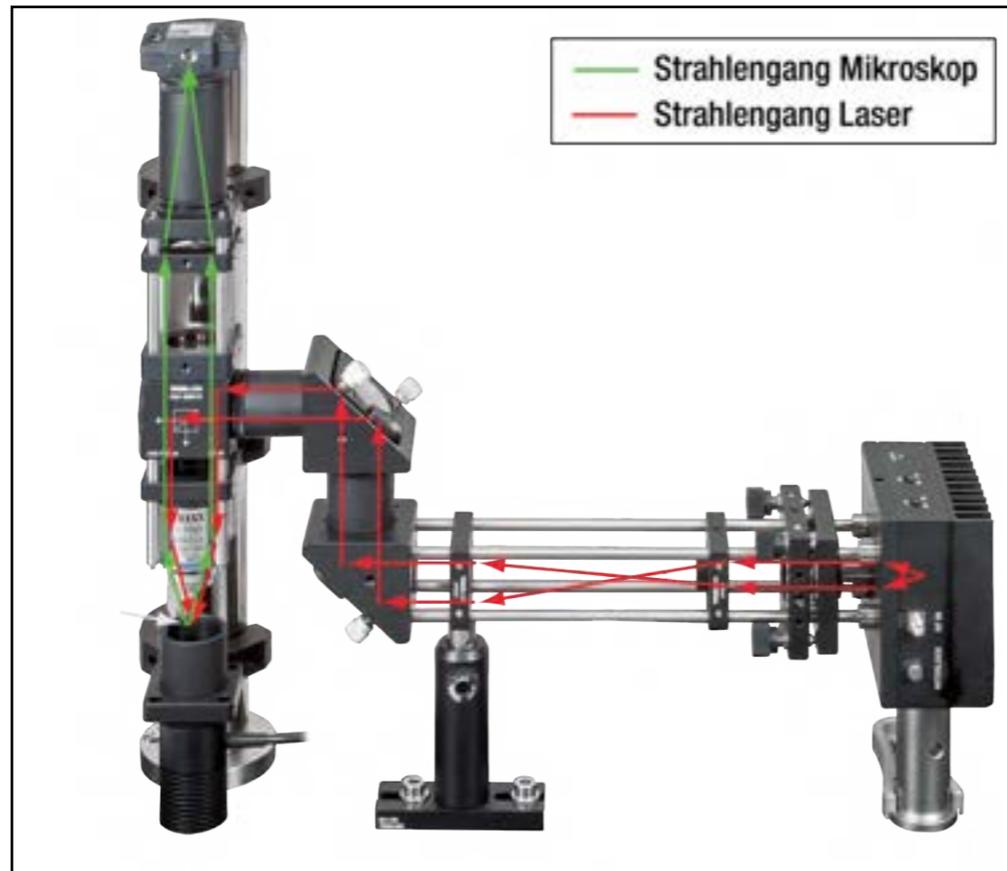
Übrigens: Für die Erfindung der optischen Pinzette gab es den Nobelpreis 2018 für Arthur Ashkin!

Künstliche Befruchtung

Die Funktionsweise der optische Pinzette erlaubt es, sehr kleine Körper (in diesem Fall ein Spermium) mittels eines Laserstrahls einzufangen und zu verschieben. Bei der künstlichen Befruchtung wird der Eizelle zunächst ein kleiner Schnitt mit dem Laser zugefügt. Das Spermium wird mit dem Laserstrahl eingefangen und zu dem Schnitt in der Zellenwand bewegt.



Versuchsaufbau



Die optische Pinzette setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen: einem Mikroskop und einem Laser. Die Strahlenführung des Mikroskops ist im nebenstehenden Bild grün markiert, die des Lasers rot. Der Laser befindet sich in einem Käfig und ist unbeweglich. Um Teilchen einzufangen wird also die Probe bewegt und nicht der Fokus des Lasers. Der Laser ist auf die Probe fokussiert.

In unserem Experiment werden wir μm -große Plexiglaskugeln festhalten und verschieben.

Grundlagen

Wie können wir mit Licht Teilchen festhalten?

Durch den Laserfokus wirkt eine Kraft auf die Teilchen der Probe (in unserem Fall die Plexiglaskugeln).

Die Kraft ist attraktiv (anziehend) und wird genutzt, um die Teilchen einzufangen, da die Teilchen sich aufgrund dieser Kraft zum Laserfokus hinbewegen.

Sie heißt **Gradientenkraft** und tritt auf, sobald ein Laserstrahl auf Teilchen trifft, deren Brechungsindex n_1 kleiner als der des Mediums n_2 ist.



Was ist der Brechungsindex?

Der Brechungsindex ist eine Materialkonstante.

Jeder Stoff hat seinen eigenen **Brechungsindex**, aus dem man berechnen kann, wie schnell sich Licht einer bestimmten Wellenlänge in diesem Material bewegt und wie stark der Lichtstrahl beim Übergang zwischen zwei Materialien abgelenkt wird.

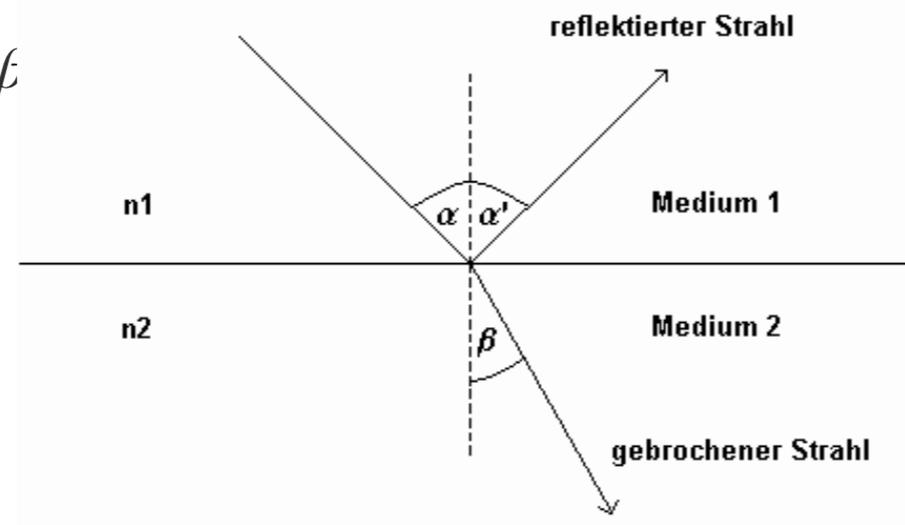
Mehr zum Thema Brechung und Brechungsindex findest du [hier](#) bzw. auf der nächsten Seite.

Lichtbrechung

Läuft ein Lichtstrahl über eine Grenze zwischen zwei Materialien mit verschiedenem Brechungsindex, wird er an der Grenze gebrochen, d.h. er ändert seine Richtung. Geht der Lichtstrahl von einem Medium mit geringem Brechungsindex in eines mit höherem Brechungsindex über, wird der Lichtstrahl zum Lot auf der Grenze der Medien hin gebrochen. Beim Eintritt in ein Medium mit geringem Brechungsindex dagegen vom Lot weg.

Die Stärke der Ablenkung wird durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben. n_1 und n_2 sind dabei die Brechungsindices der beiden Medien; α der Einfallswinkel und β der Ausfallswinkel.

$$n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta)$$



Material mit geringem Brechungsindex

Material mit hohem Brechungsindex

Die Wirkung der Gradientenkraft können wir wie folgt erklären:

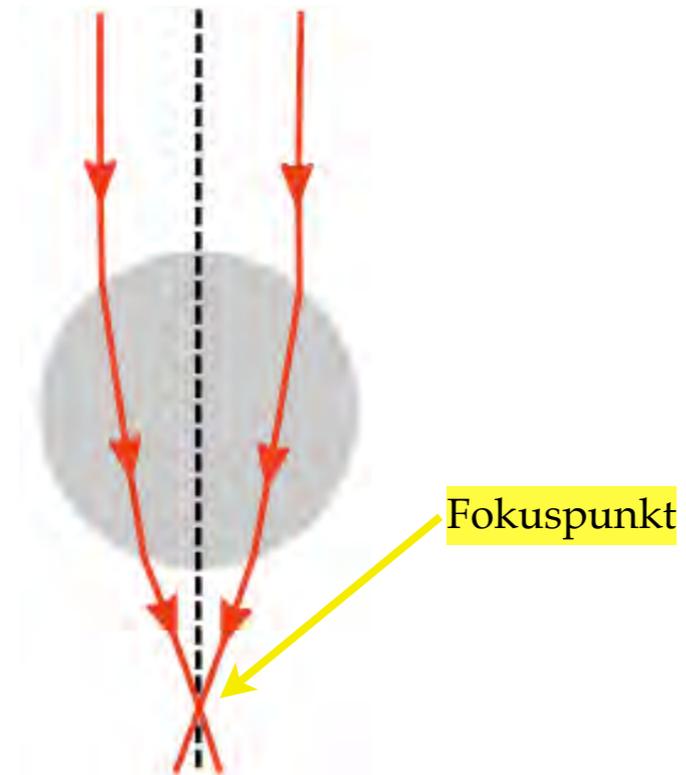
Wird ein Lichtstrahl gebrochen, bewegt er sich danach in einer anderen Richtung. Diese Richtungsänderung der Photonen bedeutet auch eine Impulsänderung.

Diese Impulsänderung überträgt einen Gegenimpuls auf das Medium, das den Lichtstrahl gebrochen hat.

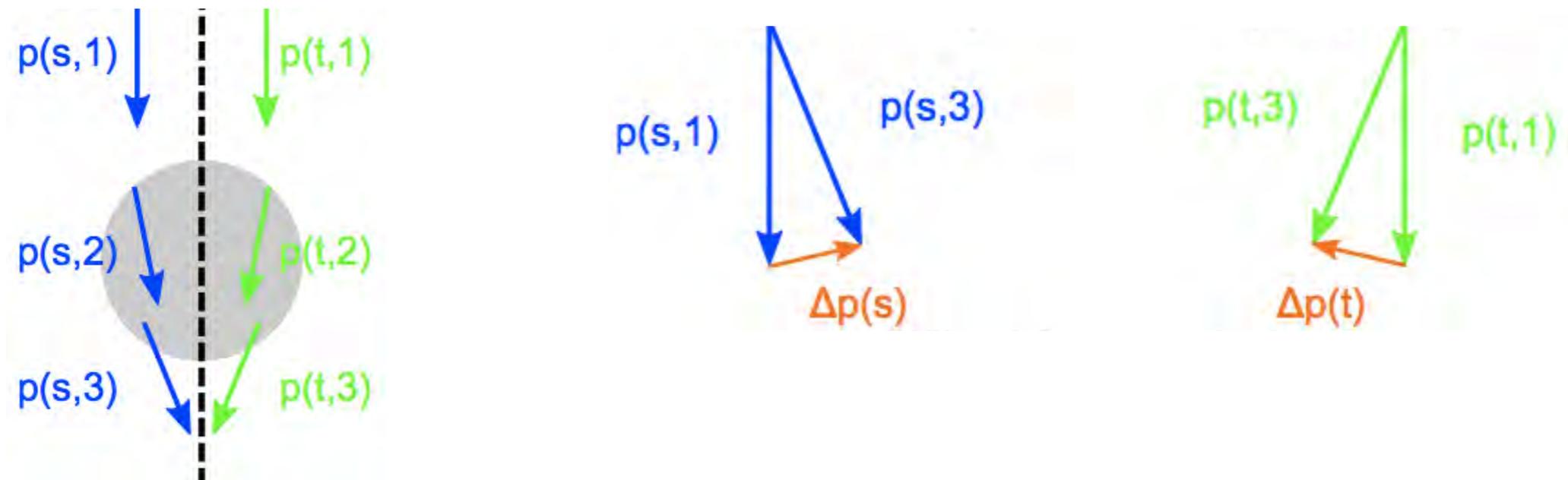
Dieser Impuls ist nur minimal, aber vorhanden und er ist stark genug, Teilchen mit winziger Masse zu bewegen.

Fokussiert man den Laser in einem Punkt, ergibt die Summe aller durch verschiedene Lichtstrahlen übertragenen Impulse stets eine Kraft hin zu diesem Punkt. Das kann man sich folgendermaßen vorstellen:

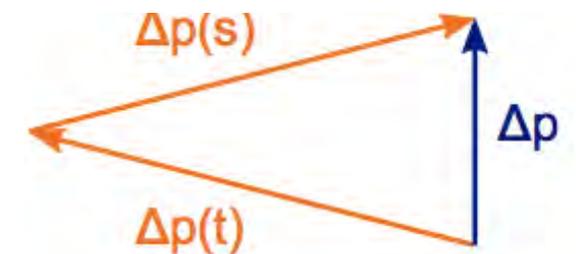
Der Strahlengang durch die Kugel, wenn sie sich oberhalb des Fokuspunktes befindet.



Daraus resultierende Impulse:



Bestimmt man die Differenzimpulse der beiden Lichtstrahlen und addiert diese, erhält man den gesamten Differenzimpuls Δp aller Photonen. Auf die Kugel wirkt ein exakt gegenteiliger Impuls. Dieser geht senkrecht nach unten, also genau auf den Fokuspunkt zu.



Führt man diese Berechnung für andere Positionen der Kugel, zum Beispiel links oder rechts vom Fokuspunkt, durch, erhält man ebenfalls stets einen Impuls auf den Fokuspunkt zu. Die Kugel wird also dort eingefangen und kann durch eine Bewegung dieses Punktes verschoben werden.

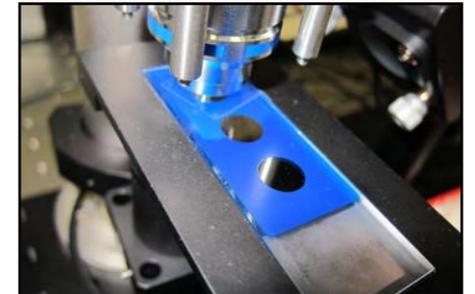
Versuchsdurchführung

1. Kamera starten

Schalte gegebenenfalls den Computer an (nicht passwortgeschützt) und öffne das Programm „uc480Viewer“. Anschließend klickst du auf das Symbol in der linken oberen Ecke (Kamera öffnen). Wenn du nun den LED-Driver, der sich links vor dir befindet, vorsichtig aufdrehst, siehst du auf dem Computer das Livebild.

2. Vorbereitung des Objektträgers *Achtung: Erst komplett lesen!*

Gib mit der Pipette einen winzigen Tropfen aus der Flasche mit der Aufschrift „Styroporkugeln 1 μm in destilliertem Wasser“ in das hinterste Feld mit der Vertiefung des blauen Objektträgers und lege danach vorsichtig das Deckglas darauf. Das Deckglas ist in einer Schachtel und zerbricht leicht! Verletzungsgefahr! Schraube jetzt die Mikrometerschraube ganz nach unten und lege den Objektträger vorsichtig unter die Kamera.



3. Einstellung des Lasers

Im nächsten Schritt bittest du die Laborleitung, den Laser einzuschalten. Sie schaltet den Laser an, indem sie den Schlüsselschalter umdreht und die Taste „Laser on“ betätigt. **Achte darauf, dass sich nichts in dem Strahlengang des Lasers befindet!**

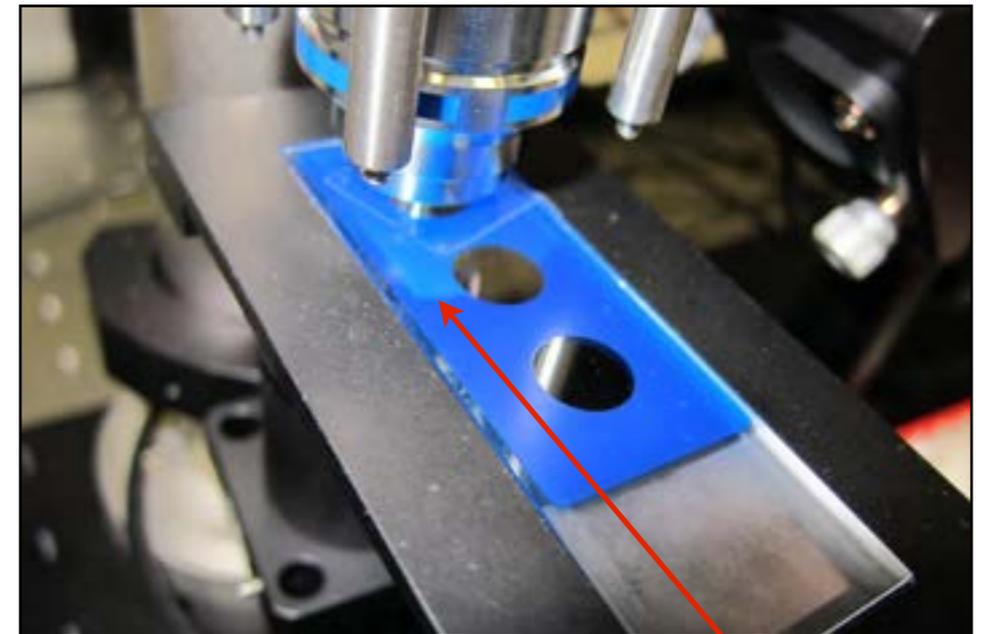
Dreh nun den roten Schalter nach rechts bis ungefähr 98 angezeigt wird. Das bedeutet, dass der Laser eine Leistung von 40 mW hat. Falls sich die Anzeige nur langsam oder nicht ändert, drückt auf „mode“.

Durchführung

Teilversuch 1: Festhalten der Teilchen

Schraub die Mikrometerschraube (an der Mikrometerschraube ist die Bezeichnung „runter“ aufgeklebt) **langsam** nach oben, während du dabei das Bild auf dem Computer beobachtest. Es erscheinen sich bewegende Strukturen und ein roter Reflex des Lasers auf dem Bildschirm. Beim dritten roten Aufblitzen hörst du mit dem Schrauben auf. **Auf keinen Fall weiter drehen!** Mit den Kippschaltern an den Motoren kannst du nun die Probe vorsichtig bewegen und kleine Teilchen einfangen.

Wenn sich ein Kügelchen jetzt nicht mehr bewegt und dabei rot leuchtet, hast du das Kügelchen mithilfe des Lasers eingefangen. (Hinweis: Anfangs bewegen sich die Kugeln eventuell zu schnell, da noch Strömungen vorhanden sind. Diese Strömungen lassen jedoch schnell nach.)



Der Objektträger

Wenn du jetzt das Bild der Kamera betrachtest, siehst du, dass sich alle anderen Teilchen chaotisch bewegen. Diese Bewegung nennt man Brownsche Bewegung.

Durch sehr vorsichtiges und langsames Betätigen der Kippschalter bei den Motoren rechts unten (x-Achse; y-Achse), kannst du den Objektträger verschieben, während du das Teilchen festhältst.

Quiz

Schalte den Laser aus, fahre den Probetisch runter und entnehme vorsichtig den Objektträger aus Glas. Lege das **optische Gitter** auf den Probetisch (Plastikfolie, die in Regenbogenfarben schillert). Schätze durch den Vergleich mit den **Mikrometerkügelchen** (der Abbildungsmaßstab ist ja der Gleiche) ab, wie viele **Linien pro Millimeter** dieses optische Gitter hat.

- a) 100
- b) 1.000
- c) 10.000
- d) 100.000

Richtig: b

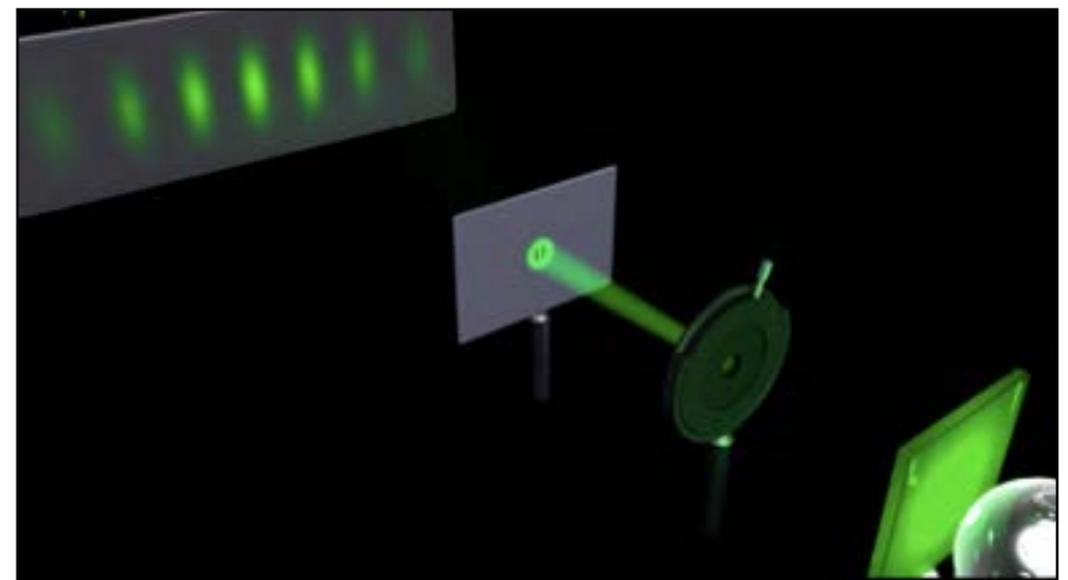
Doppelspaltversuch

Lust auf einen Einblick in die Welt der Quantenphysik?

Der Versuch ist eigentlich sehr einfach, hat es aber in sich!

Er besteht zunächst nur aus einer Lichtquelle (Laser), zwei kleinen Schlitzen (Doppelspalt) und einem Bildschirm (Kamera). Eigentlich funktioniert er mit **Einzelphotonen**; da wir diese aber nicht erzeugen können, nehmen wir einen Laser mit schwacher Intensität her. Wir arbeiten also mit einem **Analogieexperiment!**

Vielleicht hast du den Doppelspalt ja auch schon kennengelernt.



Doppelspalt mit Einzelphotonen

Um den Versuch **quantenmechanisch** zu verstehen, musst du erstmal wissen, wie er „klassisch“ funktioniert.

Stell dir dazu vor, du kickst einen Fußball zwischen zwei Latten hindurch ins Tor. Was erwartest du? Richtig, **zwei Haufen**. Die Bälle des einen sind durch den rechten Spalt geflogen, die Bälle des anderen durch den linken Spalt.



„Normale“ Fußbälle

Im Doppelspaltexperiment sieht man aber hinter dem Spalt **Wellen!**

Das kann man erklären, weil Licht, das wir ja durch den Spalt durchschicken, eine Welle ist. Bestimmt hast du auch schon mal gehört, dass Licht aus **Photonen** besteht. Das stimmt. Experimente wie der Photoeffekt zeigen, dass Licht als Energiebündel mit ganz bestimmten Energien **detektiert** wird, die wir **Energiepakete** nennen. Die einzelnen Einheiten diskreter Energien, die zusammen ein Energiepaket nennen, heißen **Photonen**.

Wenn wir also unser **Doppelspaltexperiment** mit einzelnen Photonen - **Energiepaketen** - durchführen, erwarten wir also das gleiche Ergebnis wie beim Fußball spielen rechts oben. Es sieht aber ganz anders aus! Warum das so ist, lernst du in diesem Kurs.

Licht als Welle

Rechts oben siehst du den Aufbau des **Doppelspaltversuches**. Die Quelle ist bei uns ein Laser. Rechts auf dem Schirm sieht man das Ergebnis eines solchen Experiments.

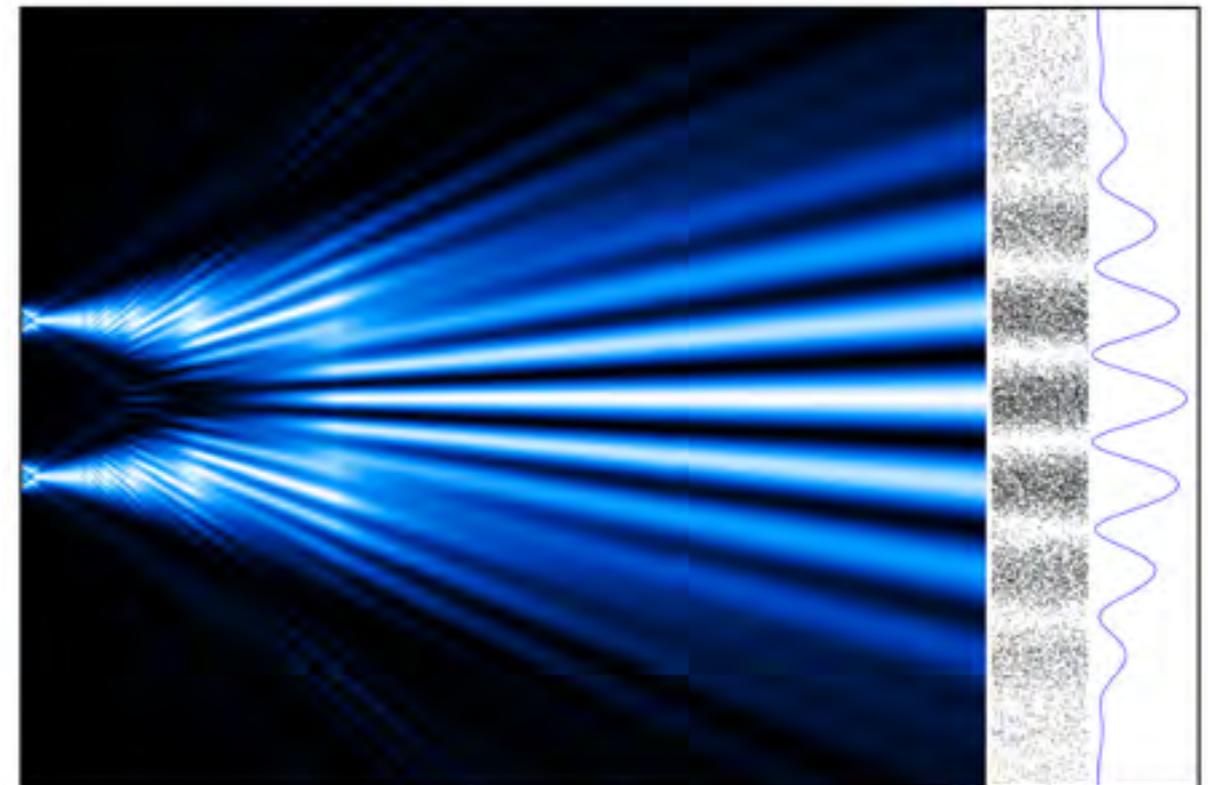
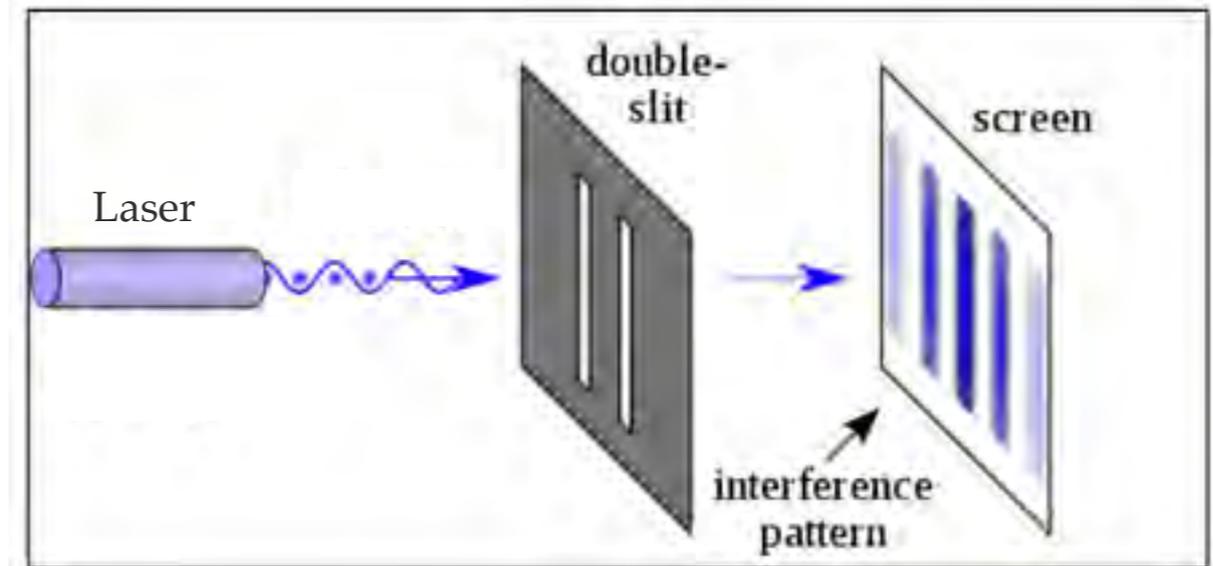
Normalerweise würden wir zwei Streifen erwarten. Aber wir beobachten ein ganzes

hell-/dunkel-Muster, das sogenannte **Interferenzbild**.

Man kann es einfach erklären, wenn man annimmt, Licht ist eine **Welle**. An den dunklen Stellen löschen sich die Lichtwellen aus (destruktive Interferenz), an den hellen verstärken sie sich (konstruktive Interferenz).

Wie das genau funktioniert, findest du [hier](#). Dazu kannst du auch noch den Versuch 2 - Haardicke machen.

Interferenzbild -> Licht ist eine Welle



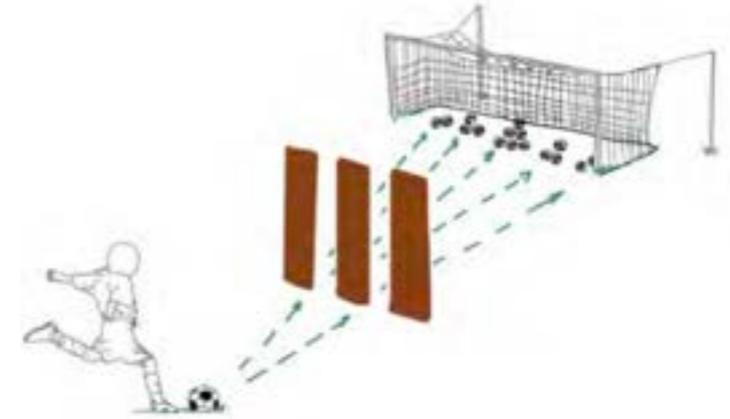
Doppelspalt mit Einzelphotonen

Aber:

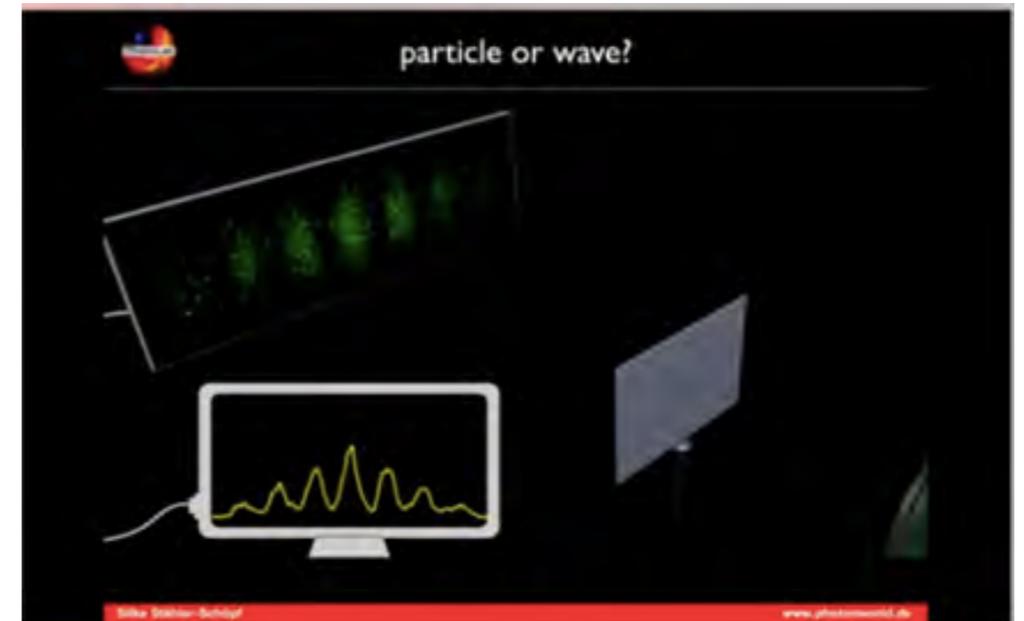
Führt man nun das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenteilchen wie Photonen durch, beobachtet man ein **Interferenzmuster** wie bei Wellen!

Das zeigt uns, dass die Photonen sowohl Welle- als auch Teilcheneigenschaften haben = **Welle-Teilchen-Dualismus**.

Genauer passiert Folgendes: Wenn wir jetzt Einzelphotonen auf den Doppelspalt schießen, so scheinen die Photonen zufällig auf dem Schirm aufzutreffen. Tatsächlich bildet sich jedoch bei einer genügend hohen Anzahl von detektierten Photonen wieder das **Interferenzmuster**! Die Photonen sind Quantenteilchen und treffen mit einer **Wahrscheinlichkeit** auf dem Schirm auf, die dem Interferenzbild entspricht.



„Quanten“ Fußbälle



<https://www.youtube.com/watch?v=N7NYLG-OAPU>

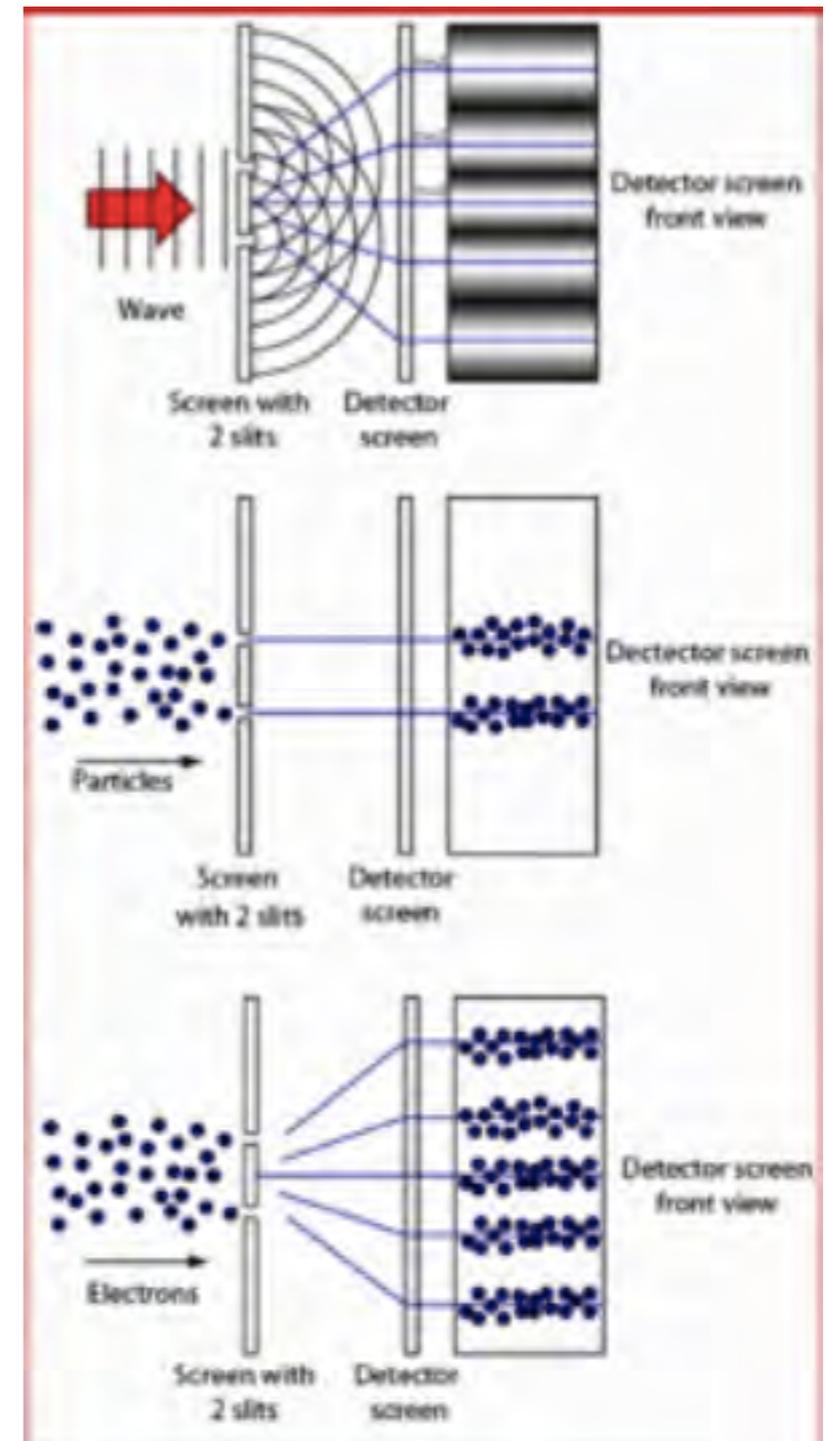
Zusammenfassung

Trifft eine Welle (Wasserwelle, Lichtwelle, Schallwelle...) auf eine Platte mit zwei schmalen Schlitzen, wird ein **Interferenzmuster** nach dem Hindernis beobachtet (**oben**).

Treffen klassische Teilchen, wie Bälle, Äpfel..., auf zwei Schlitze, bilden sie zwei Bereiche, in denen sie auf den Schirm treffen (**Mitte**).

Wenn **Quantenteilchen** (Elektronen, Photonen, Atome...) auf einen Doppelspalt treffen, wird ein Interferenzmuster beobachtet (**unten**).

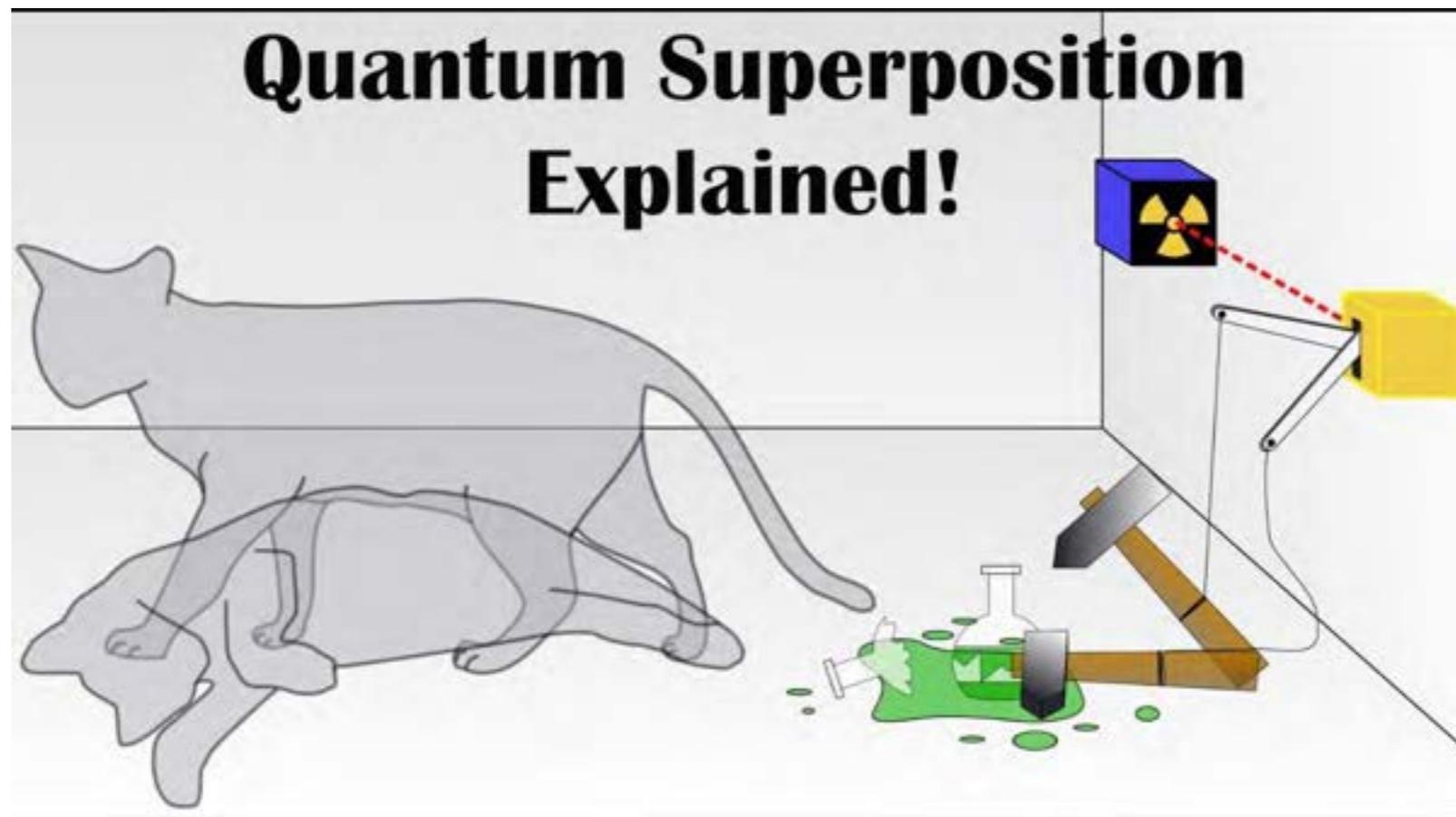
ALSO: Klassische Teilchen und Quantenteilchen verhalten sich **unterschiedlich**!



Doppelspalt mit Einzelphotonen

Quantenteilchen breiten sich wie eine Welle aus, (Beschreibung mit Wellenfront) solange sie nicht gemessen werden. Das Photon befindet sich dann in einem Superpositionszustand.

Diesen Zustand drücken wir mit **Aufenthaltswahrscheinlichkeiten** aus. Wenn wir aber eine **Messung** durchführen, werden sie wie ein Teilchen gemessen (**Kollaps der Wellenfunktion**).



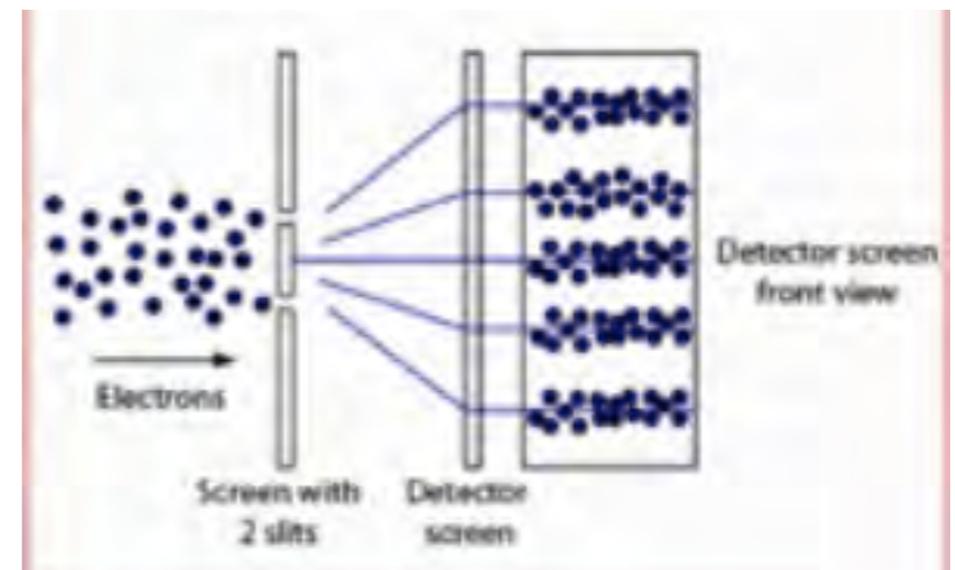
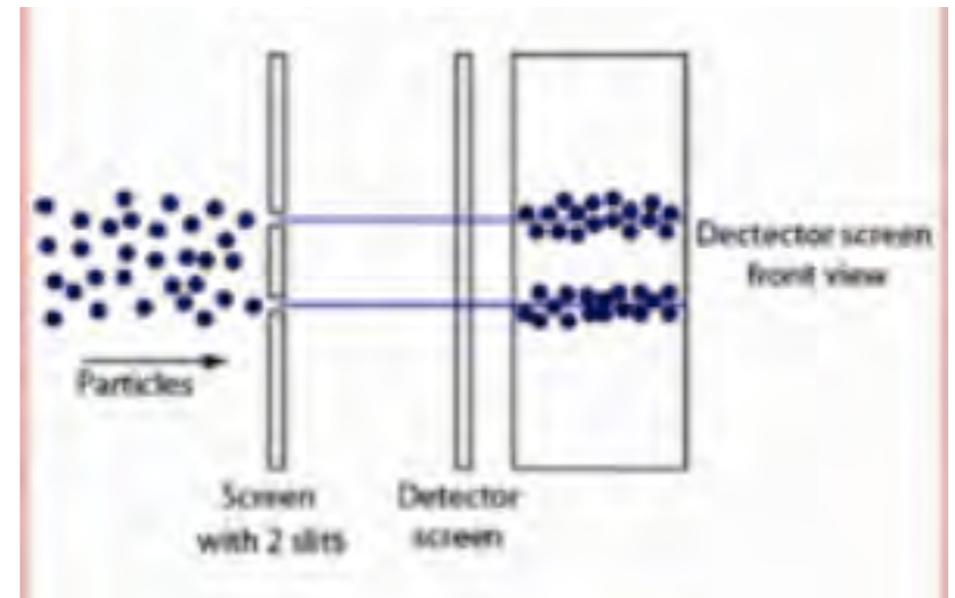
Rätsel um den Weg des Photons

Im nächsten Schritt wollen wir herausfinden, welchen **Weg** das Photon genommen hat. Dazu positionieren wir zwei senkrecht zueinander stehende **Polarisationsfilter** an den beiden Schlitzen. Das Photon muss also **entweder** den rechten oder den linken Weg genommen haben, um dann ganz in einem der Wege zu sein (oberes Bild).

Vor der Messung war das Photon in einem überlagerten Zustand in **Superposition**, unserer Erklärung zufolge. Weil wir wissen, dass es nur einen Weg nehmen konnte, ist die **Superposition** zerstört. Es ist unmöglich vorherzusagen, in **welchem** der beiden Wege sich das Photon befinden wird (unteres Bild).

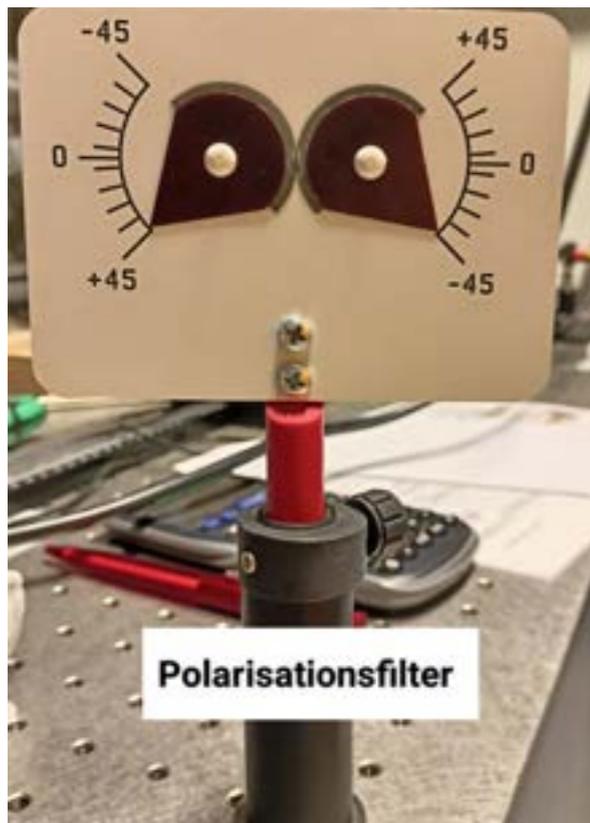
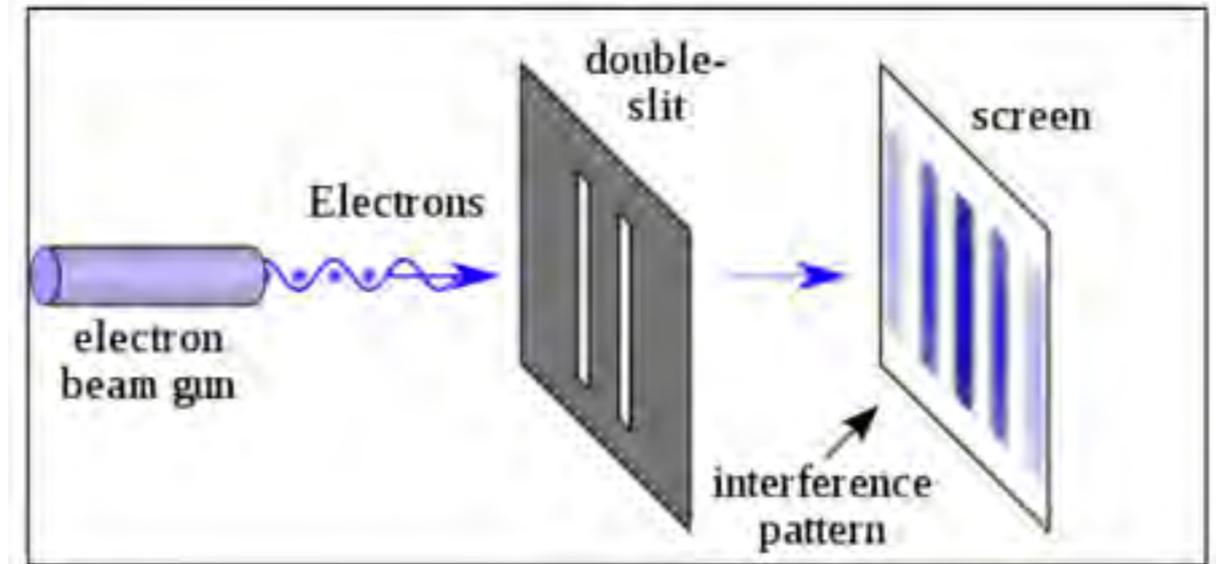
Auf dem Bildschirm kannst du also erkennen, ob du eine Interferenz hast oder nicht!

Wenn du mehr über die **Welcher-Weg-Information** erfahren möchtest, mach den Versuch **Bomb Tester**.



Im Labor

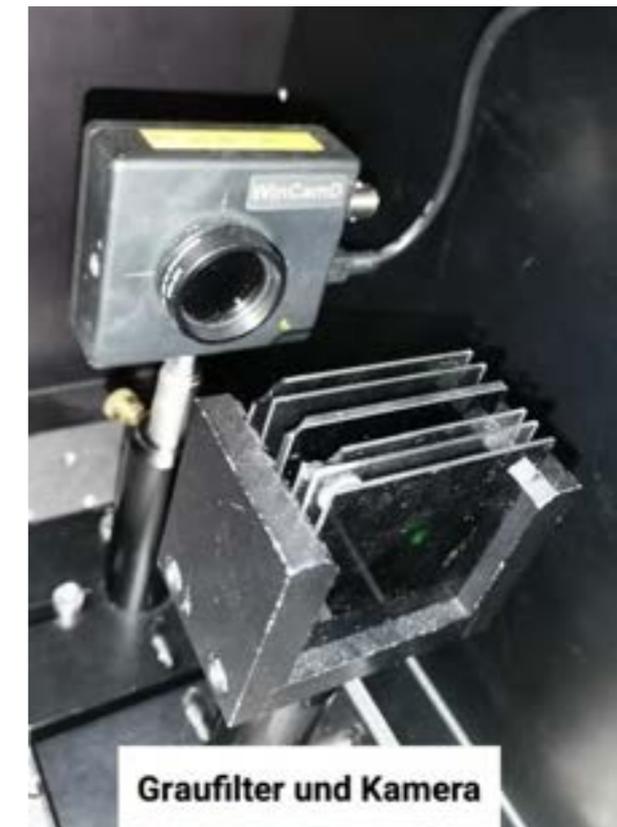
Damit du das folgende Experiment gut verstehst, werden im Folgenden die einzelnen **Komponenten** und der **Aufbau** geschildert.



Polarisationsfilter, um den Einfluss von Polarisation auf das Interferenzmuster zu bestimmen



Laser als Photonenquelle



Graufilter, um die eingestrahlte Laserleistung zu minimieren und so Einzelphotonen zu simulieren.

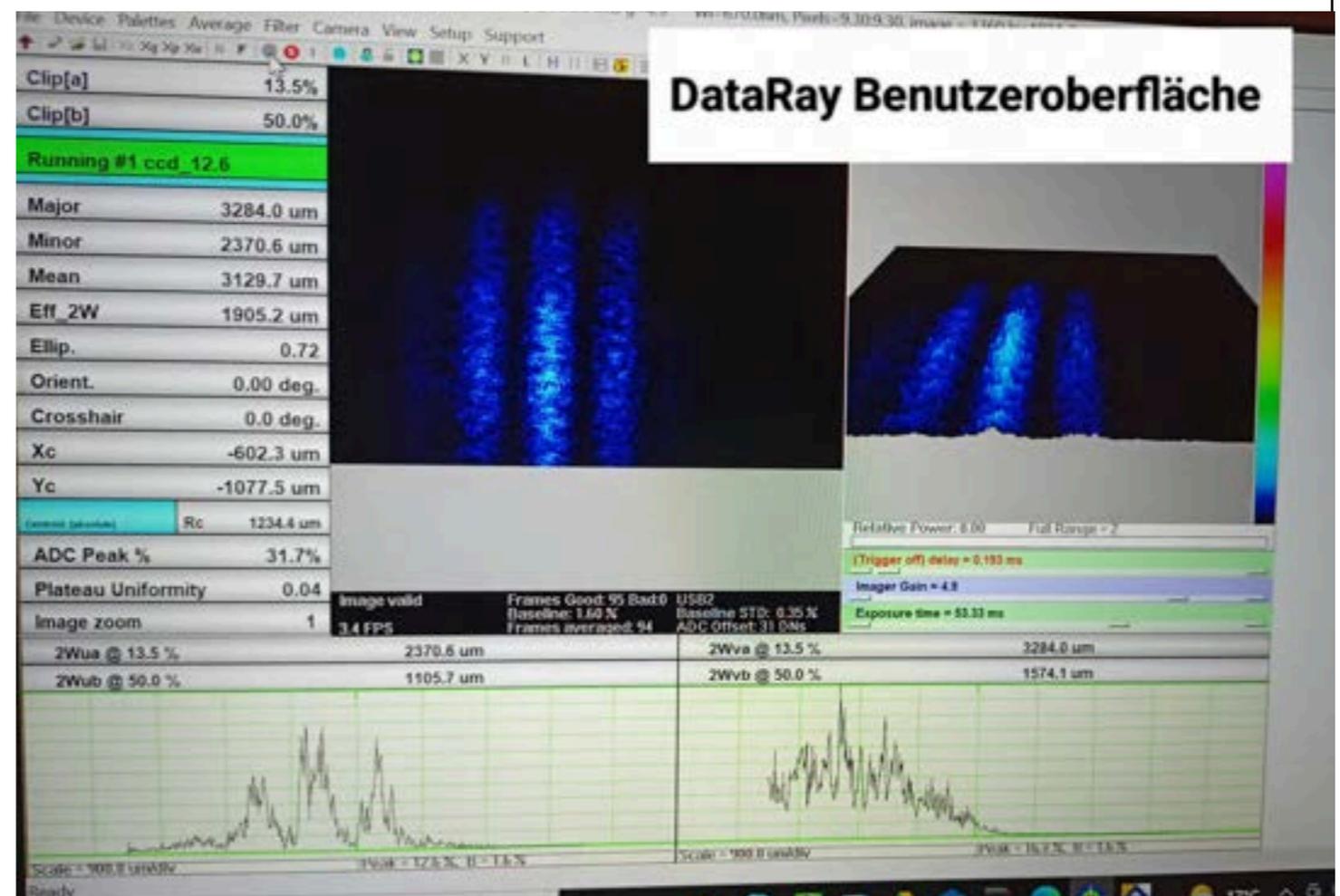
Und jetzt du!

Disclaimer: Es handelt sich um ein Analogieexperiment im Labor

Forscher*innenfrage: Wie beeinflusst die Existenz der Welcher-Weg-Information das Interferenzmuster?

Ziehe spätestens **JETZT** deine Laserschutzbrille auf!

1. Schalte den Computer und den Laser ein. **!!VERSTELLE AUF KEINEN FALL DIE EINSTELLUNGEN!!**
2. Öffne nun das Programm „DataRay“. Drücke in der oberen Kommandoleiste das grüne „G“ für „Go“. Wie du siehst, ist das Bild aus einzelnen Pixeln aufgebaut. Diese stellen hier aber **keineswegs** echte Photonen dar! Da das Ergebnis mit echten Einzelphotonen aber ähnlich aussieht, ist es ein **Analogieexperiment** (schaue dir im Zweifel "Doppelspalt mit Einzelphotonen" nochmal an).



So sollte dein Ergebnis ungefähr aussehen.

3. Analysiere die detektierte **Intensitätsverteilung** des Oszilloskops am Computer und überlege dir, was passiert, wenn wir das Experiment mit **einzelnen** Photonen wiederholen.
4. Stelle nun die **Polarisationsfilter** in den Laserstrahl, sodass dieser die **beiden Einfachspalte** beleuchtet. Stelle erst beide Filter auf 0° und fotografiere das Interferenzmuster auf dem Schirm mit deinem Smartphone.

Verändere nun die Winkel: Einmal -45° zu $+45^\circ$ und $+45^\circ$ zu $+45^\circ$.

Fotografiere das Interferenzmuster, zB. mit deinem Smartphone! Wie **verändert** sich das Interferenzmuster auf dem Schirm?

Beobachte nun das Muster mit **DataRay**. Wie beeinflusst die **Existenz** der Welcher-Weg-Information das Interferenzmuster?

Schrödingers Katze

(von Philip Schwinghammer übernommen)

Schrödingers Katze ist ein berühmtes Gedankenexperiment, das die Seltsamkeit und Absurdität der Quantenphysik und der Superposition veranschaulichen soll. Nehmen wir an, wir sorgen uns nicht um Tierschutz oder einen sicheren Arbeitsplatz. Wir könnten eine Katze nehmen, und sie mit einer Flasche Gift in eine Kiste sperren. Die Giftflasche hätte eine bedeutsame Schwäche: Sie zerbricht, sobald ein radioaktiver Zerfall in der Kiste passiert. So weit so gut, es sieht erst einmal so aus, als würden wir grundlos Katzen ermorden. Das ist aber nur die **halbe** Wahrheit!



Schrödingers Katze

Schrödingers Katze

Warum uns das Konzept von Quantenteilchen in der Superposition so erstaunt

Radioaktive Zerfälle sind **Quantenprozesse**. Das bedeutet, ein radioaktives Atom kann in einer Superposition aus Zerfallen und nicht-Zerfallen sein, bis eine **Messung** durchgeführt wird. Bis das Atom gleichzeitig zerfallen und nicht zerfallen ist, ist gleichzeitig die Flasche zerbrochen und nicht zerbrochen. Genauso geht ich ein einzelnes Photon beim Doppelspaltexperiment gleichzeitig durch den linken und rechten Spalt. Öffnen wir die Kiste, lösen wir damit die **Superposition** durch die Messung auf.

Das Gift hat die Katze erreicht, aber gleichzeitig auch nicht, und die Katze ist somit in einer **Superposition** aus tot und lebendig! Zu welchen Anteilen sie tot und lebendig ist, hängt also von den radioaktiven Atomen ab. Die Wahrscheinlichkeit für ein radioaktives Atom zu zerfallen, kann ganz unterschiedlich sein, je nachdem, welches Element wir haben. **Öffnen** wir die Kiste, lösen wir damit die Superposition auf, sodass die Katze **eindeutig** tot oder lebendig ist.



VERSUCH 21: QM Bomb Tester

QM Bomb Tester

Wie kann ich testen, ob Bomben scharf sind oder nicht, OHNE sie dabei hochzujagen?



Hütchenspiel

Um etwas beobachten zu können, muss es von **mindestens** einem Photon getroffen werden. Diese Aussage können wir ganz leicht überprüfen: Wenn wir uns die Augen zuhalten, gelangt kein Photon zu unseren Augen und wir können nichts beobachten.



Aber in der **Quantenphysik** gilt das nicht mehr.

Wir stellen uns Folgendes vor:

In einem **Hütchenspiel** haben wir zwei Hütchen und eine Murmel. Die Murmel befindet sich unter einem von beiden Hütchen. Unter welchem, wissen wir nicht. Sobald die Murmel mit **Licht** in Berührung kommt zerfällt sie zu **Staub**.

Wenn wir das Hütchen hochheben, unter dem die Murmel ist, wird sie zu **Staub** zerfallen. Wir wissen also, wo die Murmel war (**Staubhaufen**), aber haben sie zerstört.

Um die Murmel zu finden und **nicht** zu zerstören, würden wir also das Hütchen anheben, unter dem wir die Murmel **nicht vermuten**. Hatten wir recht, wissen wir nun, dass die Murmel unversehrt unter dem anderen Hütchen ist. Wir haben den **Aufenthaltort** der Murmel bestimmt, **ohne** dass sie von einem Photon berührt wurde.

Dieses Prinzip nennt man **wechselwirkungsfreie Quantenmessung**.

Wir können also in der Quantenphysik **Informationen über Quanten erhalten**, **ohne** dass sie **mit Licht wechselwirken**.

Das Gedankenexperiment:

Vor uns liegt eine größere Anzahl an Bomben. Manche davon sind **scharf**, manche sind **Blindgänger** (welcher Anteil scharf ist, ist nicht bekannt).

Die Bomben besitzen einen **lichtempfindlichen** Auslöser.

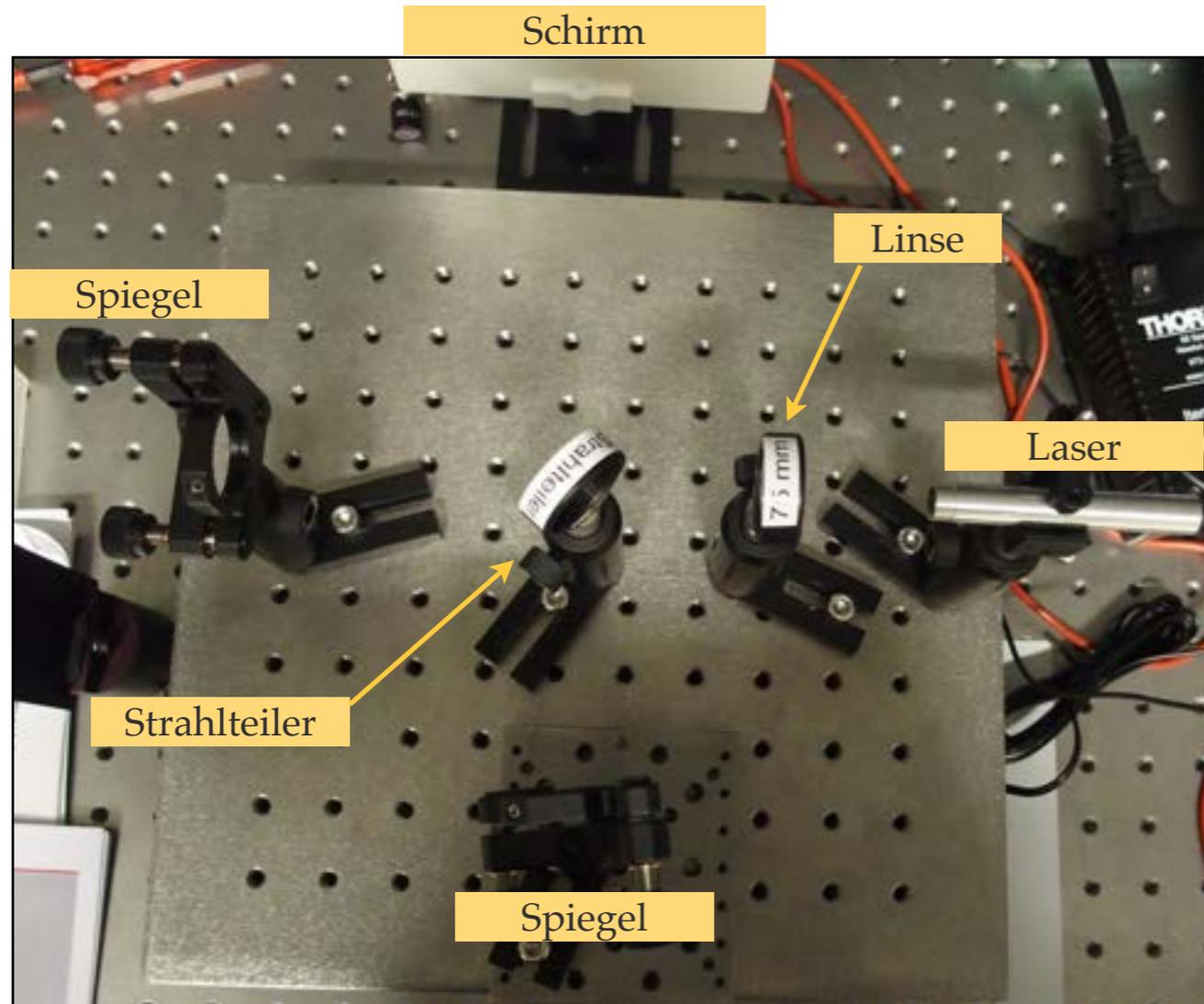
Das heißt die scharfen Bomben explodieren, sobald ein Photon mit dem Auslöser wechselwirkt.

Die Blindgänger wechselwirken **nicht** mit Photonen.

Auch in unserem Versuch wollen wir **wechselwirkungsfrei** messen, um die scharfen Bomben zu finden, ohne sie in die Luft zu jagen.

Der Versuchsaufbau

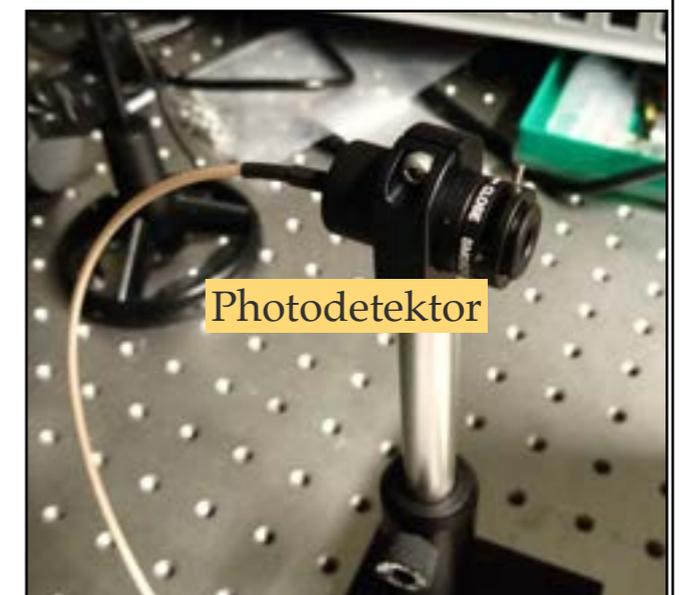
Um die Ergebnisse unseres Gedankenexperiments zu überprüfen nutzen wir folgenden Aufbau:



Der Versuchsaufbau ist identisch mit dem des Michelson Interferometers (nächste Folie), nur wird später an Stelle des Schirms ein Photodetektor platziert. Der Photodetektor ist an ein Voltmeter (ein Spannungsmessgerät) angeschlossen. Mit Hilfe der Anzeige des Voltmeters könnt ihr die gemessenen Spannungen ablesen.

Der Aufbau enthält:

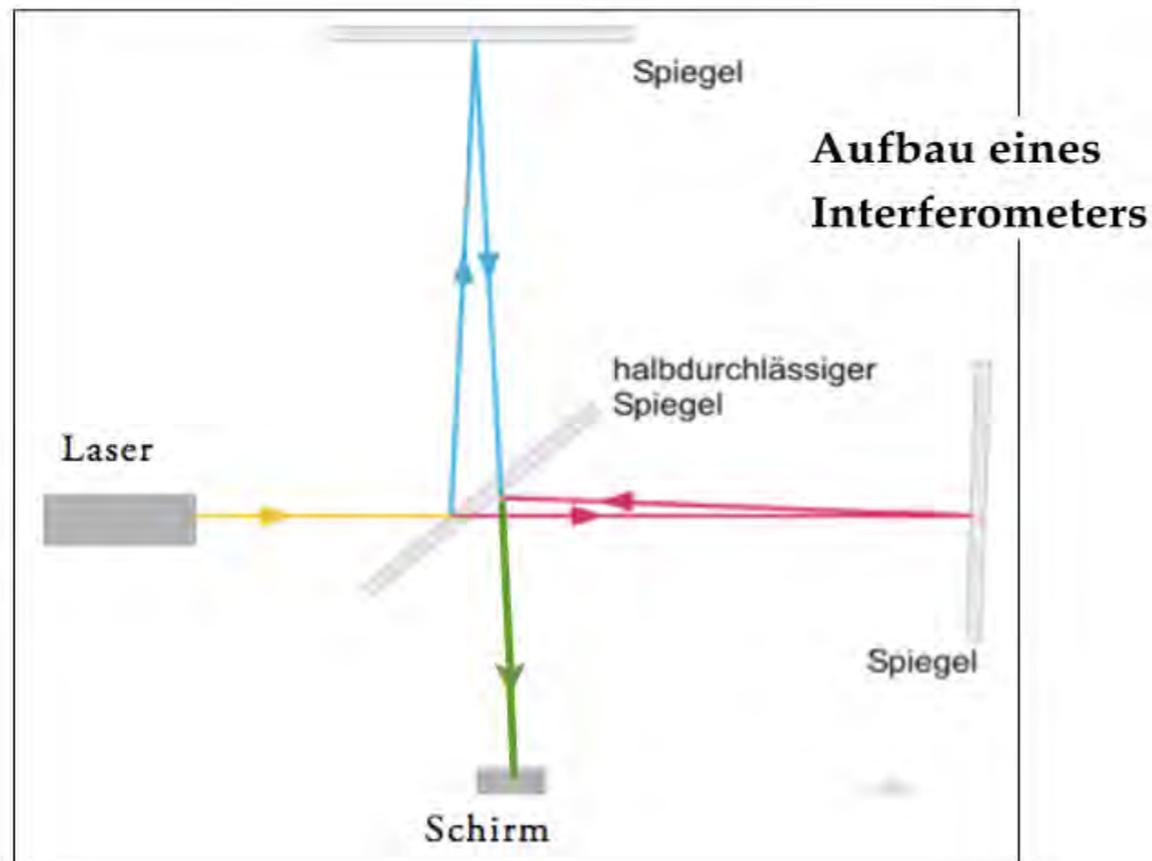
- 1 Laser
- 2 Spiegel
- 1 Linse (75mm)
- 1 Strahlteiler
- 1 Schirm
- 1 Photodetektor
- 1 Voltmeter



Das Michelson-Interferometer

Das Michelson Interferometer ist auch als eigenständiger Versuch im Photon Lab enthalten. Hier findet ihr einige Informationen zu dem Interferometer, die ihr für das Knaller Experiment benötigt.

Der Versuchsaufbau

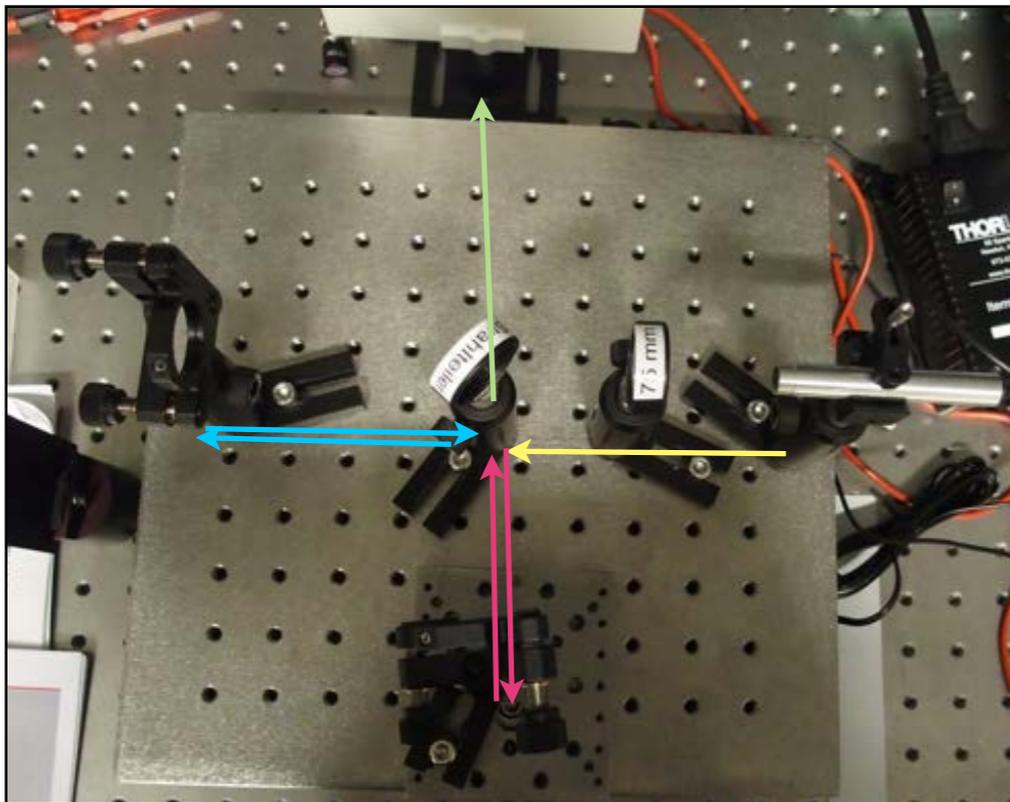


Der halbdurchlässige Spiegel wird oft auch **Strahlteiler** genannt. Er teilt den Laserstrahl in zwei Strahlen auf, indem er 50% des Laserlichts **reflektiert** und die anderen 50% **hindurchlässt**. (Eine genauere Beschreibung findet unter dem Link)

Die beiden Strahlen werden an den Spiegeln reflektiert und treffen beide erneut auf den Strahlteiler. Dort überlagern die beiden Strahlen und treffen auf den Beobachtungsschirm.

Grundlagen

Bei diesem Versuch handelt es sich um ein Analogieexperiment, das normalerweise mit einzelnen Photonen durchgeführt wird, das Ergebnis wäre aber das gleiche wie bei diesem Aufbau. Bei einem Laserstrahl lässt sich dieses Experiment aber klassisch erklären, wobei man bei Einzelphotonen auf die Quantenmechanik zurückgreifen muss.



Nun wird es etwas abstrakt:

Im Einführungsvortrag haben wir bereits gesehen, dass Licht sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften hat.

Senden wir Photonen in den Versuchsaufbau, können wir ein Interferenzmuster auf dem Schirm erkennen.

Das Licht verhält sich also wie eine Welle.

Deswegen können wir auch das Interferenzmuster beobachten.

Allgemein können wir sagen, dass Licht Welleneigenschaften zeigt, wenn...

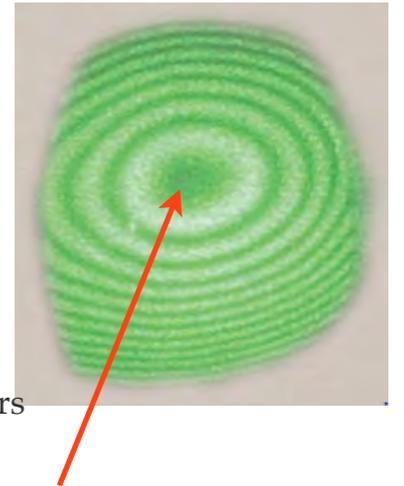
- 1) Es **mehr als einen möglichen Weg** gibt, den das Licht nehmen kann (hier **roten** und **blauen** Weg)
- 2) Wir **nicht unterscheiden** können, welchen Weg das Licht genommen hat, vergleiche Doppelspaltexperiment. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, können wir keine Interferenz mehr beobachten.

Bombe oder Blindgänger?

Um die Bomben unterscheiden zu können, platzieren wir jede Bombe der Reihe nach in einem der **Interferometerarme**. Zuvor haben wir das Interferometer so eingestellt, dass das Interferenzmuster ein Minimum an der Stelle des Photodetektors hat.

Nun kann man 2 Fälle unterscheiden:

Minimum des Interferenzmusters



Fall 1: Die Bombe ist scharf

Der Auslöser einer scharfen Bombe **wechselwirkt** mit dem Photon. Das „markiert“ diesen Interferometerarm. Denn die Wege sind nun **unterscheidbar**: Falls das Photon den Weg mit der Bombe nimmt, würden wir das merken. Da nun eine der beiden Bedingungen für Interferenz nicht mehr erfüllt ist, **verschwindet** das Interferenzmuster. Das Photon verhält sich wie ein Teilchen:

Es kann den Weg nehmen, in dem die Bombe steht. Das wäre der ungünstigste Fall, denn nun **detoniert** die Bombe und wir dürften von **vorne** mit dem Versuch beginnen.

Oder es nimmt den anderen „**bombenfreien**“ Weg. Dann trifft unser Photon, nachdem es vom Spiegel reflektiert wurde erneut auf den Strahlteiler. Das heißt es hat erneut eine 50% Chance reflektiert oder durchgelassen zu werden. Wird es reflektiert, wird es zurück Richtung Laser gesendet und kann nicht von unserem Detektor gemessen werden. Wird es durchgelassen, wird das Photon von unserem Photodetektor **registriert**.

Fall 2: Die Bombe ist ein Blindgänger

Bei einem Blindgänger wechselwirkt das Photon nicht mit dem Auslöser. Wir können so nicht unterscheiden, welchen Weg das Photon genommen hat. Die Bedingungen für Interferenz sind nicht verletzt.

Das bedeutet, unser Photodetektor misst nun das Minimum des Interferenzmusters (dieses Signal ist sehr viel **schwächer** als das Signal von unserem Photon in Fall 1).

Angenommen 50% unserer Bomben wären scharf. Dann würden wir in ca. 25% der Versuche unser Labor in die Luft jagen ($P(\text{Bombe scharf}) = 50\%$ und $P(\text{Photon nimmt Weg mit Bombe}) = 50\%$. Lese $P(x)$ als Wahrscheinlichkeit, dass x ist).



scharfe Bombe

Blindgänger

Photon wechselwirkt
mit Auslöser

keine Wechselwirkung von
Photon und Auslöser

Wege unterscheidbar

Wege nicht unter-
scheidbar

Licht verhält sich wie
Teilchen => keine In-
terferenz

Licht verhält sich
wie eine Welle =>

Interferenz

bombenfreier Weg

Weg mit Bombe

Photon trifft auf Detektor (wir
messen eine höhere Intensität
als beim Blindgänger, da wir
kein Minimum mehr messen)
oder wird zurück zum Laser
gesendet

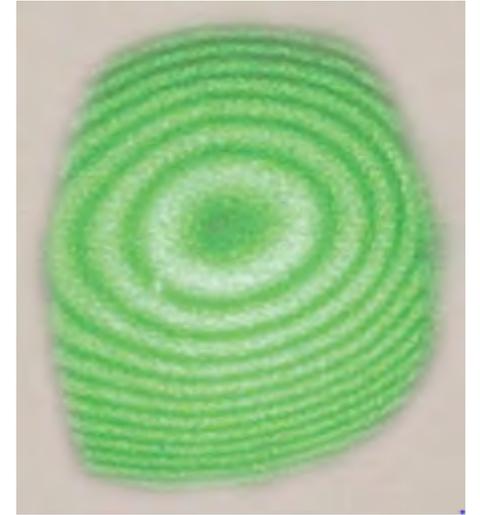


Photodetektor misst Minimum
des Interferenzmusters

Durchführung

**Achtung: Der folgende Versuchsteil ist nicht stabil in der Durchführung.
Verwendet nicht zu viel Zeit darauf!**

Sobald der Laser eingeschaltet ist, sollte ein **Interferenzmuster** auf dem Schirm zu erkennen sein. Wenn nicht, dreht vorsichtig an den Schrauben des roten Spiegels, bis sich die beiden Teilstrahlen exakt überlagern und das Interferenzbild zu erkennen ist.



- 1) Verschiebe den Photodetektor mit dem Schirm so, dass die Blende mittig (!) vom Interferenzmuster getroffen wird. Überprüfe den Strahlengang mithilfe eines Stückes Papier, das du vor den Photodetektor hältst.
- 2) Dreht vorsichtig an der **Justierschraube** des **nicht roten Spiegels**, um in der Mitte ein Minimum einzustellen. Dieses Minimum sollte nun genau mittig auf der Blende des Detektors liegen.

Der Photodetektor misst die Lichtintensität an der Stelle seiner Blende. Das angeschlossene Voltmeter gibt die Spannung an, die **proportional** zu der gemessenen Lichtintensität ist.

- 3) Mit Hilfe des Voltmeters könnt ihr nun kontrollieren, ob ihr das Minimum messt. Ändert die Position des Detektors so lange, bis ihr den Punkt gefunden habt, an dem die Anzeige den niedrigsten Wert liefert.

- 3) **Kontrolle:** Wenn das Licht in einem Arm des Interferometers blockiert wird, muss die Spannung ansteigen, da nun keine Interferenz mehr zustande kommt und der Photodetektor nicht mehr das Minimum misst.
- 4) Dejustiert das Interferometer nun ein wenig indem ihr vorsichtig (!) an einer der Schrauben des Spiegels in der roten Halterung dreht, bis das Ringmuster verschwindet. Notiert euch den Wert , den das Voltmeter misst, und verdoppelt ihn. Dieser Wert stellt die Hälfte der Gesamtintensität dar, da die Hälfte des Lichts vom Strahlteiler wieder zum Laser zurückreflektiert wird. Deswegen verdoppeln wir diesen Wert.

Hinweis: Die vom Voltmeter gemessene Spannung kann nicht Null werden, da immer noch Licht aus der Umgebung gemessen wird.

Wichtig: Überprüft mit Hilfe eines Stück Papiers vor jeder Messung, ob der Detektor immer noch das Minimum misst. Der Laser ist instabil. Deswegen muss das Minimum eventuell durch Drehen an den Justierschrauben der Spiegel erneut eingestellt werden.

Durchführung

Fall 1: Bombe ist scharf

In unserem Experiment können wir nur die Situation darstellen, in der das Photon den bombenfreien Weg nimmt.

**Überleg dir zunächst, welche Ergebnisse ihr für die verschiedenen Fälle erwartet.
(Wann werden die gemessenen Werte höher sein?)**

Diesen Fall können wir simulieren, indem wir einen der Interferometerarme abdecken. Das ist der Interferometerarm, in dem die Bombe steht. Stelle hierzu die Abbildung der scharfen Bombe zwischen den Strahlteiler und einen Spiegel, sodass der Laserstrahl auf die Abbildung trifft. Schalte das Voltmeter ein, das an den Photodetektor angeschlossen ist, um die Werte abzulesen.

Beobachte die Anzeige des Voltmeters.

Was misst der Photodetektor? Notiere deine Ergebnisse.

Fall 2: Bombe ist ein Blindgänger

Stelle nun die Abbildung des Blindgängers in einen der Interferometerarme (der Laserstrahl soll durch die Öffnung der Abbildung strahlen).

Messe erneut mit dem Photodetektor.

Vergleiche deine Ergebnisse. Fertige hierzu eine Tabelle an (s. nächste Seite).



BOMB TESTER

Messung	Gesamtintensität*	Blindgänger (Intensität des Minimums)	scharfe Bombe (ein Arm abgedeckt)
1			
2			
3			

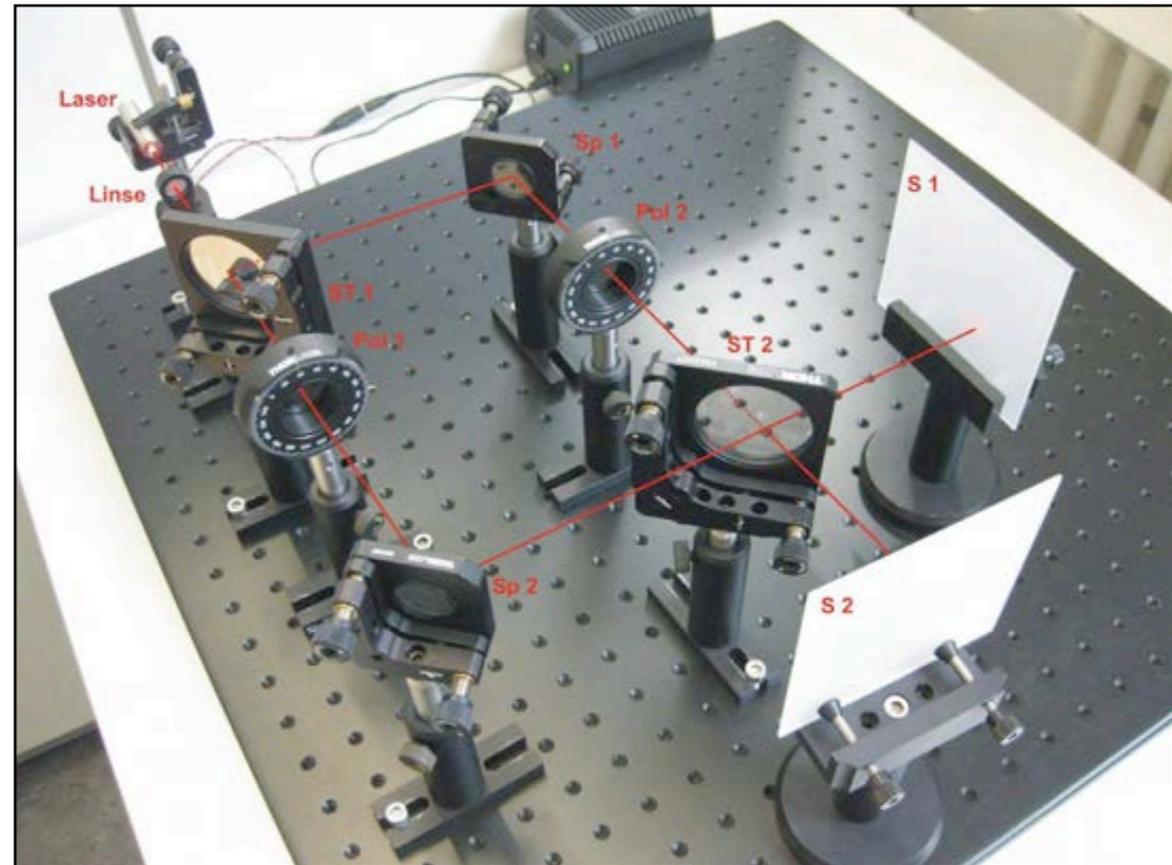
Stimmen deine Ergebnisse mit deinen Erwartungen überein? Was könnten Gründe für Abweichungen sein, falls sie nicht übereinstimmen?

* Hier trägst du die doppelte Messung des Voltmeters in mV ein - bei dejustiertem Aufbau. Die Spannungen spiegeln die Intensitäten, die der Photodetektor misst, wieder.

VERSUCH 22: QM QUANTENRADIERER

QM Quantenradierer

Kann ich die Vergangenheit unsichtbar machen?



Bitte durchlesen bevor du beginnst:

Bitte NIEMALS die Spiegel verstellen oder an den Justierschrauben der Spiegel drehen!!!

Dasselbe gilt für den Laser an sich. NIEMALS den Laser in der Verankerung drehen oder ihn gar herausnehmen!!! Der ganze Versuch ist **sehr schwer zu justieren**.

Ist er erst einmal dejustiert, kann es wirklich lange dauern, bis er wieder läuft! Wenn der Versuch nicht funktioniert, wende dich bitte an die Laborleitung.

Nimm dir Zeit, das Prinzip zu verstehen, bis du mit dem Versuch beginnst.

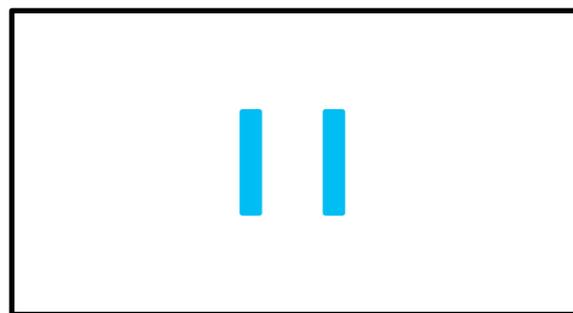
Viel Spaß beim Experimentieren!

Grundlagen

Wir haben bereits gelernt, dass sich Licht manchmal wie eine Welle und manchmal wie ein Teilchen verhält. Somit hat Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften (das nennt man den **Welle-Teilchen-Dualismus**). Sollte dir das noch nicht klar sein, gehe erst zum **Doppelspaltversuch**.

Sendet man einen Laserstrahl auf einen Doppelspalt, kann man ein [Interferenzmuster](#) auf dem Schirm hinter dem Spalt beobachten. Die Photonen verhalten sich demnach wie eine **Welle**, sie zeigen also Welleneigenschaften.

Auch wenn wir die Photonen einzeln durch den Spalt senden, erhalten wir dieses Interferenzmuster.



Wir führen das gleiche Experiment nochmal durch, nur diesmal beobachten wir, welchen Weg die Photonen nehmen (geht das Photon durch den linken oder rechten Spalt?). Jetzt verschwindet unser Interferenzmuster! Auf dem Schirm erhält man zwei Linien, wie man es bei Teilchen erwarten würde. Die Photonen verhalten sich also wie **Teilchen**.

Die Weginformation, die wir erhalten, zerstört somit unsere Interferenz. Dasselbe Phänomen kann auch bei Photonen beobachtet werden. Damit wollen wir uns im ersten Teilversuch beschäftigen.

Natürlich können wir uns nicht im Experiment neben den Doppelspalt setzen und notieren, welches Photon durch welchen Spalt geht. Wir müssen die Weginformation anders erhalten.

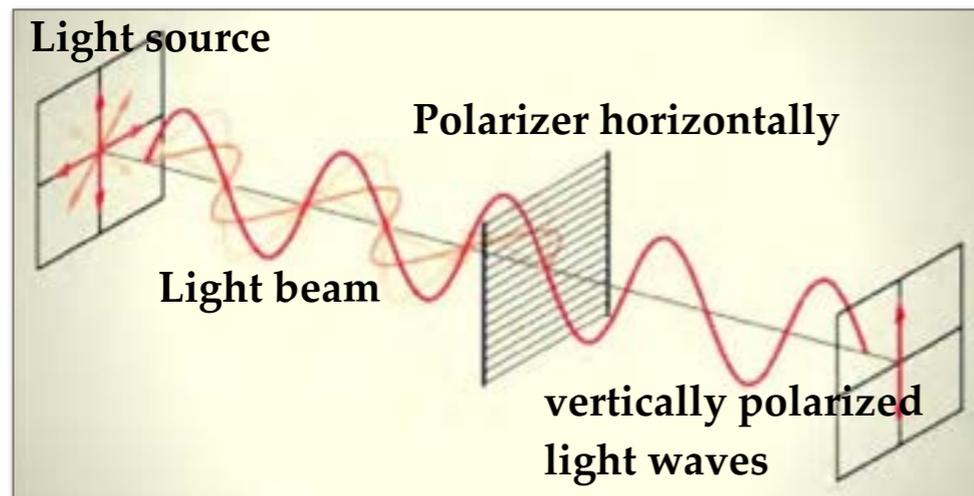


In unserem Versuch wollen wir mittels Polarisation unterscheiden, welches Photon welchen Weg genommen hat.

Hierzu polarisieren wir das Licht in den verschiedenen Wegen in unterschiedlichen Orientierungen.

Polarisation von Licht

Licht kann in verschiedene Richtungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung polarisiert sein. Das bedeutet, die Lichtwelle schwingt in diese Richtung. Unser Laser emittiert **unpolarisiertes** Licht. Die Photonen, die unseren Laser verlassen, sind also alle unterschiedlich orientiert. Hält man einen Polarisationsfilter in den Strahlengang des Lasers, lässt dieser nur Wellen einer bestimmten **Orientierung** durch. Den Polarisationsfilter können wir uns vorstellen wie ein Gitter, der nur Wellen durchlässt, die durch die Spalten des Gitters passen.



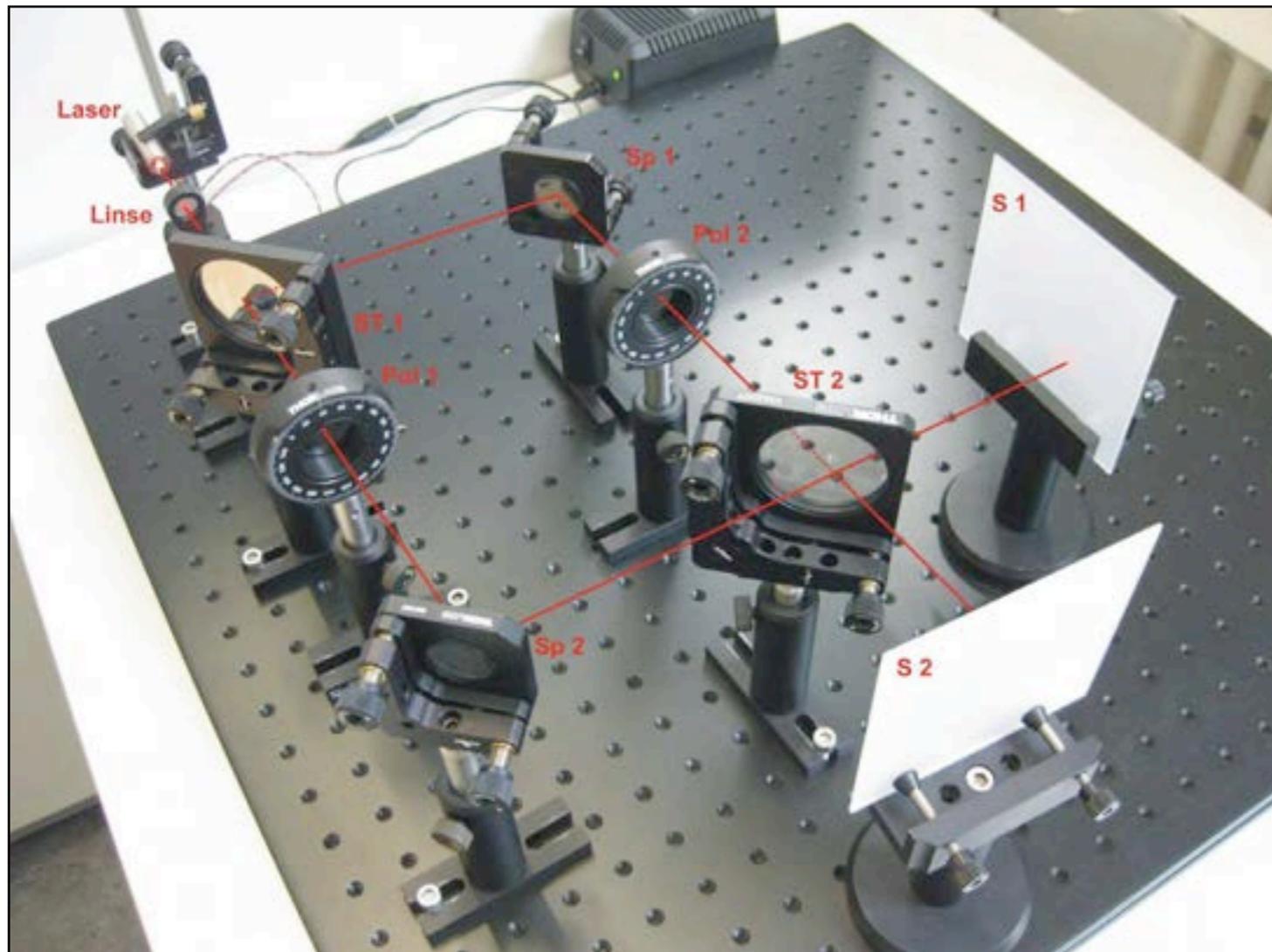
In der Abbildung trifft unpolarisiertes Licht auf einen Polarisationsfilter. Das Licht hinter dem Polarisationsfilter ist nun linear polarisiert.

Werden nun zwei Filter, deren Gitter senkrecht aufeinander stehen, hintereinander platziert, so lassen sie **kein** Licht mehr hindurch. (Mehr hierzu findet ihr [hier](#).)

Stehen unsere Polarisationsfilter nicht senkrecht aufeinander, sondern zum Beispiel in einem Winkel von 45° , lassen sie immer noch einen Teil der Lichtwellen durch (nämlich ein Viertel der eingestrahnten Intensität). Im Photon Lab findet ihr Polarisationsfilter, an denen ihr die eben beschriebenen Phänomene beobachten könnt. Probiert verschiedene Winkel aus und beobachtet, wie sich der Anteil an Licht, den die Filter durchlassen, mit dem Winkel verändert. Im Versuchsaufbau (nächste Seite) sind zunächst zwei Polarisationsfilter enthalten. Im zweiten Teilversuch kommt ein **Dritter** hinzu.

Der Versuchsaufbau

Bei diesem Versuch handelt es sich um ein Analogieexperiment, das normalerweise mit einzelnen Photonen durchgeführt wird; das Ergebnis wäre aber das gleiche wie bei diesem Aufbau. Bei einem Laserstrahl lässt sich dieses Experiment klassisch erklären, und bei Einzelphotonen muss man auf die Quantenmechanik zurückgreifen.



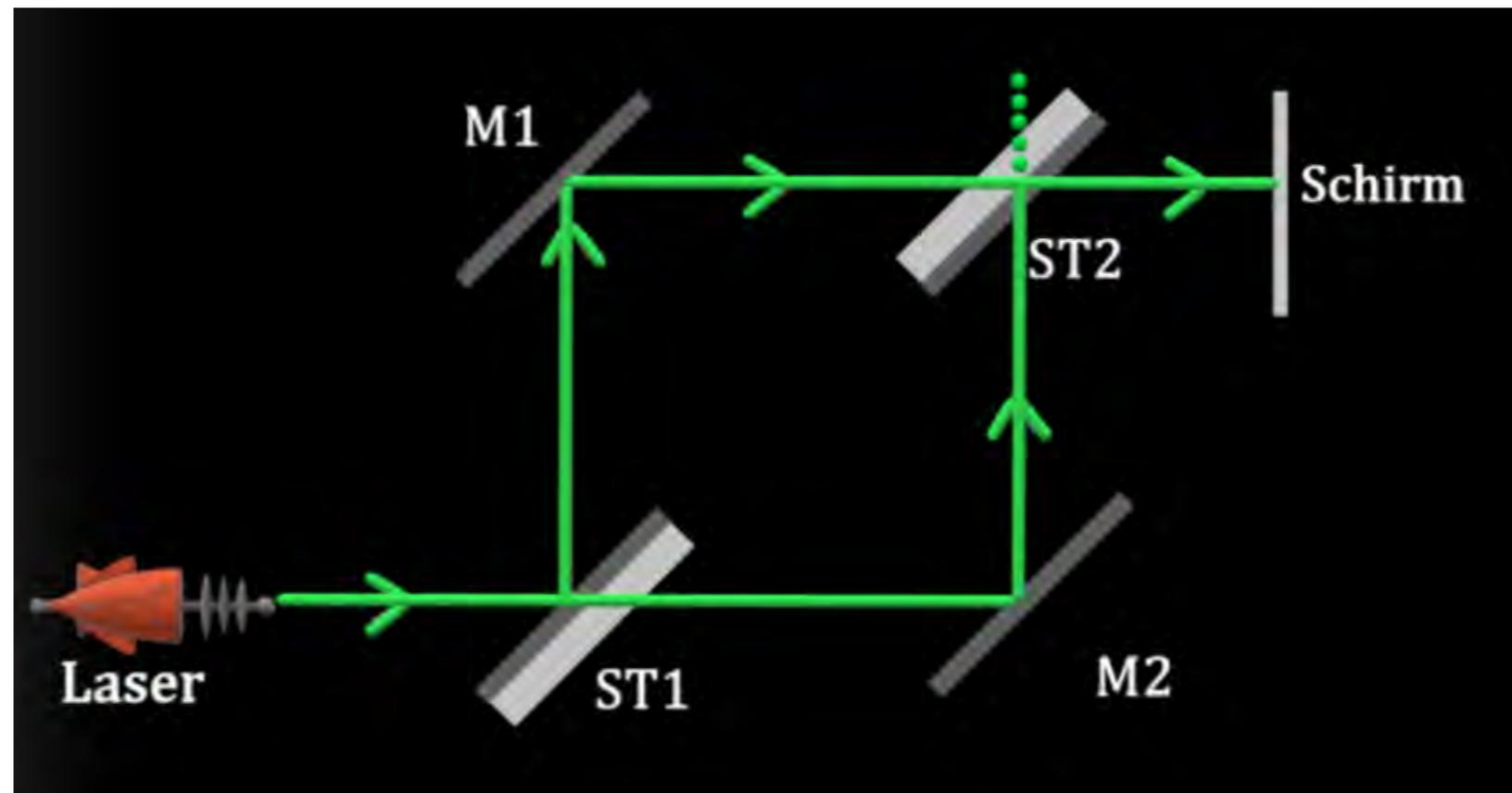
Dieser Versuch sollte bereits wie auf dem Bild angeordnet sein. Der Aufbau enthält:

- einen Laser
- 2 Spiegel (Sp)
- 2 Strahlteiler (ST)
- 2 Polarisationsfilter (Pol)
- 2 Schirme (S)

Für den zweiten Teilversuch benötigen wir noch einen dritten Polarisationsfilter. (Um Informationen über die Strahlteiler zu erhalten, drücke auf den Link oben)

Der Versuchsaufbau

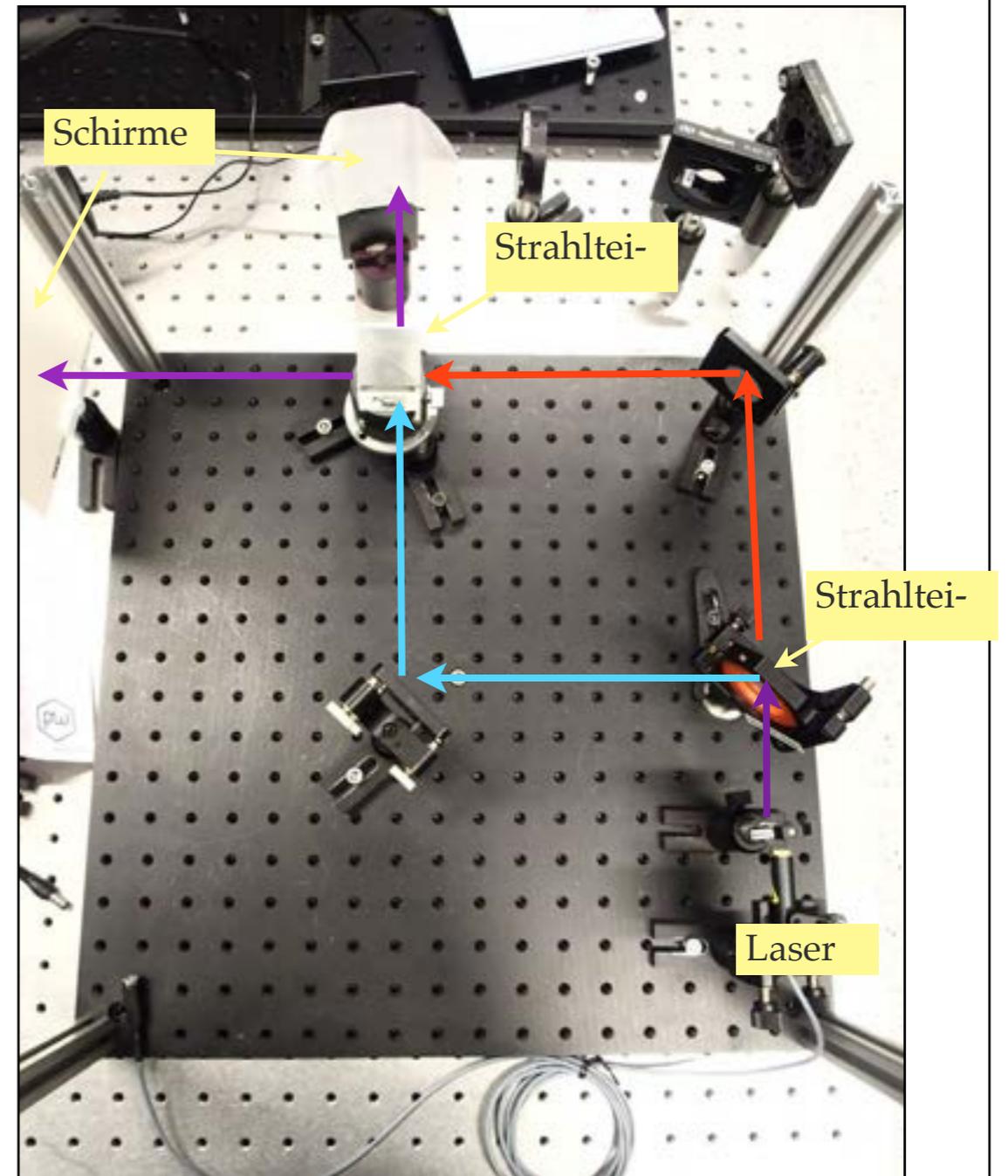
Hier kannst du den Strahlverlauf beobachten: Am Strahlteiler 1 wird der Lichtstrahl in zwei Teile geteilt und dann wieder an einem Strahlteiler zu 50 % transmittiert und reflektiert. Es treffen am Ende also 50 % der Ausgangsintensität auf dem Schirm auf. Diesen Aufbau kennst du bereits vom Mach-Zehnder-Interferometer.



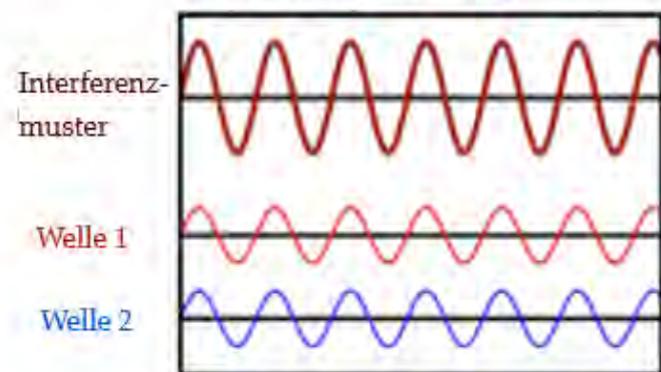
Teilversuch 1 (Erhalt der Weginformation)

Hier siehst du den Aufbau im Labor. Zusätzlich zum Aufbau des Interferometers kommen hier noch Polfilter hinzu. Durch den ersten **Strahlteiler** ergeben sich zwei mögliche Wege (**blau** und **rot**).

Die beiden Laserstrahlen überlagern sich, sobald sie auf den zweiten Strahlteiler treffen. Der überlagerte Strahl wird von dem zweiten Strahlteiler aufgespalten. Die entstanden Strahlen treffen auf die 2 Beobachtungsschirme. Durch die Überlagerung der Strahlen erhalten wir ein Interferenzmuster.

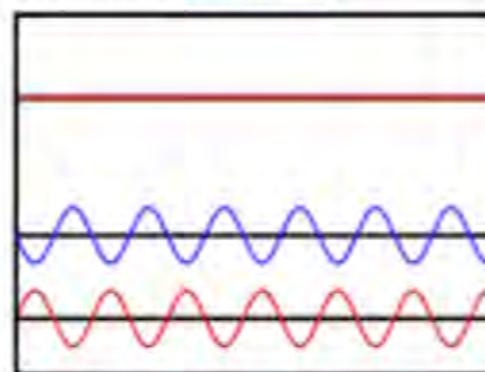


konstruktive **Interferenz**



Wenn sich zwei Wellen überlagern, und dabei ein Maximum auf ein Maximum trifft, entsteht ein doppelt so hohes Maximum (Konstruktive Interferenz)

destruktive **Interferenz**



Trifft dagegen immer ein Maximum auf ein Minimum, löschen sich die Lichtwellen gegenseitig aus. (Destruktive Interferenz)

Teilversuch 1: Durchführung

Laserschutzbrillen aufsetzen!!

Der Versuch ist bereits justiert! You touch, you die!! Bitte nur die Polarisationsfilter anfassen!

Zunächst werden die Polarisationsfilter gleich eingestellt (beispielsweise können beide auf 0° gestellt werden).

Bevor du den Laser anschaltest, überlege dir, was nun auf den beiden Beobachtungsschirmen zu erkennen sein sollte. Die Polarisationsrichtung des transmittierten Strahles erkennst du an dem kleinen **Aufkleber**.

Schalte nun den Laser ein und notiere deine Beobachtung.

Es sollte nun ein **Interferenzmuster** auf beiden Schirmen zu erkennen sein (falls nicht, wende dich bitte an die Laborleitung).

Um das Interferenzmuster zu zerstören, müssen wir die Wege unterscheidbar machen. Hierzu nutzen wir die **Polarisationsfilter**:

Bei einem der Polarisationsfilter wird nun die Durchlassrichtung um 90° geändert. Nun könnten wir aufgrund der Polarisation des Lichtes nachvollziehen, welches Photon welchen Weg genommen hat (**Weginformation**). Durch die unterschiedliche Polarisation können die Wege unterschieden werden.

Beschreibe deine Beobachtung.

Du hast Probleme bei der Justierung? Dann schaue hier ins Glossar!

Teilversuch 2: Quanten "radieren"

Nun kommt es zum eigentlichen Zweck des Versuches: Dem Radieren von Quanten. Das heißt wir wollen nun die erhaltene Weginformation wieder **löschen**. Hierzu benötigen wir den **dritten** Polarisator:

Die Ausgangssituation ist der **Endzustand** vom ersten Teilversuch. Die Polarisationsfilter stehen **senkrecht** aufeinander.

Jetzt wird der dritten Polarisationsfilter mit einer Ausrichtung von 45° zwischen den Strahlteiler und einen der beiden Schirme platziert.

Was ist auf den Schirmen zu beobachten?

Erläutere deine Beobachtungen aus den beiden Teilversuchen über den Verlust und die Gewinnung der **Weginformation** (s. vorherige Seiten).

Teilversuch 2: Lösung

Du hast auf dem Schirm beobachtet, dass das Interferenzmuster nun wieder sichtbar ist, auf dem anderen Schirm jedoch weiterhin nicht.

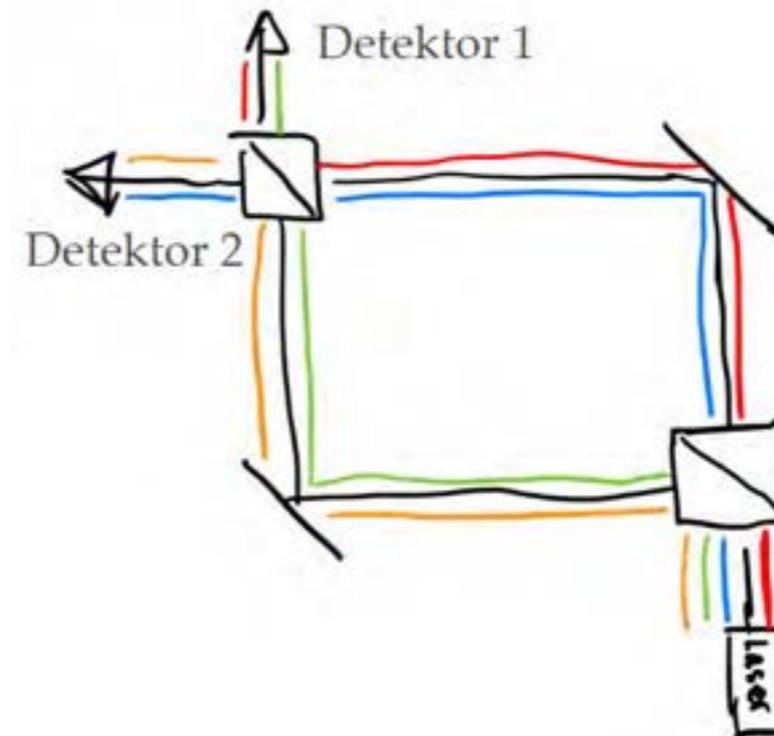
Erklärung: Durch das Einfügen des Polarisationsfilters unter 45° ist es nicht mehr möglich, eine „Welcher-Weg-Information“ über das Photon zu erhalten. Nun zeigt es wieder die Superposition als eine seiner Quanteneigenschaften.

Gedankenexperiment: Wie funktioniert das mit Einzelphotonen?

Im Folgenden überlegen wir uns, wie der Versuch mit Einzelphotonen abläuft. Dazu ist es wichtig, dass wir nun nur Einzelphotonendetektoren genau in der Mitte des vorher beobachteten Interferenzmusters platzieren. Wir zählen also einzelne Photonen!

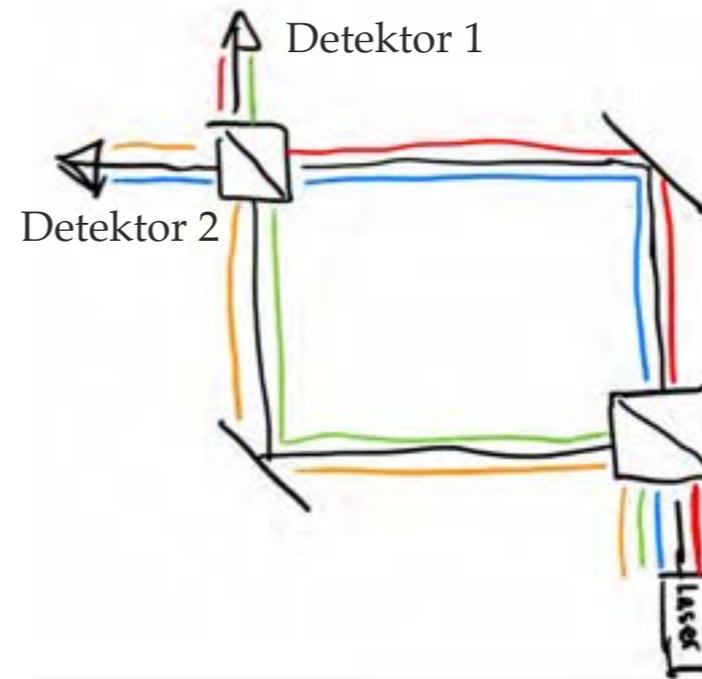
Stell dir nun vor, du schickst 100 Photonen in die Apparatur, erst auf den ersten Strahlteiler, dann sind da die Spiegel und dann auf den zweiten Strahlteiler. **Wo erwartest du wie viele Photonen?**

Überlege dir deine Antwort genau!



Klassisch erwarten wir eigentlich eine gleichmäßige Verteilung von 50:50. Aber wir beobachten alle Photonen bei Detektor 1 und keines bei Detektor 2!

Warum ist das so? Im Prinzip haben die Photonen vier mögliche Wege. Hat ein Photon Welleneigenschaften, können wir das gut erklären:



Phasensprung

Spiegel : π

Strahlteiler :

Ref. : $\pi/2$

Trans. : 0

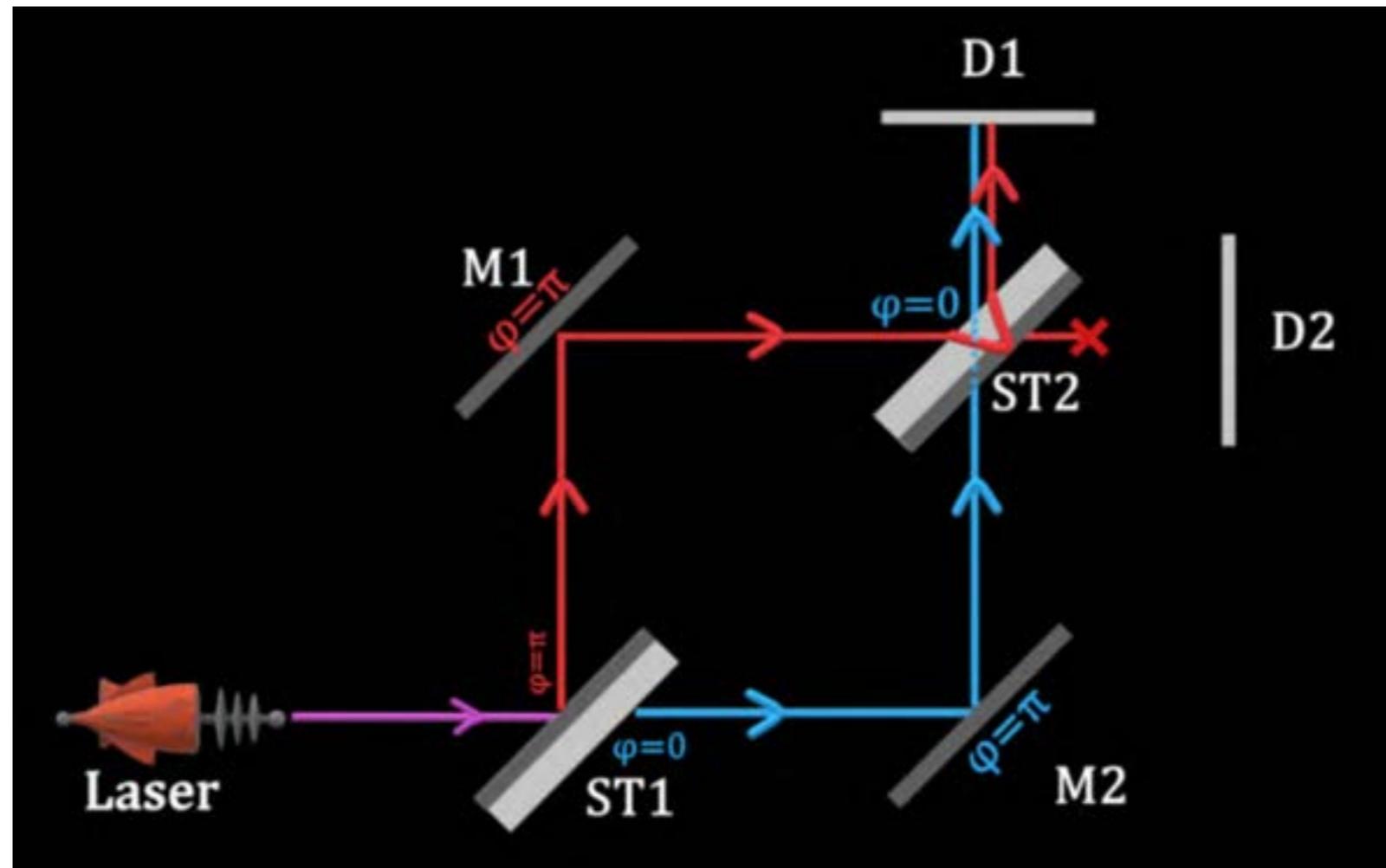
Nimm dir das laminierte Blatt "Quantenradierer" zur Hand und lege die blauen Wellen auf dieselbe Position ganz rechts im gelben und blauen bzw. roten und grünen Bereich. Laufe nun den Weg für die Wellen in Gedanken folgendermaßen ab (hier machen wir das exemplarisch für rot): Beim 1. Strahlteiler wird der rote Weg transmittiert (Phasensprung 0), dann am Spiegel reflektiert (Phasensprung π) und dann am Strahlteiler reflektiert ($\pi/2$). Gesamt haben wir also einen Phasensprung von $0+\pi+\pi/2=3\pi/2$. Also verschiebst du die blaue Welle auf dem Papier um drei gestrichelte Wellen nach links und lässt sie dort liegen. Genauso gehst du nun für blau, gelb und grün vor! Vergleiche am Ende nun, wie gelb und blau bzw. rot und grün zueinander stehen: Haben wir hier jeweils **destruktive** oder **konstruktive** Interferenz?

Lösung: Bei gelb/blau haben wir destruktive Interferenz. Daher sehen wir auch kein Interferenzmuster an Detektor 1. Da wir bei rot/grün konstruktive Interferenz haben, sehen wir dort ein Interferenzmuster.

Hier siehst du das nochmal einmal in der Darstellung aus unserem interaktiven Buch

<https://photonlab.h5p.com/content/1291414188940105797>

An unserem einfachen Versuch kannst du also schon erahnen, dass einzelne Photonen Welleneigenschaften haben.



Der Quantenradierer mit Einzelphotonen

Den klassischen Versuch hast du schon unter 2.1. durchgeführt. Aber das funktioniert auch mit Einzelphotonen!

Auch hier ist das **Interferenzmuster nun mit den 0° und 90° Filtern zerstört!** Das sieht man in einem echten Einzelphotonenexperiment an den Zählraten (Zählrate hoch: konstruktive Interferenz, Zählrate 0: destruktive Interferenz, Zählrate dazwischen: keine Interferenz).

Warum habe ich keine Interferenz? Der Weg, den das Photon genommen hat, ist nun markiert: "Eine Messung wird durchgeführt". Die Superposition ist also zerstört. Durch die Polarisation des Photons kann man nämlich rückschließen, welchen Weg das Photon genommen hat und die Wellenfunktion kollabiert. Das Photon verhält sich jetzt wie ein Teilchen.

Steht der 3. Filter unter 45° vor einem der Detektoren, ist das Interferenzmuster wieder hergestellt. Wie kann das sein?

Der 3. Polfilter **radert** die Welcher-Weg-Information aus! Du hast jetzt wieder ein Quantenteilchen, das Interferenz zeigt. Dies merkst du wieder an den Zählraten.

"Den Weg" löschen und damit auch die Vergangenheit?

QM Quantenkryptographie

Wie kann ich Nachrichten sicher verschlüsseln?

Gerade durch die NSA-Affäre wurde deutlich, wie wichtig das sichere und geheime Versenden von Informationen für uns ist. Banken, Regierungen und besonders das Militär sind auf sichere Arten der Informationsübertragung angewiesen. Die Kryptographie (Verschlüsselung) ist also ein wichtiges Thema in der heutigen Zeit.



Moderne Abhöranlagen des BND

Die Kunst der Verschlüsselung besteht darin, Nachrichten so zu codieren, dass sie nur unter Kenntnis eines Schlüssels gelesen werden können. Die modernste Methode zum Verschlüsseln von Daten besteht in der Nutzung quantenmechanischer Gesetze, um Botschaften sicher zu übermitteln. Das Prinzip dieser Methode kannst du hier kennenlernen!

Du kannst zu Beginn auch einen Vorversuch mit dem [QeyGen machen](#).

Bitte vor Beginn durchlesen:

Bitte NIEMALS den Aufbau verstellen!!! Du darfst nur den Laser anmachen, in den Justier-/ Messmodus gehen und die Polarisatoren und Dreher drehen. Den Rest darfst du NICHT ANFASSEN!

Dasselbe gilt für den Laser an sich. NIEMALS den Laser in der Verankerung drehen oder ihn gar herausnehmen!!! Der ganze Versuch ist **sehr schwer zu justieren**.

Ist er erst einmal dejustiert, kann es wirklich lange dauern bis er wieder läuft! Wenn der Versuch nicht funktioniert, wendet euch bitte an die Laborleitung.

Nimm dir Zeit, das Prinzip zu verstehen, bis du mit dem Versuch beginnst.

Viel Spaß beim Experimentieren!

Grundlagen der Quantenmechanik

Quantenobjekte sind generell Objekte, die sehr klein und sehr leicht sind, also zum Beispiel Elektronen oder Photonen. Das Verhalten dieser Objekte ist nicht mehr mit der klassischen Physik erklärbar; meist steht es sogar im Widerspruch dazu. Man kann nicht für ein Objekt einen genauen Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmen, kann aber über viele Teilchen eine Aussage für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit treffen.

Was kann man davon für die Kryptographie nutzen?

Besonders wichtig ist bei den Eigenschaften, dass man sie nicht „kopieren“ kann (no-cloning-theorem).

Für unseren Versuch bedeutet das, dass ein Lauscher die Nachricht nicht abhören und dann kopieren kann, ohne sie zu verändern.

Grundlagen der Informationsübertragung

Heutzutage werden Informationen über Binärcodes (bestehen nur aus 0 und 1) übertragen.

Zum Beispiel bedeutet der Buchstabe F in Binärschreibweise 00101. Einen solchen Binärcode könnte der Feind abfangen, lesen und verstehen und ihn danach weiterschicken.

Daher muss man vorher einen Schlüssel festlegen, der die Nachricht für den Feind unlesbar macht.

Den Schlüssel kennen nur die **Sendereinheit** (ab jetzt immer Alice genannt) und die **Empfängereinheit** (Bob), nicht aber die **Abhöreinheit** (Eve).

Der Schlüssel ist auch eine Folge aus Nullen und Einsen. Nachricht und Schlüssel werden binär addiert ,um die Nachricht zu „verstecken“.

Binäraddition: $0+0=0$ $1+1=0$ $1+0=1$ $0+1=1$ **Grün** wird letztendlich versendet.

Ein Beispiel hierzu findet ihr auf der nächsten Seite.

Hierzu ein Beispiel:

Versendet werden soll der Buchstabe F, also 00101.

Alice und Bob treffen sich und tauschen geheim einen vorher zufällig generierten Schlüssel aus.

Dieser soll hier 10110 sein. Der Schlüssel muss genauso lang wie die versendete Nachricht sein (!!!).

Alice verschlüsselt also und **versendet**: 0+1=1 0+0=0 1+1=0 0+1=1 1+0=1

Nur grün wird versendet: 10011 ist definitiv nicht gleich 00101, also nicht gleich F. Ohne Kenntnis des Schlüssels nicht lesbar!

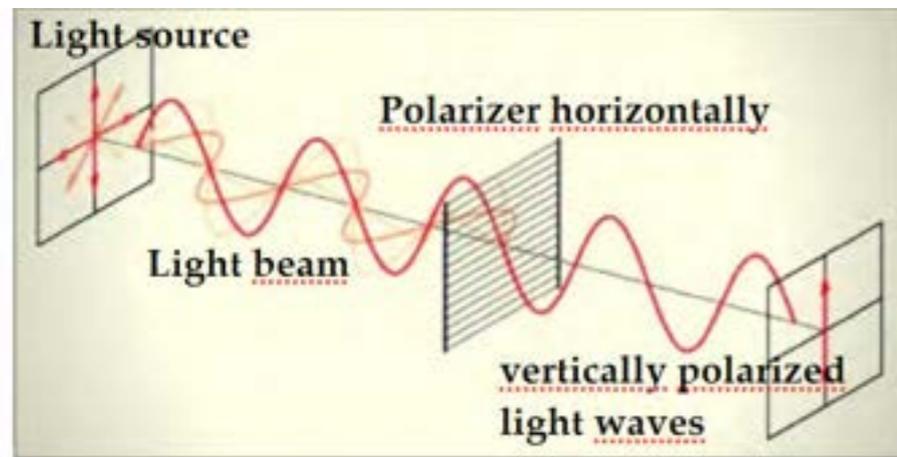
Bob kennt den Schlüssel und decodiert durch Binäraddition:

1+1=0 0+0=0 0+1=1 1+1=0 1+0=1 Bob erhält 00101, also F.

Dieses Prinzip des Schlüssels heißt „One-Time-Pad“.

Dabei muss gelten: Der Schlüssel wird nur einmal verwendet, er ist so lang wie die eigentliche Botschaft, der Schlüssel ist absolut zufällig und er ist nur Alice und Bob bekannt.

Polarisation von Licht



In der Abbildung trifft unpolarisiertes Licht auf einen Polarisationsfilter. Das Licht hinter dem Polarisationsfilter ist nun linear polarisiert.

Werden nun zwei Filter, deren Gitter senkrecht aufeinander stehen, hintereinander platziert, so lassen sie **kein** Licht mehr hindurch. (Mehr hierzu findet ihr [hier](#).)

Stehen unsere Polarisationsfilter nicht senkrecht aufeinander, sondern zum Beispiel in einem Winkel von 45° , lassen sie immer noch einen Teil der Lichtwellen durch (nämlich ein Viertel der eingestrahnten Intensität). Im Photon Lab findet ihr Polarisationsfilter, an denen ihr die eben beschriebenen Phänomene beobachten könnt. Probiert verschiedene Winkel aus und beobachtet, wie sich der Anteil an Licht, den die Filter durchlassen, mit dem Winkel verändert. **In unserem Versuch** übertragen wir die Informationen (0 oder 1) über polarisiertes Laserlicht. Normalerweise emittieren Laser **unpolarisiertes** Licht. Das bedeutet, dass Licht jeder Orientierung vom Laser ausgesendet wird. Unser Laser im Versuchsaufbau sendet (fast vollständig) linear polarisiertes Licht aus. Das Licht verlässt den Laser also nur in einer Orientierung und kann nun von sogenannten Polarisationsdrehern (s. Versuchsaufbau) um einen beliebigen Winkel gedreht werden.

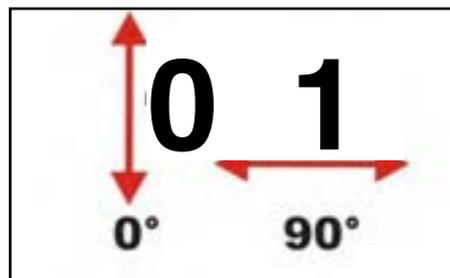
In unserem Versuch verwenden wir $-45^\circ, 0^\circ$ (horizontal), 45° und 90° (vertikal) polarisiertes Licht.

Schlüssel und Code im Versuch

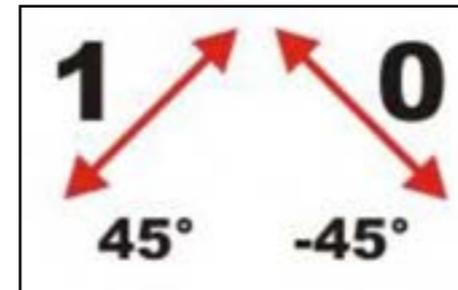
Für die Informationsübertragung stehen zwei verschiedene Basen + und x zur Auswahl. Innerhalb der Basen gibt es je einen Polarisationswinkel für 1 und einen Polarisationswinkel für 0.

Basis +

Basis x



0° Polarisation ist Bit: 0



45° Polarisation ist Bit:1

90° Polarisation ist Bit: 1

-45° Polarisation ist

Bit:0

Will also Alice (der Sender) ein Bit (z.B. 1) verschicken, so wählt sie zunächst eine Basis (z.B. x).

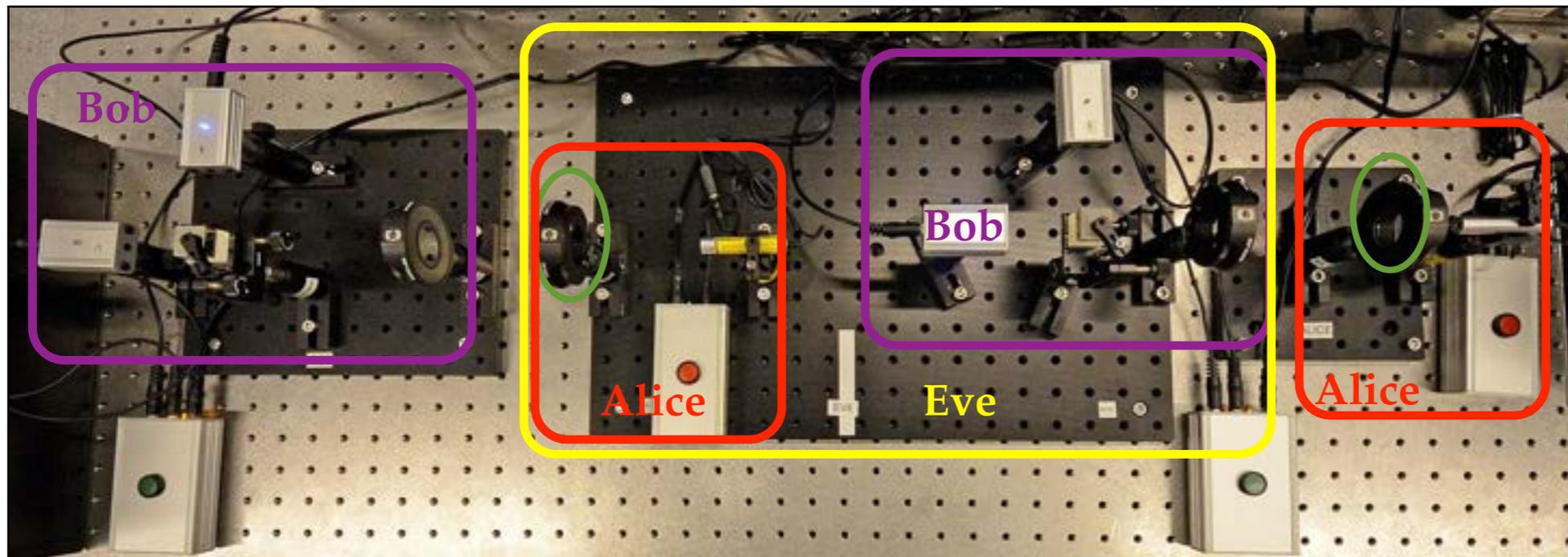
Will man 1 in der Basis x versenden, schickt man Licht, das 45° polarisiert ist. Weiß Bob nun, dass Alice in der Basis x sendet, so kann er die 1 problemlos empfangen. Hat er die falsche Basis, kann er mit der Information, genau wie vorhin bei der Binäraddition, nichts anfangen.

Die Basen verschlüsseln die Nachricht zwar, reichen jedoch nicht aus. Eine Person, die den Binärcode kennt, könnte die Nachricht so leicht abhören. Deswegen benötigt man einen Schlüssel aus 0 und 1 zu erstellen, der nur dem Sender und Empfänger bekannt und somit sicher ist.

Du kannst hier das Prinzip der Basen anhand des [QeyGens](#) besser nachvollziehen.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau setzt sich aus zwei identischen Hälften zusammen:

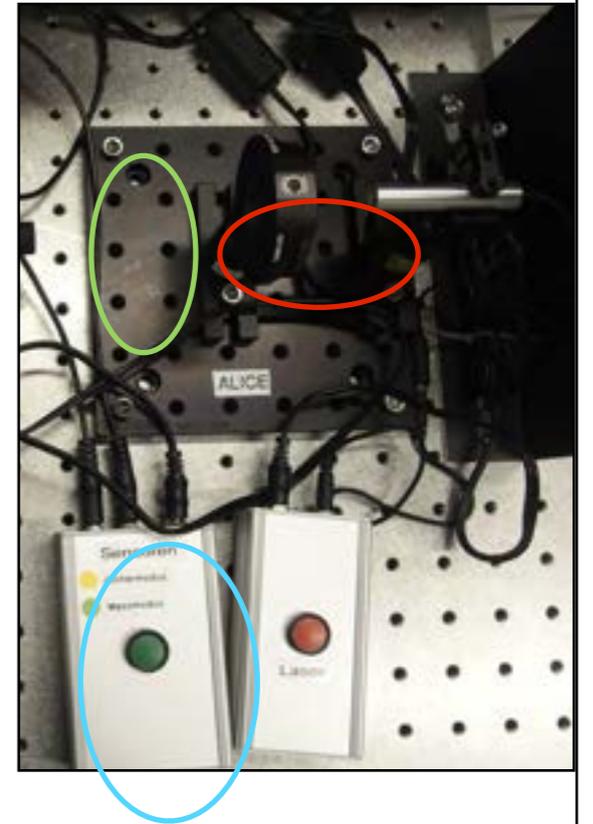
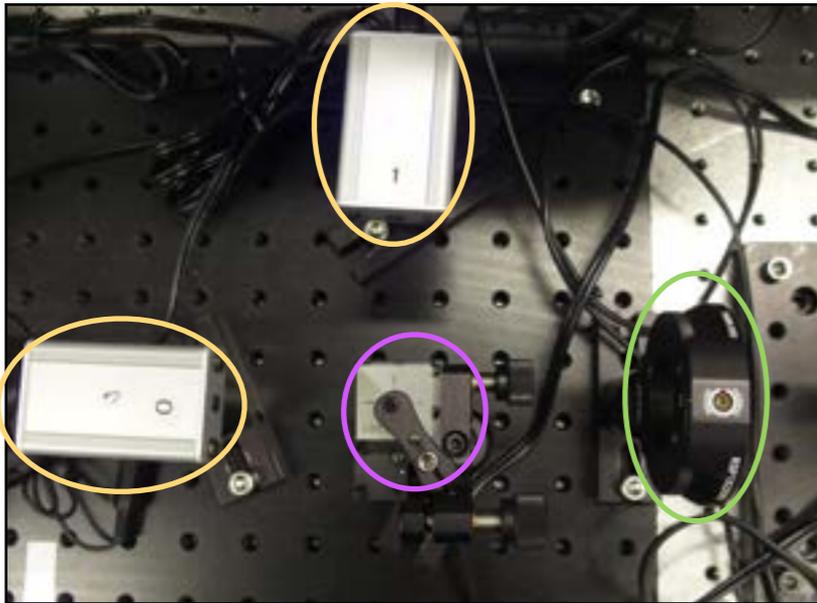


Ganz links steht die Empfängereinheit Bob, ganz rechts befindet sich Alice und in der Mitte steht Eve, die eigentlich aus 1x Alice und 1x Bob besteht.

Alice besteht aus:

- einem **Laser**
- dem zugehörigen **Feuerknopf** (kurzes Drücken um ein Bit (0 oder 1) zu übertragen, langes Drücken: Laser dauerhaft an zum Justieren.)
- einem **Polarisationsdreher** (mit den Einstellungen $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ und 90°)

Der Polarisationsdreher dreht die Polarisation des Lichtes um den gewünschten Winkel. Hier entscheidet sich, welches Bit (0 oder 1) in welcher Basis versendet wird.



Bob besteht aus:

- einem **Polarisationsdreher** (mit den Einstellungen 0° und 45°)
- einem polarisierendem **Strahlteiler**
- zwei **Detektoren**

Der Strahlteiler lässt 0° polarisiertes Licht zum 0-Detektor durch und reflektiert 90° polarisiertes Licht zum 1-Detektor (+Richtung). Licht, das in 45° oder -45° polarisiert ist (xRichtung), wird im **Justiermodus** zu 50% durchgelassen und zu 50% reflektiert d.h. **beide Detektoren leuchten auf**. Im **Messmodus** leuchtet einer der beiden Detektoren **zufällig** (50:50) auf, dadurch wird elektronisch die Messung mit einzelnen Photonen simuliert. Der Strahlteiler kann also nur + zuverlässig sortieren, x ergibt ein zufälliges Ergebnis.

Wenn also beide Detektoren aufleuchten, ist unser Ergebnis nicht eindeutig.

Will Bob zum Beispiel in der Basis x empfangen, steht sein Dreher auf 45° . Es gibt nun ein eindeutiges Ergebnis, wenn Alice 45° oder -45° schickt. Da Bobs Dreher jetzt noch einmal um 45° dreht und damit insgesamt 0° oder 90° polarisiertes Licht erzeugt ($45^\circ + 45^\circ = 90^\circ$ oder $-45^\circ + 45^\circ = 0^\circ$), spricht immer nur ein Sensor an.

Übertragen von Daten ist also nur bei gleicher Basis möglich.

BASIS	+	+	X	X
Bit	0	1	1	0
Winkel am Dreher	0°	90°	45°	-45°

Wollt ihr ein Bit versenden, bringt den Dreher in die gewünschte Polarisation und drückt dann den Feuerknopf. Alice sendet dann das Bit an Bob.

Insgesamt gibt es folgende Möglichkeiten:

WINKEL BEI ALICE	0°	0°	90°	90°	-45°	-45°	45°	45°
Versendetes Bit bei Alice	0	0	1	1	0	0	1	1
Basis bei Alice	+	+	+	+	x	x	x	x
Winkel bei Bob	0°	45°	0°	45°	0°	45°	0°	45°
Basis bei Bob	+	x	+	x	+	x	+	x
Ergebnis am Sensor	0	keines	1	keines	keines	0	keines	1

Hinweis: Bevor ihr mit dem Versuch beginnt, probiert einmal alle Möglichkeiten an beiden Aufbauhälften durch. Im Justiermodus leuchten beide Detektoren auf, wenn ihr kein eindeutiges Ergebnis erhaltet (in der Tabelle „kein Ergebnis am Sensor“).

Erhaltet ihr nicht immer das passende Ergebnis, wendet euch an die Laborleitung.

Generierung des Schlüssels

Alice und Bob wollen nun einen Schlüssel für die Nachricht generieren - Zunächst noch ohne Eve (wähle eine Hälfte des Versuchsaufbaus). Falls noch nicht geschehen, wechsele vom Justiermodus in den Messmodus.

1. Alice wählt zufällig eine Basis und zufällig ein Bit, schickt es an Bob und notiert Bit und Basis.
2. Bob wählt zuvor zufällig eine Basis. Im **Messmodus** erhält Bob immer ein **eindeutiges** Ergebnis. Er weiß jedoch nicht, ob das Ergebnis in der richtigen **Basis** gemessen wurde. Bob hat eine 50% Wahrscheinlichkeit, die richtige Basis zu wählen (0° oder 45°).

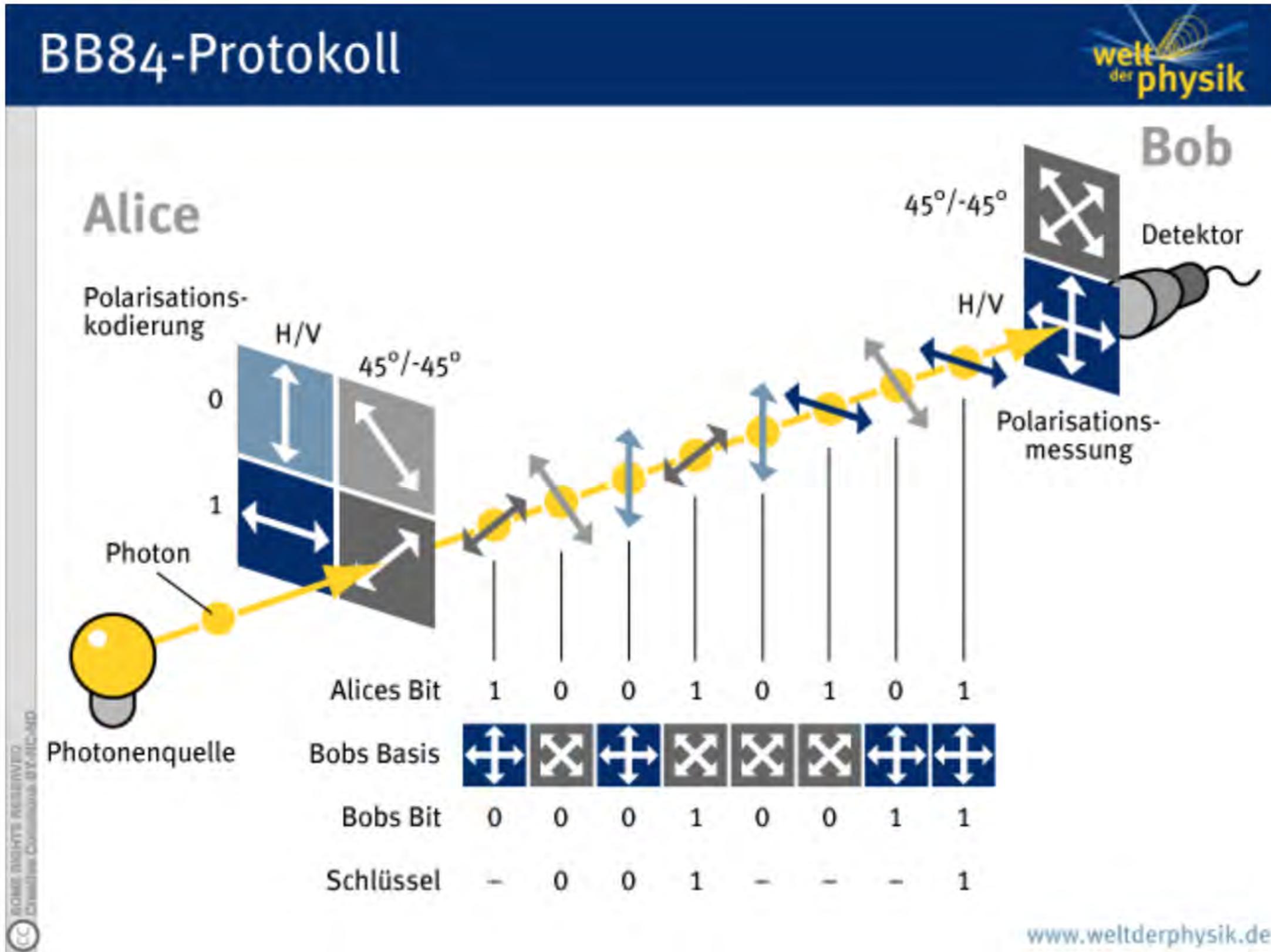
Will man also einen 10 Bit langen Schlüssel, muss man den Vorgang ca. 20 mal durchführen.

3. Bob notiert sich die Ergebnisse.

Dann vergleichen beide öffentlich z.B. über eine Telefonleitung.

Bob teilt Alice mit, welche Basen er gewählt hat, nicht jedoch, welches Bit er empfangen hat. Alice sagt ihm daraufhin, bei welchen Basen er **richtig** lag. Nur die **Basen** werden also öffentlich gemacht, nicht jedoch die **Bits**, die Bob empfangen hat! Die falschen Basen werden **durchgestrichen**, die Abfolge der **Bits**, die durch die richtigen Basen übertragen wurden ist der Schlüssel, der dann auf die Nachricht gemäß der **Binäraddition** (siehe Abschnitt 2) angewandt wird.

Die Graphik veranschaulicht selbiges Prinzip noch einmal.



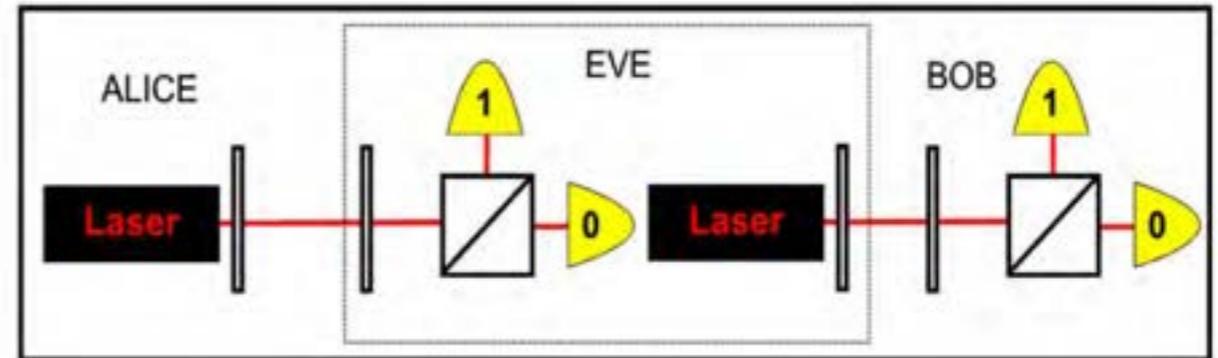
Jetzt kann Alice die Nachricht wie in Abschnitt 2 verschlüsseln und öffentlich abschicken. Bob bekommt die verschlüsselte Nachricht und kann sie mithilfe des Schlüssels verstehen.

Achtung! Hier besteht ein signifikanter Unterschied zwischen dem vorliegenden Versuch im Justiermodus und der echten Quantenkryptographie! In Wirklichkeit würde man eine **Einzelphotonenquelle** verwenden. Das heißt, das Photon einer falschen Basis würde im Strahlteiler trotzdem einem „eindeutigen“ Sensor zugeordnet (zu 50% 1 und zu 50% 0). Dies wird im **Messmodus** simuliert. Im **Justiermodus** kann man schon durch das Blinken beider Sensoren sagen, dass die beiden Basen nicht übereinstimmen.

Entdecken des Lauschers

Es wird wie vorhin ein Schlüssel generiert.

1. Alice wählt zufällig eine Basis und ein Bit; Bob wählt zufällig die Empfangsbasis.
2. Eve wählt ebenfalls zufällig eine Empfangsbasis (Am rechten Dreher von Eve ist wie bei Bob nur 0° oder 45° möglich, da er ja zum Empfangen dient).
3. Eve empfängt nun eine 0 oder 1. Sie weiß jedoch nicht, ob sie in der richtigen Basis empfangen hat. Sie kann also aufgrund des "**no-cloning-theorem**" nicht das gleiche Photon an Bob weitersenden.



Eve sendet immer in derselben Basis, in der sie empfängt. Falls Eve in derselben Basis wie Alice ist, kann sie das Bit richtig weiterleiten. Falls nicht, sendet sie das zufällig empfangene Bit in der **falschen** Basis an Bob.

Wenn Bob und Alice nun ihre Basen vergleichen, müssen sie, um Eve zu entdecken, auch einige Bits abgleichen. Treten dabei Unterschiede auf (z.B. Alice sendet 1 in x, Bob empfängt in x, erhält aber 0), dann ist ein Lauscher in der Leitung! Es werden hierbei nur die Bits verglichen, bei denen Bob und Alice **dieselbe** Basis haben.

Versuchsdurchführung

Führt den Versuch als Rollenspiel durch. Stellt hierzu den Detektor auf **Messmodus**.

Verteilt die Rollen von Alice, Bob und Eve.

Sprecht während des Versuchs, außer bei den „**öffentlichen Telefonaten**“ **nicht** miteinander und schaut **nicht** auf die Zettel der anderen!

Überträgt danach drei Buchstaben (z.B. LMU oder MAP oder FCB) mit Hilfe der Anleitung und der laminierten Tabellen. **Entdeckt** dabei Eve!

Eine „Lösung“ gibt es natürlich nicht, da ja einige Schritte auf Zufall basieren. Falls ihr nicht weiterkommen gibt es hier eine kleine **Schritt-für-Schritt Anleitung**.

VERSUCH 24: QM Quantenzufallsgenerator

QM Quantenzufallsgenerator

Wie kann ich Zahlen zufällig generieren? -
Nein, Google Zufallszahl ist nicht gemeint.




```
10110000110110001111101101110110001010000000111
00010110000110110001111101101110110001010000000
11000011011000111110110111011000101000000011100
01100011111011011101100010100000001110000110001
00011011000111110110111011000101000000011100001
01100001101100011111011011101100010100000001110
011011000111111011011101100010100000001110000110
```

Unser Ziel: Gute Zufallszahlen selber erzeugen!

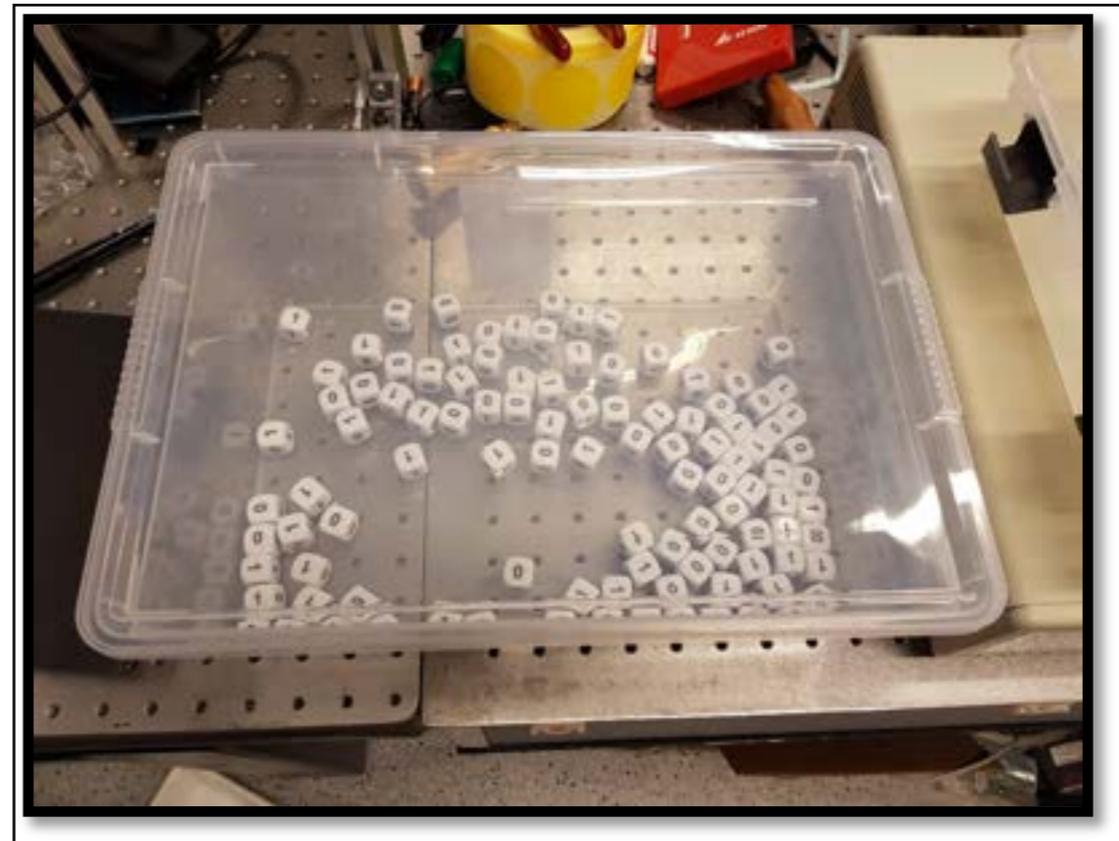
```
10000110110001111101101110110001010000000111000
00110110001111101101110110001010000000111000011
01100001101100011111011011101100010100000001110
00101100001101100011111011011101100010100000001
10000110110001111101101110110001010000000111000
11000111110110111011000101000000011100001100011
00110110001111101101110110001010000000111000011
```

Ist ein Würfelexperiment zufällig?

Das ist eine Box mit genau 100 Würfeln. Diese Würfel sind speziell, denn sie haben zwar 6 Seiten, aber es bietet sich als Lösung nur 0 oder 1 an.

Nun schüttelst du die Box, sodass du eine zufällige Folge von 0en und 1en, eine sog. **Binärzahlenkette**, erhältst.

Wie zufällig sind die Nullen und Einsen tatsächlich?



Kettenlängen-Test: Wie zufällig ist die gewürfelte Binärzahlenkette?

Eine Kettenlänge ist ein Block, der aus Ziffern desselben Typs besteht. Er kann auch aus nur einer einzigen Ziffer bestehen.

Beispiel:

00101001000101010100010101000101010010101010110

In Kettenlängen

aufgeteilt:0-1-0-1-00-1-000-1-0-1-0-1-0-1-000-1-0-1-0-1-000-1-0-1-0-1-00-1-0-1-0-1-0-1-0-11-0

Das Merkmal, mit dem hier **Zufälliges** von **Nicht-Zufälligem** unterschieden werden kann, ist die Länge der längsten Kettenlänge.

Bei 100 Würfeln ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, ca. 95 %, dass mindestens 4 Nullen oder 4 Einsen hintereinander vorkommen, also eine Kette der Länge 4 auftritt. (siehe Glossar)

Kettenlängen-Test: Wie zufällig ist die gewürfelte Binärzahlenkette?

- Die Länge der Zahlenkette mit gleicher Zahlenfolge ist ein sehr gutes Unterscheidungsmerkmal, weil der echte Zufall selbst bei kurzen Folgen mit hoher Wahrscheinlichkeit relativ lange Ketten produzieren wird.
- Oft sind die Ketten bei schlecht erzeugten Zufallsfolgen nicht so lange, weil versucht wird, eine gleichmäßige Verteilung von 0 und 1 sicher zu stellen. Was aber dazu führt, dass es z.B. weniger oft vier hintereinander folgende gleiche Zahlen gibt, und sich somit die Zahl der „kurzen“ Ketten erhöht. **Mit der Anzahl an vorhanden Kettenlängen kann man also Aussagen über die Zufälligkeit von Zufallszahlenfolgen treffen.**

Wir haben festgestellt, wenn wir viele „kleine“ Ketten haben, ist davon auszugehen, dass die Zufälligkeit eher gering ist.

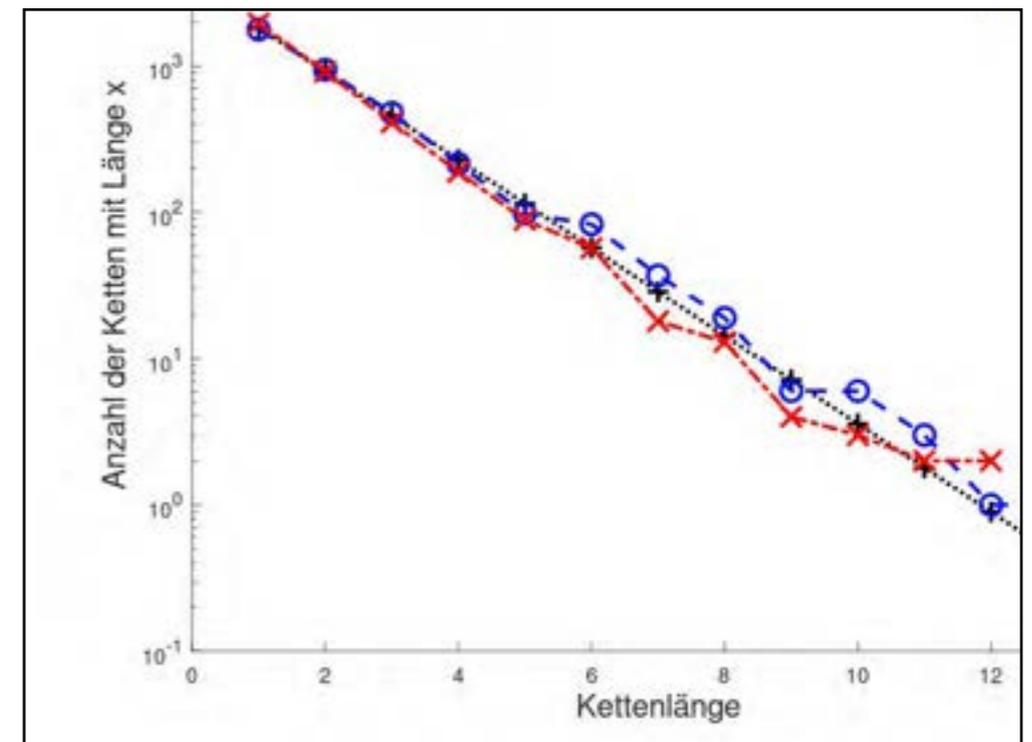
Kettenlängen-Test: Wie zufällig ist die gewürfelte Binärzahlenkette?

Hier ist die graphische Darstellung von 10.000 Zufallszahlen, die auf die Kettenlängen analysiert werden.

Auf der x-Achse kann man die möglichen Kettenlängen ablesen (hier bis maximal 12) und auf der y-Achse liest man die Häufigkeit der vorhandenen Ketten.

In der Abbildung rechts siehst du, dass zum Beispiel die Häufigkeit von einer Kette der Länge 6, ca. 80 mal vorkommt (orientiert an den roten Messwerten, also der **1er Ketten**) und ca. 90 mal für die **0er Ketten** (blauer Graph).

Die Kette kann entweder so aussehen 11111 oder so 000000. Es ist egal, ob es Nullen oder Einsen sind, wichtig ist die Wiederholung der gleichen Zahl (0/1) hintereinander. Also kommen bei einer 10.000 zufälligen Binärzahlen ca. 170 mal Ketten der Länge 6 vor. Viele „Lange Ketten“ sind also keinesfalls unwahrscheinlich.



Würdest du das auch?!



Würfel: Zufall?

Mit dem Würfel kannst du Zufallszahlen generieren - Aber was wäre, wenn wir würfeln und uns die genauen Parameter wie Luftwiderstand, Masse des Würfels, Abwurfhöhe und Neigungswinkel usw. beim Würfeln bekannt sind?

Sind die Zahlen, die gewürfelt werden, noch zufällig?

Es ist zwar unmöglich, alle Parameter gleichzeitig zu kennen, dennoch sprechen wir hier bei den sog. **physikalisch** erzeugten Zufallszahlen nicht von Zufall, denn die Gesetze der klassischen Physik sind im Kern eindeutig bestimmbar (Anton Zeilinger).

Eine weitere und sehr bekannte Alternative sind computergenerierte Zufallszahlen. Ob sich diese für „gute Zufallszahlen“ eignen, zeigt sich in den darauffolgenden Folien.

Computer generierte Zufallszahlen

Vom Computer erzeugte Zufallszahlen sind möglich, jedoch werden sie normalerweise **Pseudozufallszahlen** genannt.

Diese Pseudozufallszahlen werden über komplexe mathematische Modelle verwirklicht.

(Beispiel: **Von Neumann Verfahren**)

Computergenerierte Zufallszahlen sind meist mathematische Formeln (von Neumann-Verfahren siehe Glossar) nach einem bestimmten Algorithmus. Ist der **Startwert** also bekannt, kann man die gesamte erzeugte Zufallszahlreihe nachverfolgen, sodass jede einzelne Zahl nicht mehr zufällig erscheint.

Es ist zwar schwer auf den exakten Startwert zu kommen, jedoch besteht die Möglichkeit, weshalb wir auch hier nicht von „echten“ Zufallszahlen sprechen können (=Pseudozufallszahlen).

Zufallszahlenerzeugung: Übersicht

Anbei eine kleine Übersicht zu den bisherigen Themen Zufallszahl erzeugen

Physikalische Zufallszahl

Pseudozufallszahl algorithmische
Zufallszahlen

(kein echter Zufall)



Zufallszahl nach klassischer
Physik

(kein echter Zufall)

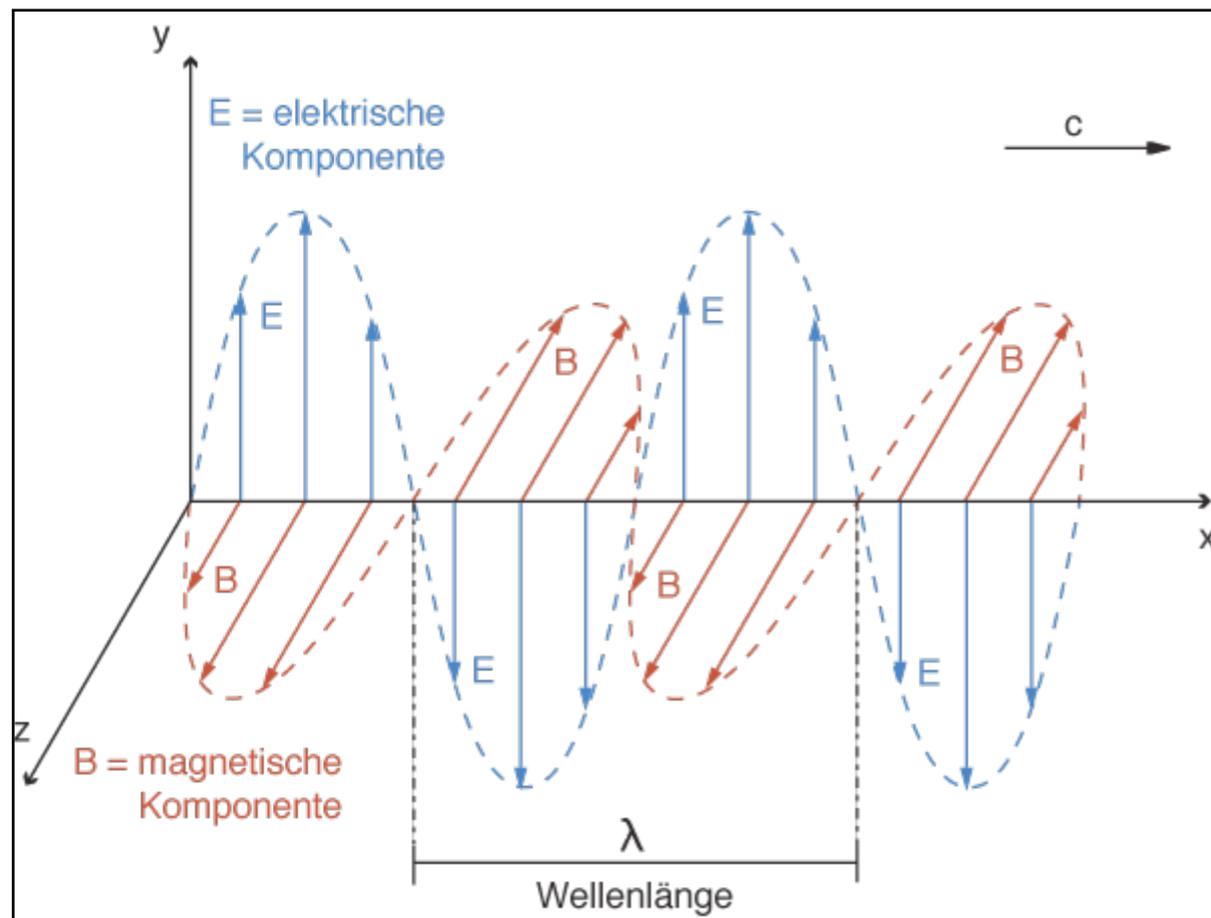
nur dem Anschein nach zufällig
wegen der Schwierigkeit
der Parameterbestimmung



Quantenphysikalische
Zufallszahl (es gelten
spezielle Regeln in der
Quantenphysik)



Grundlagen der Optik: Elektromagnetische Welle



Licht ist eine **elektromagnetische Welle**; d.h. sie besteht aus elektrischen und magnetischen Feldern, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung oszillieren (=Transversalwelle).

Grundlagen: Optik

Polarisation:

Eine Lichtwelle schwingt senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Wenn das elektrische Feld nur in einer Ebene schwingt, dann ist die Lichtwelle linear polarisiert.

Polarisatoren sind Filter, die nur Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung, d. h. Polarisation durchlassen. In unserem Fall ist das Licht, nachdem es den polarisierten Strahlteilerwürfel durchquert hat, stets in dieselbe Richtung linear polarisiert. Hier ist das Licht waagrecht oder senkrecht polarisiert.



Das ist der Strahlteiler aus dem Experiment:

Photonen, die reflektiert werden (siehe Pfeil mit den **Punkten**) sind senkrecht zur Tischebene polarisiert und Photonen, die transmittiert werden (siehe Pfeil mit den langen **parallelen Doppelpfeilen**) sind waagrecht zur Tischebene polarisiert.

Grundlagen: Licht hat Wellen- und Teilcheneigenschaften

Es ist wichtig, zu verstehen, dass sich Licht wie eine Welle ausbreitet, aber auch aus einzelnen Photonen besteht (Welle-Teilchen-Dualismus). Die Wellen-Eigenschaft des Lichts zeigt sich beispielsweise bei der Interferenz. Interferenz bedeutet, dass bei einer Überlagerung von zwei Wellen diese sich entweder verstärken (=konstruktive Interferenz) oder abschwächen (=destruktive Interferenz).

Licht hat aber auch Teilcheneigenschaften. Man kann es durch einzelne Energiepakete, sogenannte Photonen beschreiben (siehe z. B hierfür das **Taylorexperiment = Doppelspaltversuch mit einzelnen Photonen**)

Was sind Quanten?

Quantenobjekte (z.B. Photonen, Elektronen) sind weder kleine Kügelchen noch Wellen oder Wölkchen. Sie sind nichts von dem, was wir aus unserer Alltagserfahrung kennen. Es gibt kein klassisches Bild, mit dem man alle Eigenschaften von Quantenobjekten beschreiben bzw. erklären könnte. (Kopenhagener Interpretation)

Quantenteilchen breiten sich aus wie Wellen – Wechselwirken mit Materie wie ein Teilchen. Auch wenn Photonen nicht geteilt werden können, scheinen sie mit sich selbst wechselzuwirken (zu interferieren).

*Das kleinste Quant an Energie hat die Größe, die man durch Multiplikation des planckschen Wirkungsquantum „h“ mit der Frequenz errechnen kann. $E=h*f$*

*Das Planck'sche Wirkungsquantum $6,626 * 10^{(-34)}$ Js ist eine Naturkonstante, wie beispielsweise die Lichtgeschwindigkeit 299.792.458 m/s (für Glossar)*

Grundlagen: Licht hat Wellen- und Teilcheneigenschaften

Photonen

- ... sind Quantenobjekte.
- ... sind Elementarteilchen, sie sind unteilbar.
- ... tragen elektromagnetische Energie und Impuls
- ... können polarisiert werden.

Für Quantenobjekte (Photonen) können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über deren Zustände getroffen werden.

- Der Welle-Teilchen Dualismus beschreibt das Licht aus heutiger Sicht.
- Es ist wichtig, dass beide Charakteristika „Licht als Welle“ und „Licht als Teilchen“ gleich bedeutend sind. (Welle-Teilchendualismus)

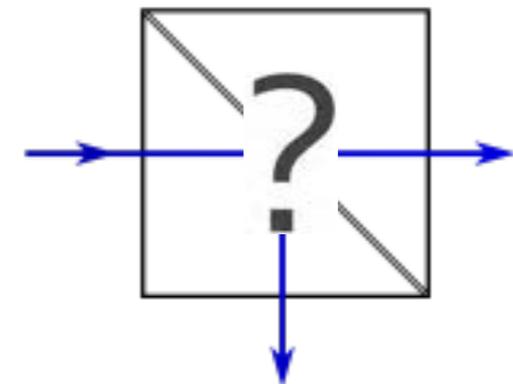
Grundlagen Quantenphysik

Das faszinierende an Quantenobjekten ist, dass man bei einer größeren Anzahl an Photonen durch Wahrscheinlichkeiten gute Voraussagen treffen kann, jedoch nie für ein einzelnes. Der Quantenphysik gelingt es mittels stochastischer Verfahren eine Beschreibung für die teils widersprüchlichen Verhaltensweisen von Quantenobjekten zu finden.

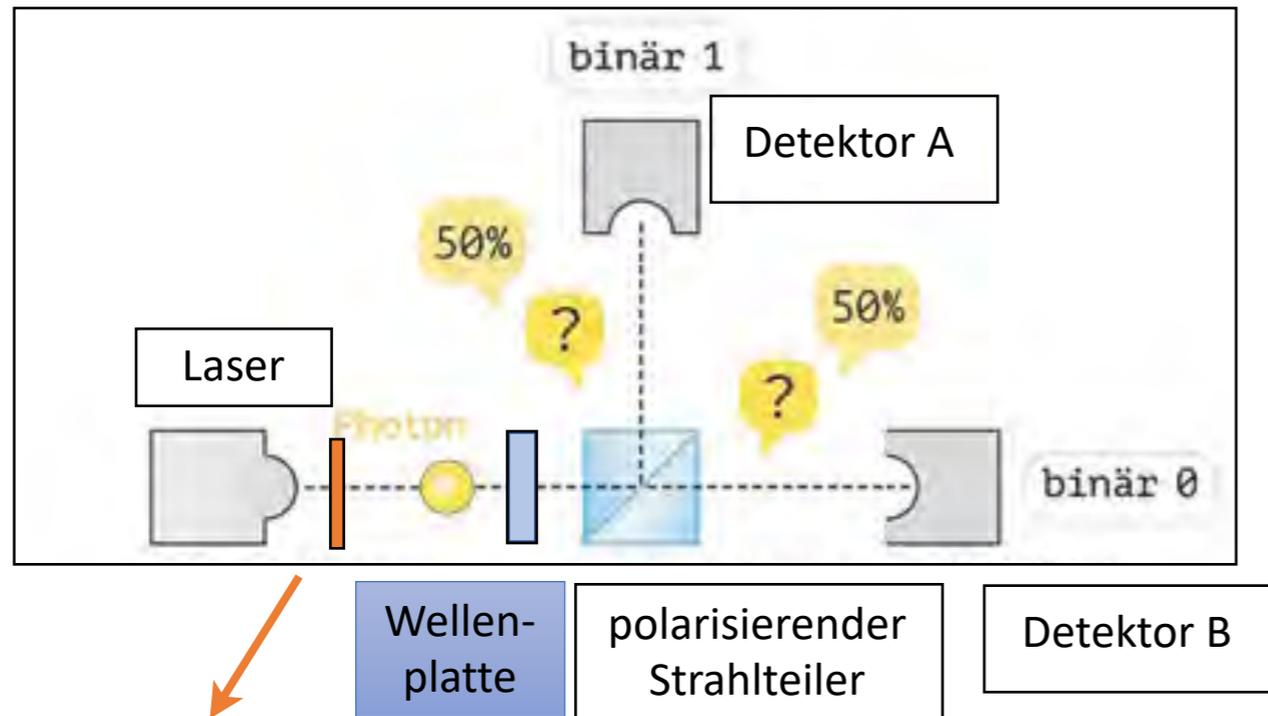
Einzelne Quantenobjekte befinden sich in überlagernden Zuständen, diese nennt man auch **Superposition**. Das bekannteste Beispiel ist Schrödingers Katze, bei der die Katze lebendig und tot gleichzeitig sein kann.

Ob sich ein einzelnes Photon entscheidet an einem Strahlteiler reflektiert oder transmittiert zu werden, bleibt zufällig. Im **Strahlteilerwürfel** befindet sich das Photon genauso wie Schrödingers Katze in sich überlagernden Zuständen (**Reflexion** / Transmission).

Für eine **Vielzahl** an Photonen kann man (im Mittel) aber Wahrscheinlichkeitsaussagen von 50 % für die Reflexion und 50% Transmission, treffen.



Skizze: Aufbau



Absorberplättchen zur Abschwächung des Lichtstrahls

Laserlicht wird durch die Dunkelfilterplättchen sehr stark abgeschwächt, sodass nur noch vereinzelt Photonen an den Strahlteiler gelangen. Sobald sich das Photon am polarisierenden Strahlteiler entweder für waagrechte (horizontal) oder senkrechte (vertikal) Polarisation entscheidet, gibt es ein Signal am Detektor A oder B.

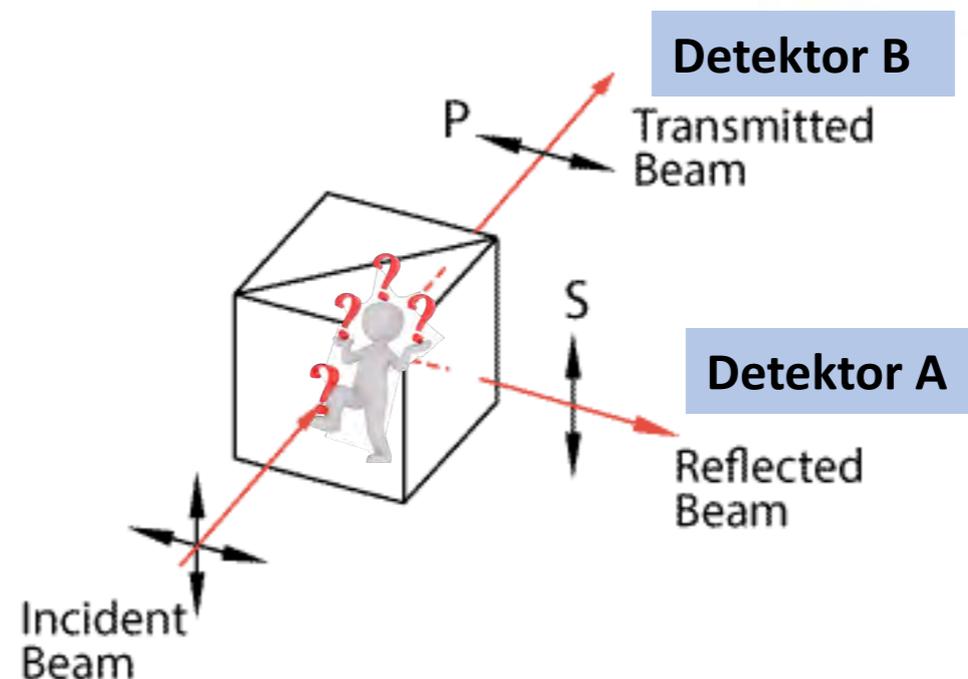
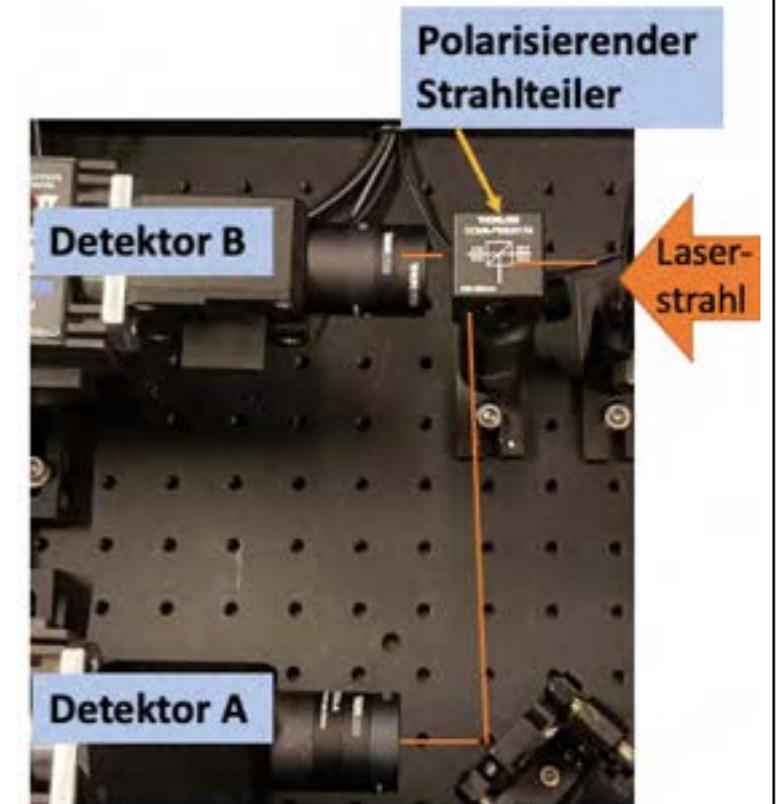
Der Detektor A wird für die Binärzahl 1 und der Detektor B für die Binärzahl 0 verwendet. Wir können nicht wissen, für welchen Detektor sich das Photon entscheidet. Dadurch erreichen wir eine Binärzahlenfolge, die nicht vorhergesagt werden kann, also echt **zufällig** ist.

Strahlteilerwürfel: hier beginnt der Zufall

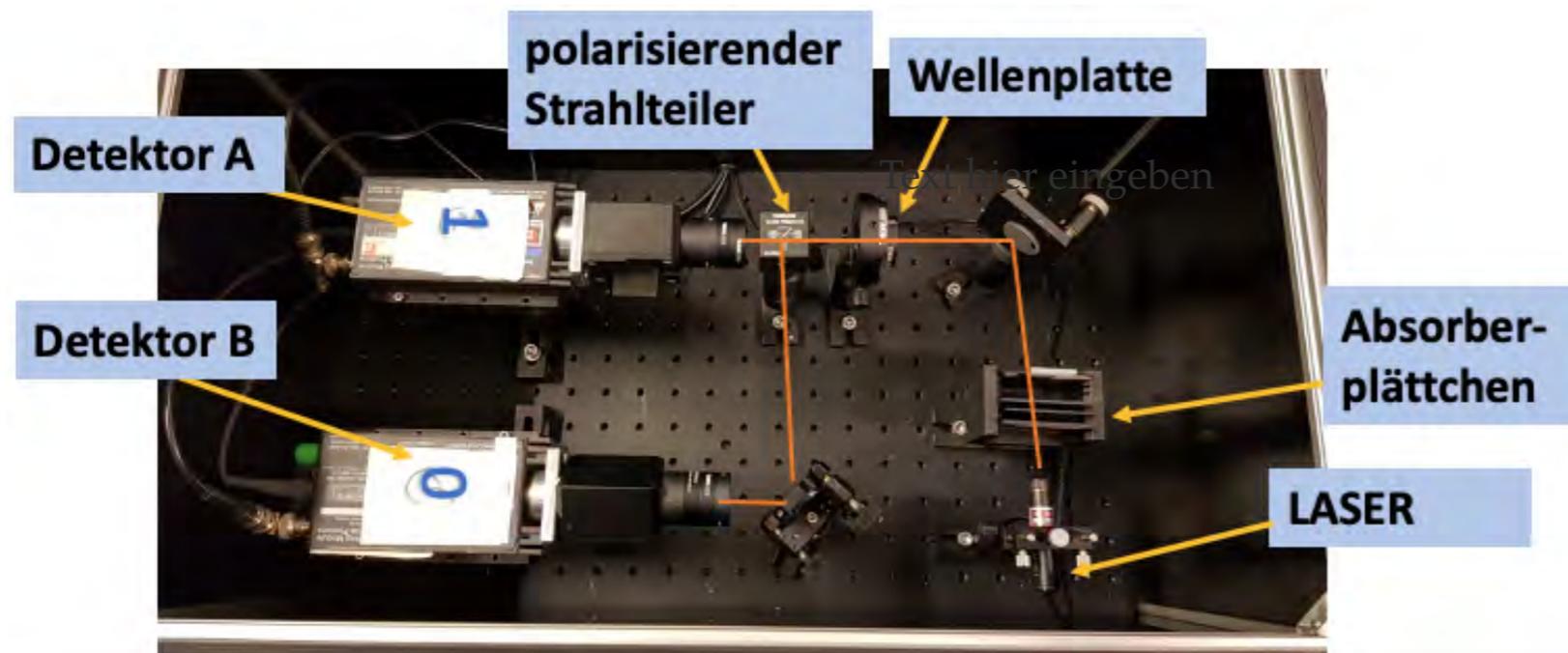
Die Photonen bei unserem Laser sind alle unterschiedlich orientiert. Durch den polarisierenden Strahlteiler werden die Photonen anhand ihrer Polarisation aufgeteilt und zwar in senkrechte bzw. waagrechte Polarisation.

Es gibt also zwei mögliche Wege für ein Photon, Transmission mit waagrechter Polarisation oder Reflexion mit senkrechter Polarisation – jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 %.

Für welchen Weg sich das einzelne Photon entscheidet
Ist rein **zufällig**.



Realer Aufbau: Quantenzufallsgenerator



Die Zufälligkeit einzelner Photonen macht man sich beim Quantenzufallsgenerator zu nutze.

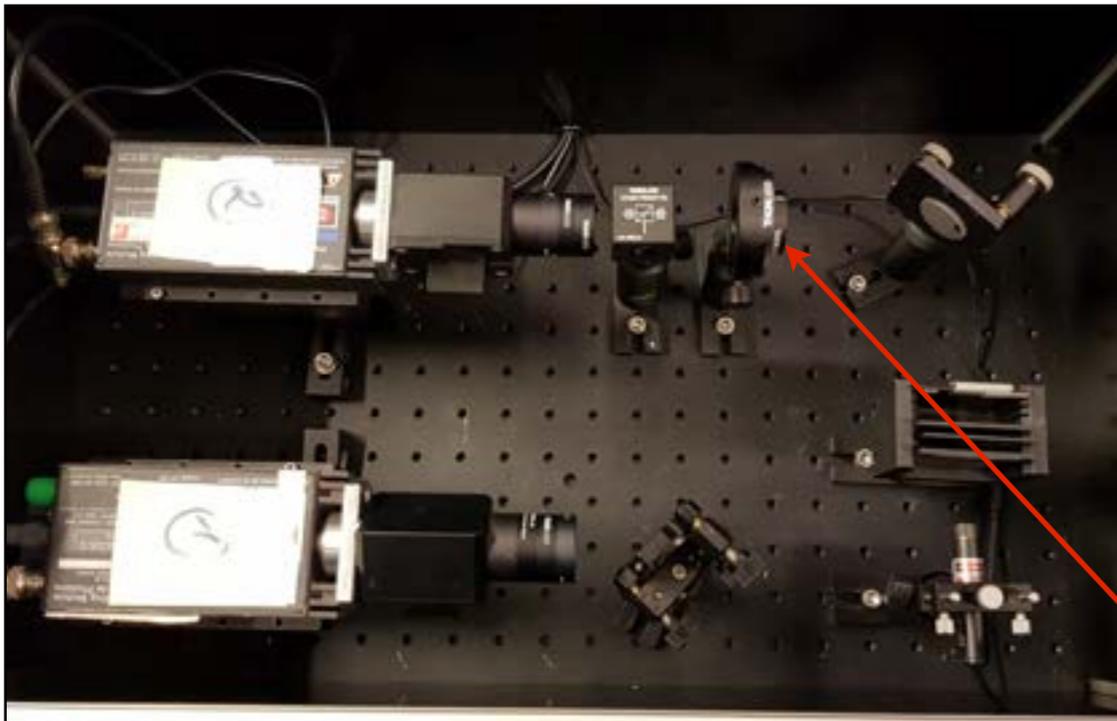
Für den Versuch benötigen wir einen Laser. Damit nur wenige Photonen, die Einzelphotonendetektoren erreichen muss das Laserlicht mit Hilfe von Filtern, die direkt auf die Einzelphotonendetektoren angebracht sind, stark abgeschwächt werden.

(Die Absorberplättchen sind nicht notwendig.) Die Photonen werden rein zufällig beim **polarisierenden** Strahlteiler entweder reflektiert mit senkrechter Polarisation oder transmittiert mit waagrechter Polarisation. Durch das Festlegen der Detektoren

Transmission → binäre 0, **Reflexion** → binäre 1

ist das Ergebnis eine vollkommen zufällige Bitfolge.

Aufbau: Quantenzufallsgenerator



Es gibt Laser, die linear polarisiertes Licht emittieren, aber dieser hat nur eine gewisse Vorzugsrichtung in der er stärker polarisiert ist. Vor dem Strahlteiler, welcher optimalerweise eine 50:50 Strahlverteilung ermöglicht, ist eine Wellenplatte $\lambda/2$ positioniert. Durch die Wellenplatte verzögern wir sozusagen die Vorzugsrichtung des Laser in der er stärker schwingt und erreichen eine gleiche Intensität in den beiden Detektoren.

Die $\lambda/2$ - Wellenplatte ist ein optisches Bauelement, das die Polarisation von Licht verändert, dadurch wird die gleiche Intensität in den beiden Detektoren erreicht.

Quantenzufallsgenerator nutzen

Schritt 0: Das Einschalten der Spannungsgeräte:
Drücke zuerst den schwarzen Knopf rechts da-
nach den silbernen Schalter links

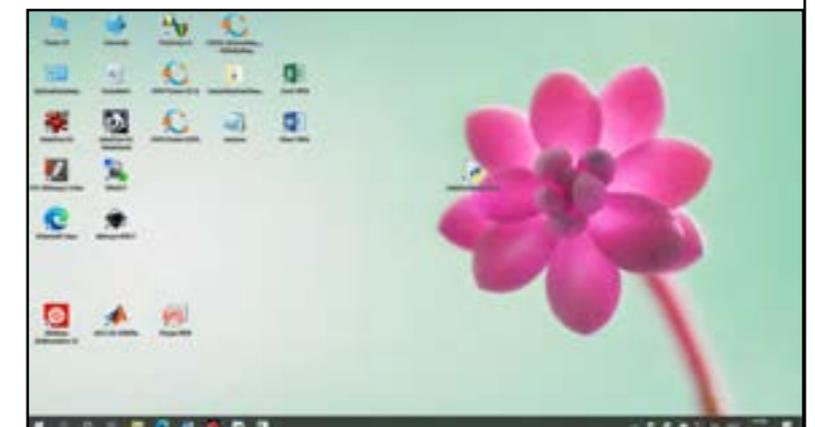
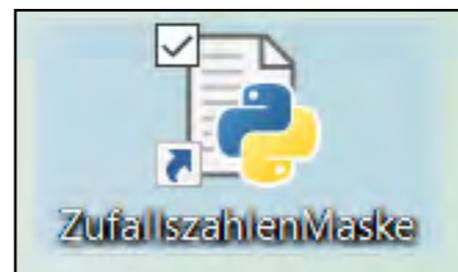
Schritt 1: Die Spannungsgeneratoren für die Einzelphotonendetektoren einschalten (wenn diese bereits eingeschaltet sind, weiter zu Schritt 3)

Schritt 2: Heb den Deckel des Experimentes ab und verschaffe dir einen Überblick über das Experiment. Deckel schließen. **WICHTIG!**

Schritt 3: Starte das Programm Pythen (Passwort vom Laptop: PhotonLab) und drücke auf Start. Sobald du auf Stopp drückst werden die Zufallszahlen ermittelt.



Das obere Gerät gehört zu Detektor A und das untere zu Detektor B

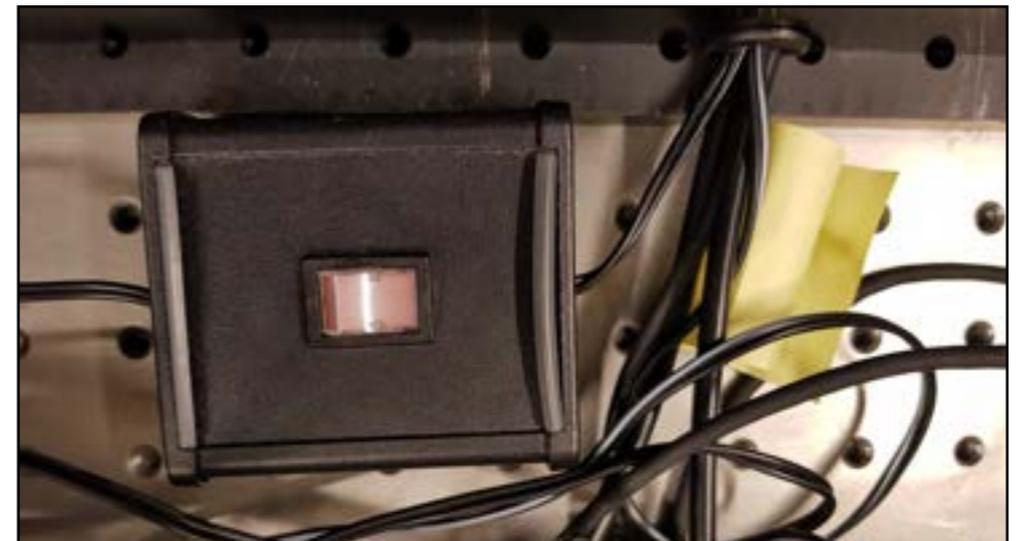


Quantenzufallsgenerator nutzen

Achtung!

Sobald der Laser eingeschaltet wird muss der Deckel aufgesetzt werden. Die Einzelphotonendetektoren sind **sehr sensibel** und reagieren auf sämtliche Licht-einstrahlung und können daher sehr schnell zerstört werden.

Schritt 4: Laser einschalten (Schalter ist hinter der Box)



Erklärung zum Programm

Im Programm gibt es **Fragezeichen-Tools**, dort wird der Bereich erklärt und meist geschildert, wie wir die Zufallszahlen aus dem Quantenzufallsgenerator nutzen.

Quantenzufallsgenerator

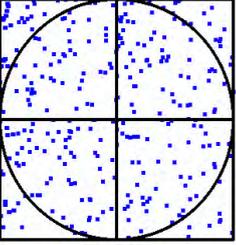
Zufallszahlen:

```
0011001000001110001111011000110000001000101100010101011101110010001110110001010111001010111011010101
00111001100110000110010100000011011001000000101110101100000010110111010001110001110000101100010000001
10010011000110100000100100001011011000000110001010011100001111010000111001000010111000110100100100000
0111011101101000101001001001110001000101111111100001110001000100010001000000011011110110101010000001
10001110101011111010111100001111000011100001100001000111100000010000111100110000001001001101111
```

Detektor Verhältnis

55 : 45

Kreiszahl Pi bestimmen

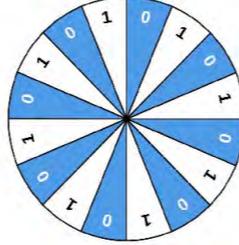


Berechnetes Pi: 3.074

Kettenlängentest

Länge	Anzahl
1	664
2	291
3	131
4	67
5	30
6	13
7	0

Glücksrads



Photonen sorgen auf den Detektoren für Spannungsimpulse, diese werden für den Detektor A als Binärzahl 1 und für den Detektor B als 0 dargestellt. Das Bild auf dem **Oszilloskop** wird im Glossar genauer thematisiert.

Zufallszahlen können dafür verwendet werden um die Zahl π auf sehr vielen Nachkommastellen richtig zu berechnen. Zufallszahlen können aber auch für die Verschlüsselung von sensiblen Daten verwendet werden à siehe Quantenkryptographie

Eine genaue Beschreibung wie Pi berechnet wird siehst du im Fragezeichen-Tool.

Quantenzufallsgenerator

nutzen:

Quantenzufallsgenerator

Zufallszahlen: ?

```

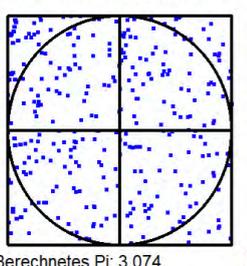
0011001000001110001111101100011000000100010110001010101111011100100011101100010101110010101110110101
00111001100110000110010100000011011001000000101110101100000010110111010001110001110000101100010000001
1001001100011010000010010000101101100000011000101001110000111101000011100100001011100011010010010000
0111011101101000101001001001110001000101111111100001110001000100010010000000011011110110101010000001
1000111010101111101011110000111100011100001100001000111100000010000111100110000001001001101111
    
```

Start
Reset

Detektor Verhältnis ?

55 : 45

Kreiszahl Pi bestimmen ?

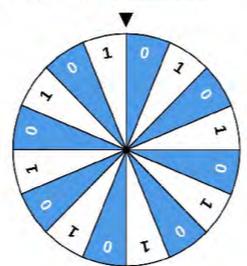


Berechnetes Pi: 3.074 Pi

Kettenlängentest ?

Länge	Anzahl
1	664
2	291
3	131
4	67
5	30
6	13
7	0

Glücksrad Los Geh's ?



Schritt 5: Überprüfe nun durch das Programm in welchem Verhältnis die Detektoren sind.

Schritt 6: Jetzt ist es wichtig mit der Wellenplatte, die vor dem Strahlteiler positioniert ist, eine möglichst gleiche Intensitätsverteilung zu erreichen.

In der nächsten Folie ist der Arbeitsauftrag genau beschrieben.

Deine Aufgabe: Wellenplatte

verstellen

Deine Aufgabe ist es nun mittels der Wellenplatte das Verhältnis der beiden Detektoren so gleichmäßig wie möglich einzustellen.

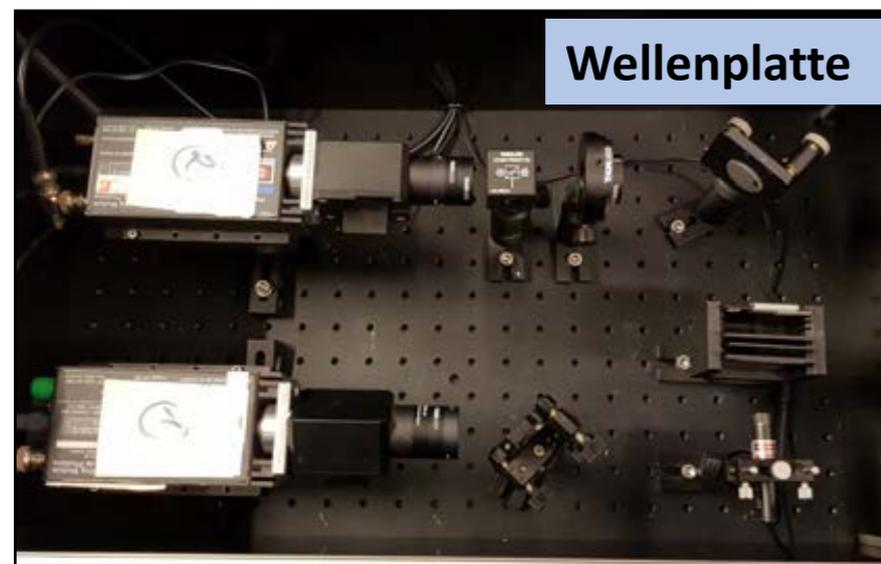
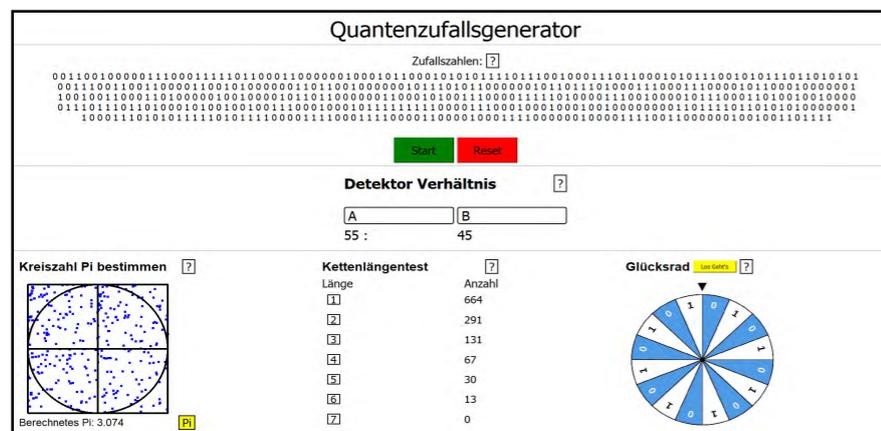
Hierfür musst du folgende Schritte (wahrscheinlich) mehrmals durchführen:

1. Laser wieder ausschalten
2. Deckel öffnen
3. Wellplatte verstellen
4. Deckel wieder schließen
5. Laser einschalten und dann das Programm Restarten

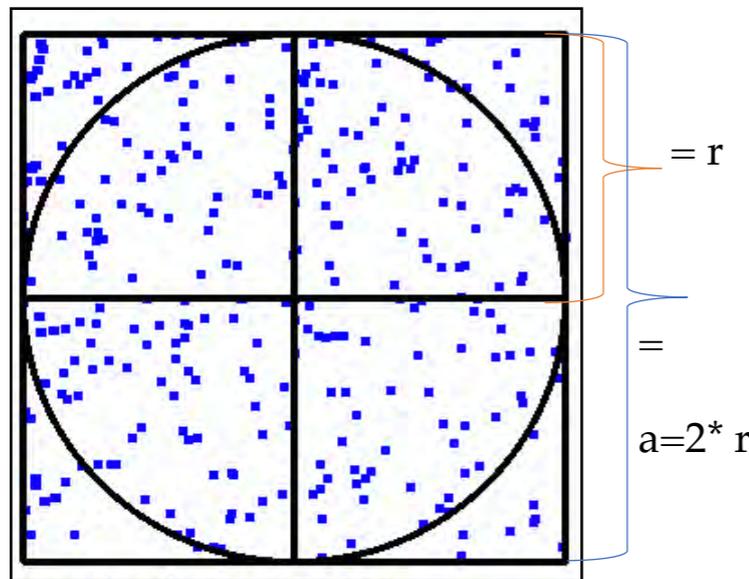
Sobald du auf Restart und Start gedrückt hast, kannst du auf dem Programm sehen wie sich die Veränderung der Polarisation durch Drehung des $\lambda/2$ -Plättchen auf die 50:50 Aussendung der Photonen auswirkt und damit direkt auf die Qualität deiner erzeugten Zufallszahlen.

Es ist sehr schwer eine gleichmäßige Verteilung herzustellen.

Viel Erfolg dabei!



Qualität der Zufallszahlen



Es gibt viele Tests zur statistischen Untersuchung von Zufallszahlen. Ob deine Zufallszahlen gut oder schlecht sind erkennst du beispielsweise durch die Bestimmung der Kreiszahl Pi.

Mit der sogenannten Monte-Carlo-Methode können wir die Kreiszahl bestimmen. Die Zufallszahlen werden gleichmäßig im Quadrat verteilt. Diese gleichmäßige Verteilung ist entscheidend, denn das Verhältnis der Zufallszahlen (hier als Punkte gekennzeichnet N_K) im Kreis zur Gesamtanzahl der Zufallszahlen im Quadrat (N_Q) ist gleich dem Verhältnis der Flächeninhalte von Kreis (πr^2) und Quadrat (a^2) wobei hier $a=2*r$ entspricht.

$$\frac{A_{\text{Kreis}}}{A_{\text{Quadrat}}} = \frac{r^2 * \pi}{a^2} \text{ weil } (a = 2r) \Rightarrow \frac{r^2 * \pi}{(2 * r)^2} = \frac{\pi}{4} = \frac{N_K}{N_Q} \Rightarrow \pi = \frac{N_K}{N_Q} * 4$$

Qualität der Zufallszahlen

Beim Kettenlängentest betrachtet man bei einer zufällig erstellten Binärkette die Häufigkeit bestimmter Kettenlängen. Diese werden dir über das Programm angezeigt. Als Kettenlänge wird die Anzahl von aufeinanderfolgenden gleichen Zeichen bezeichnet.

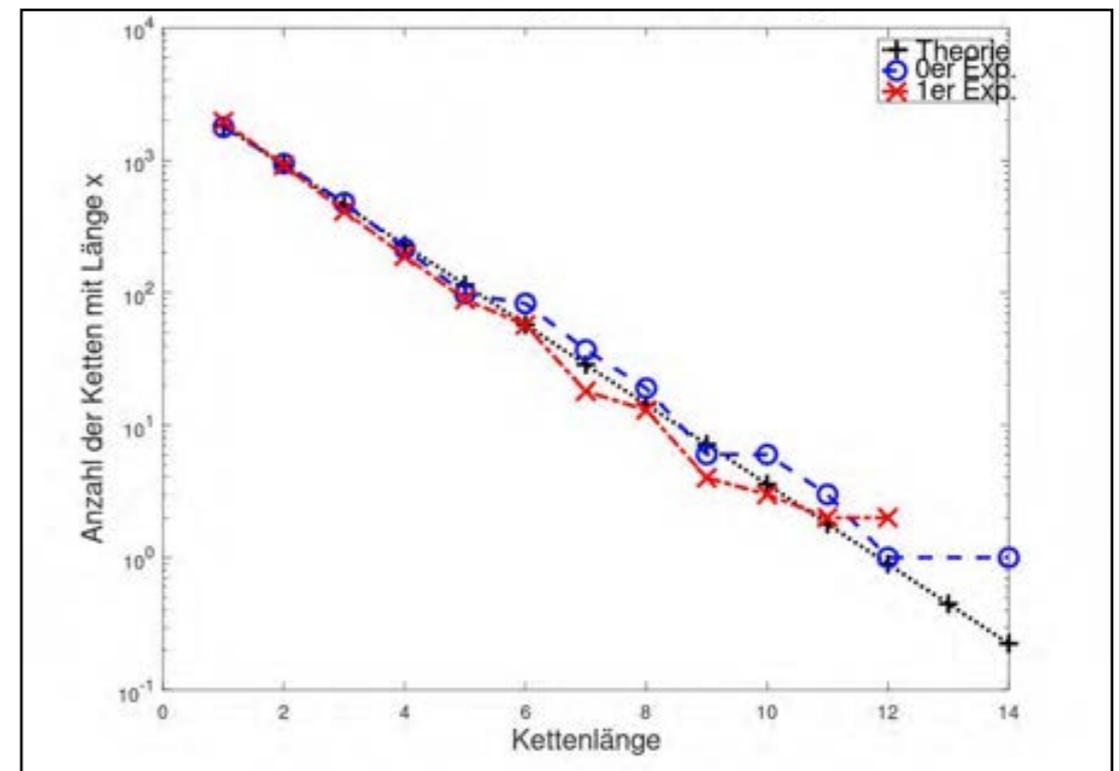
Kettenlängentest	
Länge	Anzahl
1	1646
2	1128
3	786
4	488
5	360
6	260

1. Beispiel aus dem Programm

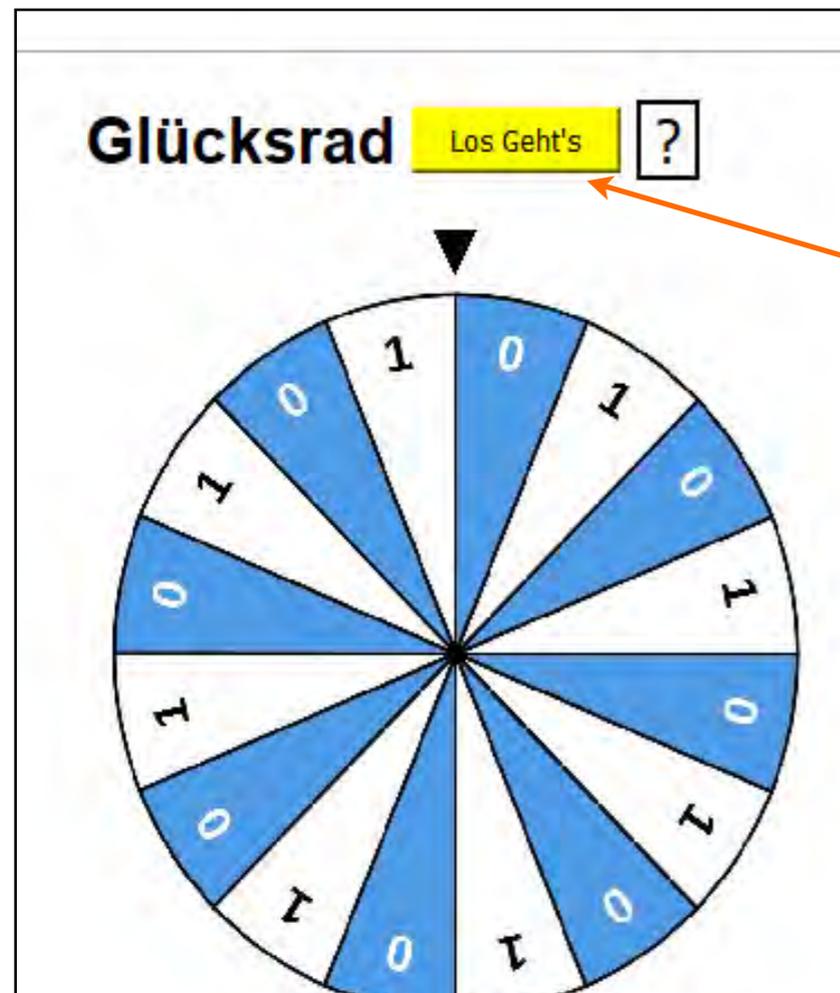
Mathematisch kann man die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Kettenlängen bestimmen siehe Glossar.

Du kannst aber auch qualitativ eine Aussage treffen. Das Auftreten einer **langen** Kette (größer 3) ist umso unwahrscheinlicher, je weniger Ketten überhaupt vorhanden sind. Am ersten Beispiel erkennst du, dass hier die Zufallszahlen eher schlecht sind.

2. Beispiel aus dem Programm guter Zufallszahlen



Erzeugen von Zufallszahlen



Durch die ermittelten Zufallszahlen kann die Rotationsgeschwindigkeit vom Glücksrad verändert werden. Damit kannst du deine persönliche Quantenzufallszahlreihe erzeugen, die wirklich zufällig ist vorausgesetzt dein Detektorverhältnis ist gleichmäßig.

Drücke hierfür auf „Los geht's“

Ende vom Experiment:

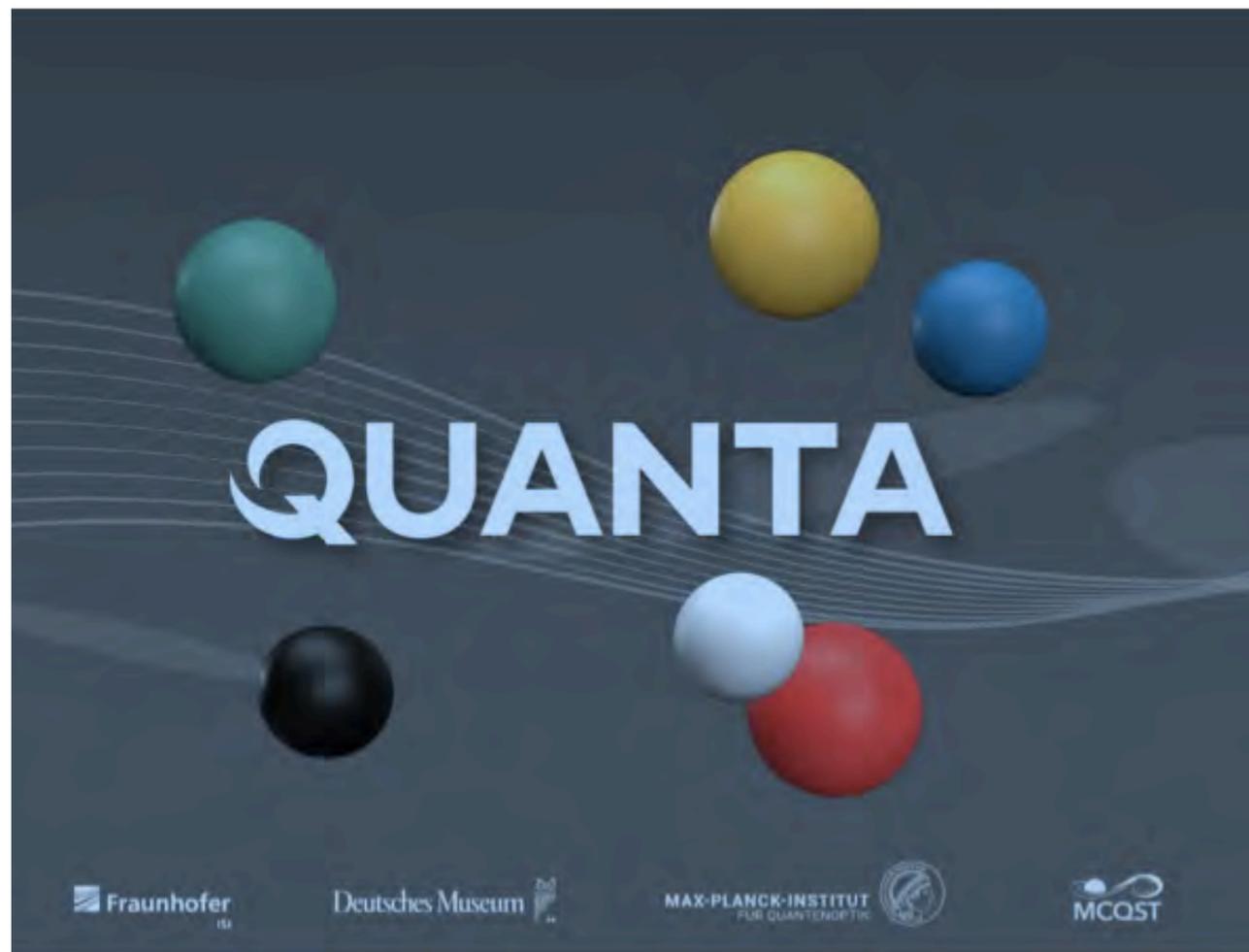
Zu Beginn hast du versucht Zufallszahlen durch würfeln zu erzeugen und festgestellt, dass man an seine Grenzen kommt mit dem „Zufälligen“, doch mittels dem Quantenzufallsgenerator hast du eine gute Möglichkeit entdeckt „echt“ zufällige Zufallszahlen zu generieren, aber nur wenn man eine gleichmäßige Intensitätsverteilung des Lasers einstellt.

Quantisch für Anfänger*Innen



Was ist die Quantenphysik?

- In diesem Kurs lernst du die Begriffe „Zustand“ und Quantensystem kennen.
- Ebenso untersuchen wir folgende Phänomene:
 - Superposition
 - Messprozess
 - Messen in verschiedenen Basen
 - Schrödingers Katze
 - Klassisches Bit und QuBit
 - Quantencomputer
 - Verschränkung

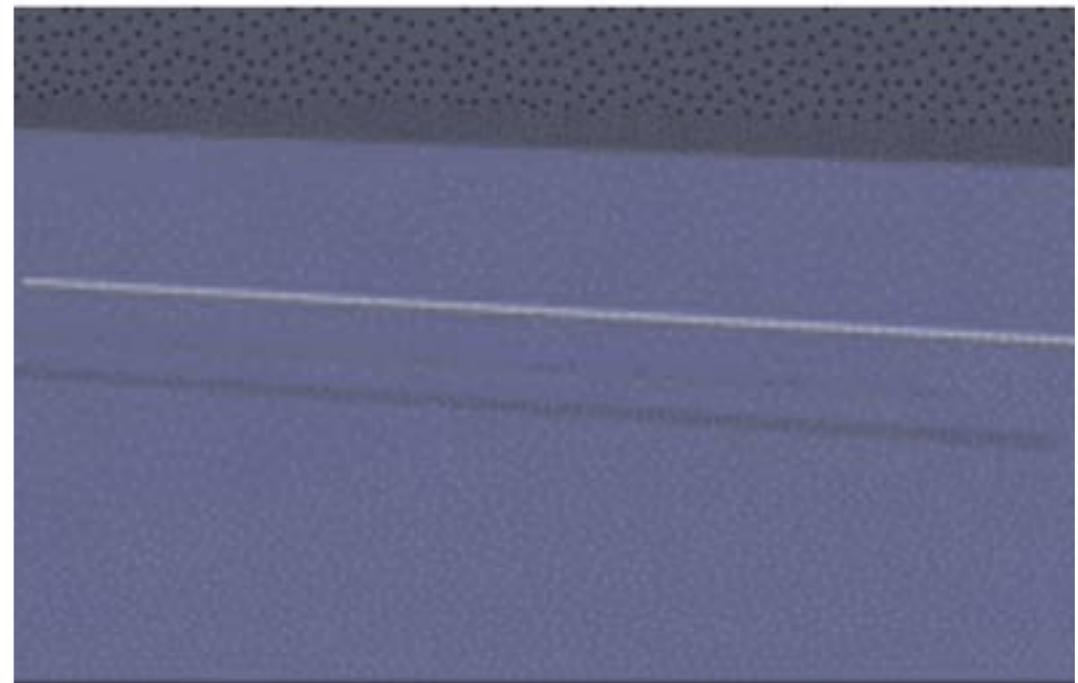


Phänomene in der Quantenphysik

Nach der Klärung der Grundbegriffe geht es jetzt um konkrete Phänomene der Quantenphysik und wie man sie möglichst anschaulich machen kann. Wir beginnen mit der **Superposition!**

Was ist Superposition?

Superposition ist eine Überlagerung von physikalischen Größen, die sich dabei nicht gegenseitig beeinflussen. Bei Wellen nennt man das Interferenz. Die Überlagerung zweier Wellen kann einen auslöschenden oder verstärkenden Effekt haben, aber die zwei ursprünglichen Wellen trennen sich danach wieder ohne voneinander beeinflusst zu sein.



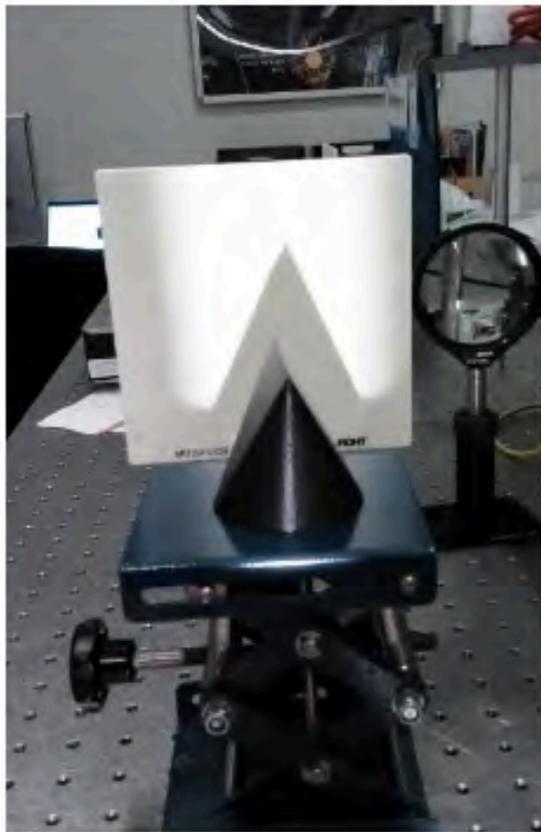
Beispiele für Interferenz

- Interferenz von Wasserwellen z.B. Regentropfen auf Wasseroberfläche
- Interferenz von Lichtwellen z.B. bei Federn, Insekten und Seifenblasen . Bei Insekten entsteht die Interferenz durch die Überlagerung der dünnen Schichten am Chitinpanzer, und die konstruktive Interferenz verstärkt z.B. das schillernde Grün des Käfers auf dem Bild. Eine Vogelfeder hat eine gitterähnliche Struktur, die durch die Spaltrittrennung von Hauptästen und Härchen entsteht. Damit kann man die gleichen Effekte wie bei einem optischen Gitter betrachten und **Beugung** feststellen.

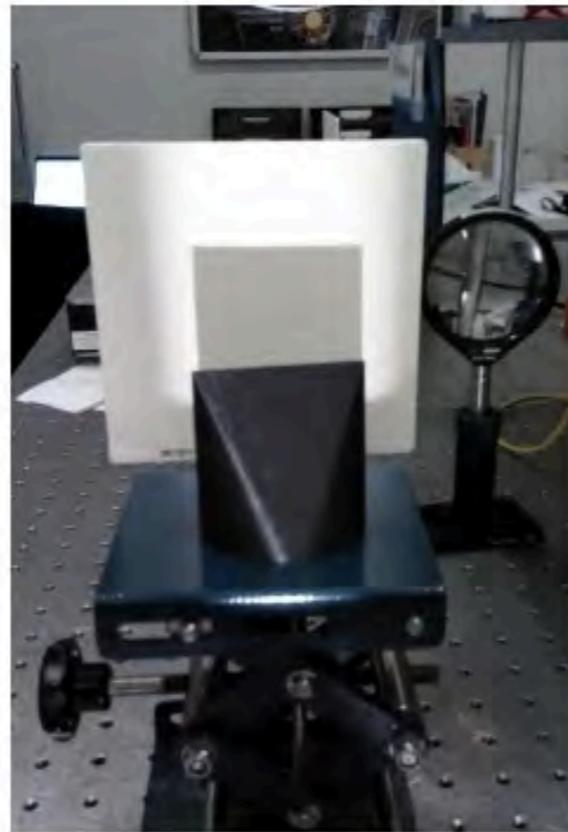


Schatten = Quantenmechanik??

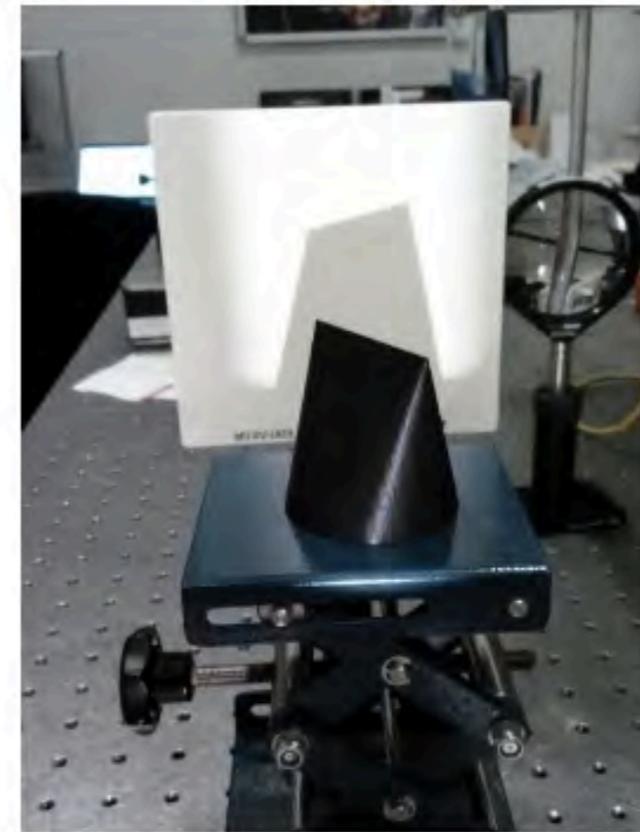
- Weil man sich eine Überlagerung von Zuständen schwer vorstellen kann, siehst du hier eine **klassische** Veranschaulichung: Das **Schattenbild**. Je nachdem, wie man die Form hinstellt, die einen Schatten wirft, sieht der Schatten kreis-, dreiecks- oder quaderförmig aus. Stellt man die Form aber schräg hin, sieht man eine **Überlagerung** der Zustände: Irgendwas dazwischen (rechtes Bild).
- Im Gegensatz zur quantenmechanischen Superposition fehlt hier jedoch das **Messelement**. Vor der



Dreick



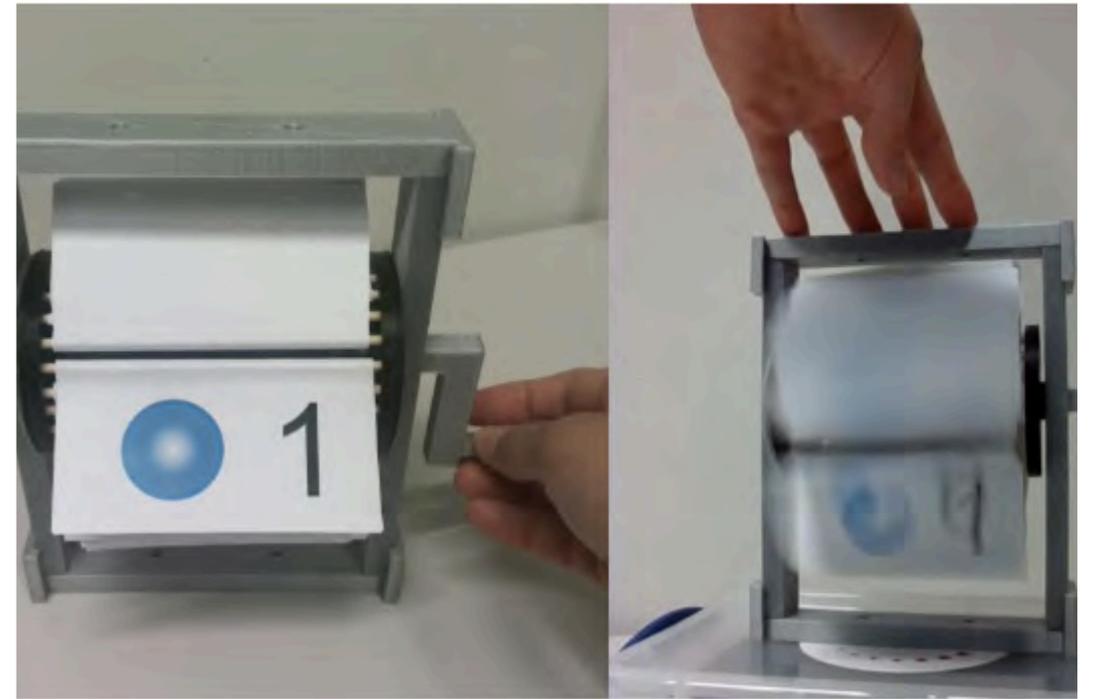
Quadrat



irgendwas dazwischen

Superposition und Messprozess

- Eine quantenmechanische Messung hebt die Superposition auf und die Wellenfunktion **kollabiert**. Das Ergebnis der Messung ist eindeutig, aber zufällig und kann nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden. Beispiele sind Kurbel- / Dau-
menkinos.
- **Kurbelkino:** Die Überlagerung von 0 und 1 besteht, solange die Kurbel gedreht wird. Die Zustände 0 und 1 sind angedeutet als Atom im Grundzustand (kleiner Kreis) bzw. im angeregten Zustand (großer Kreis). Wird eine Messung durchgeführt, entspricht das dem Anhalten der Kurbel. Das Ergebnis ist dann eindeutig 0 oder 1, aber jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50%.
- Im YouTube-Video kannst du dir das genauer ansehen: <https://youtu.be/680PfVH8nUw>

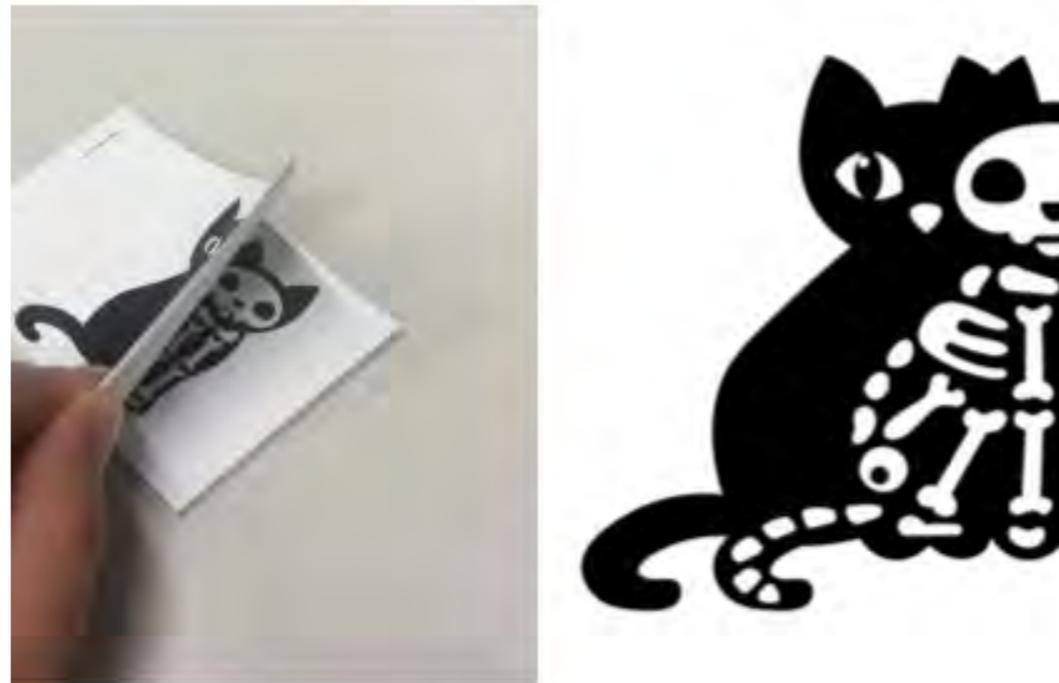


Kurbelkino



Superposition und Messprozess: Beispiel Daumenkino

- **Daumenkino:** Nach dem gleichen Prinzip funktionieren die Daumenkinos. Die Katze befindet sich in einer Überlagerung von tot und lebendig, bis das Daumenkino gestoppt wird. Dann ist der Zustand eindeutig definiert, aber welcher Zustand gemessen wurde, ist Zufall. Die Daumenkinos sind mit einer unterschiedlichen Anzahl an toten und lebendigen Katzen bestückt. Das beeinflusst die **Wahrscheinlichkeit** des Ergebnisses bei der Messung.



Daumenkino

Schrödingers Katze (von Philip Schwinghammer übernommen)

Schrödingers Katze ist ein berühmtes Gedankenexperiment, das die Seltsamkeit und **Absurdität** der Quantenphysik und der Superposition veranschaulichen soll. Nehmen wir an, wir sorgen uns nicht um Tierschutz oder einen sicheren Arbeitsplatz: Wir könnten eine Katze nehmen, und sie mit einer Flasche Gift in eine Kiste sperren. Die Giftflasche hätte eine bedeutsame Schwäche: Sie zerbricht, sobald ein radioaktiver Zerfall in der Kiste passiert. So weit so gut, es sieht erst einmal so aus, als würden wir grundlos Katzen ermorden. Das ist aber nur die halbe Wahrheit!



Schrödingers Katze

Gedankenexperiment Schrödingers Katze: Warum uns das Konzept von Quantenteilchen in der Superposition so erstaunt

Radioaktive Zerfälle sind **Quantenprozesse**. Das bedeutet, ein radioaktives Atom kann in einer Superposition aus Zerfallen und nicht-Zerfallen sein, bis eine Messung durchgeführt wird. Bis das Atom gleichzeitig zerfallen und nicht zerfallen ist, ist gleichzeitig die Flasche zerbrochen und nicht zerbrochen. Genauso geht ein einzelnes Photon beim Doppelspaltexperiment gleichzeitig durch den linken und rechten Spalt. Öffnen wir die Kiste, lösen wir damit die Superposition durch die Messung auf.

Das Gift hat die Katze erreicht, aber gleichzeitig auch nicht, und die Katze ist somit in einer **Superposition** aus tot und lebendig! Zu welchen Anteilen sie tot und lebendig ist, hängt also von den radioaktiven Atomen ab. Die Wahrscheinlichkeit, für ein radioaktives Atom zu zerfallen, kann ganz unterschiedlich sein: Je nachdem, welches Element wir haben. Öffnen wir die Kiste, lösen wir damit die Superposition auf, sodass die Katze eindeutig tot oder lebendig ist.



Verschränkung

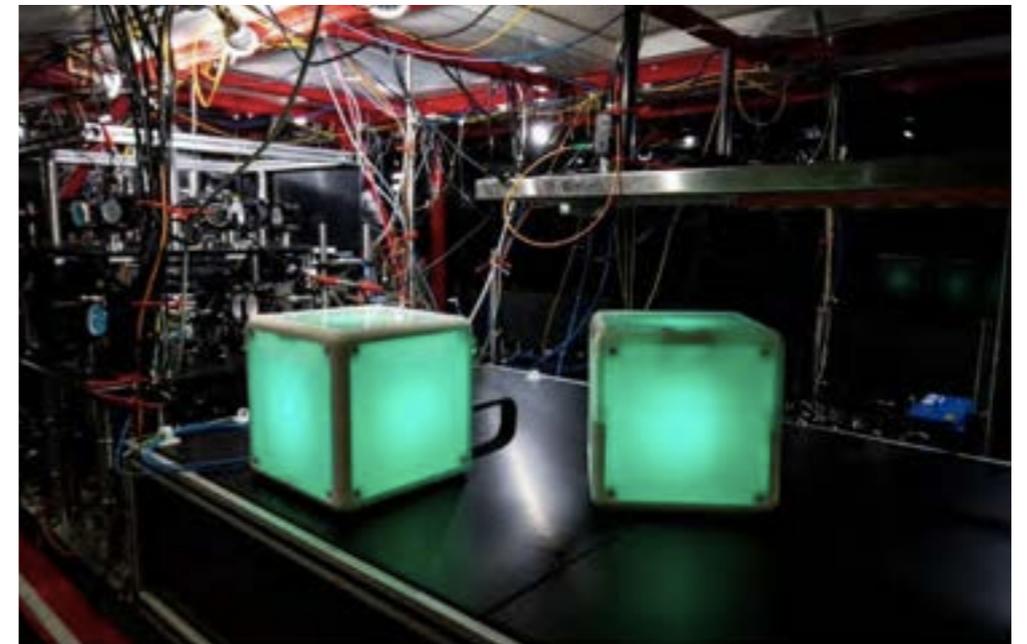
Verschränkung kann man sich als Superposition zweier Systeme vorstellen. Zwei verschränkte Teilchen können dann nicht mehr als getrennte Teilchen beschrieben werden, sondern bilden ein Gesamtsystem. Dadurch sind ihre Messergebnisse auch nicht mehr unabhängig voneinander. So weiß man, wenn man ein Teilchen gemessen hat, was die Messung des anderen ergeben wird. Als Beispiel dienen die Quantenwürfel:

Verschränkung mit Quantenwürfeln

Die Quantenwürfel zeigen anschaulich, wie **Verschränkung** funktioniert.

Die Würfel entsprechen zwei **Quantenteilchen**, die zu einem **Quantensystem** zusammengeführt werden, indem man sie verschränkt. In diesem Fall funktioniert das einfach auf Knopfdruck.

Unverschränkt funktionieren die Würfel wie normale Würfel auch: Man kann sie würfeln (vorsichtig bewegen und drehen und wieder hinlegen) und sie zeigen dann zufällig eine von sechs unterschiedlichen Farben an. Das Würfeln beschreibt hier den **Messprozess**.



Quantenwürfel

Verschränkung mit Quantenwürfeln

Verschränkt man sie durch Drücken des Verschränkungsknopfs, blinken sie erstmal wild, da ihr Zustand nicht festgelegt ist. Wird jetzt einer von beiden gewürfelt und erhält eine zufällige Farbe, überträgt sich diese auf den anderen Würfel. Es ist dabei egal, welcher Würfel zuerst gewürfelt wurde, sie haben immer die gleiche, aber **zufällige** Farbe.

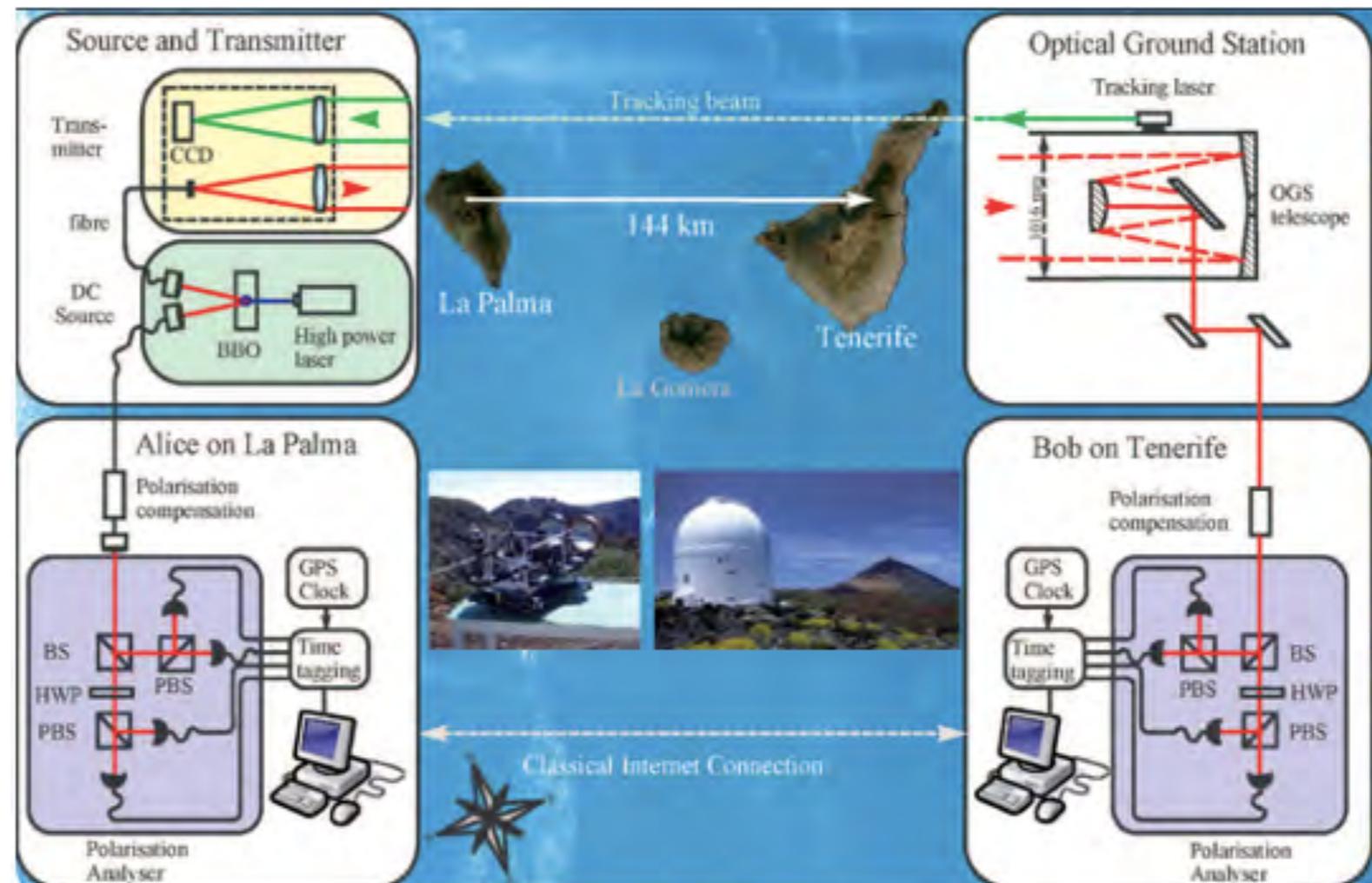
Wenn man die Würfel wieder würfelt, wird die Verschränkung aufgehoben und beide Würfel sind wieder im „klassischen“ Ausgangszustand und können erneut verschränkt werden. Die „Verschränkung“, das in unserem Analogiesystem durch Bluetooth dargestellt wird, funktioniert bis zu einem Abstand von ca. 50 m. Reale Quantensysteme sind dagegen immer noch miteinander verschränkt, wenn sie sich an entgegengesetzten Orten im Universum aufhalten.



Merkel und Söder im MPQ mit den Quantenwürfeln

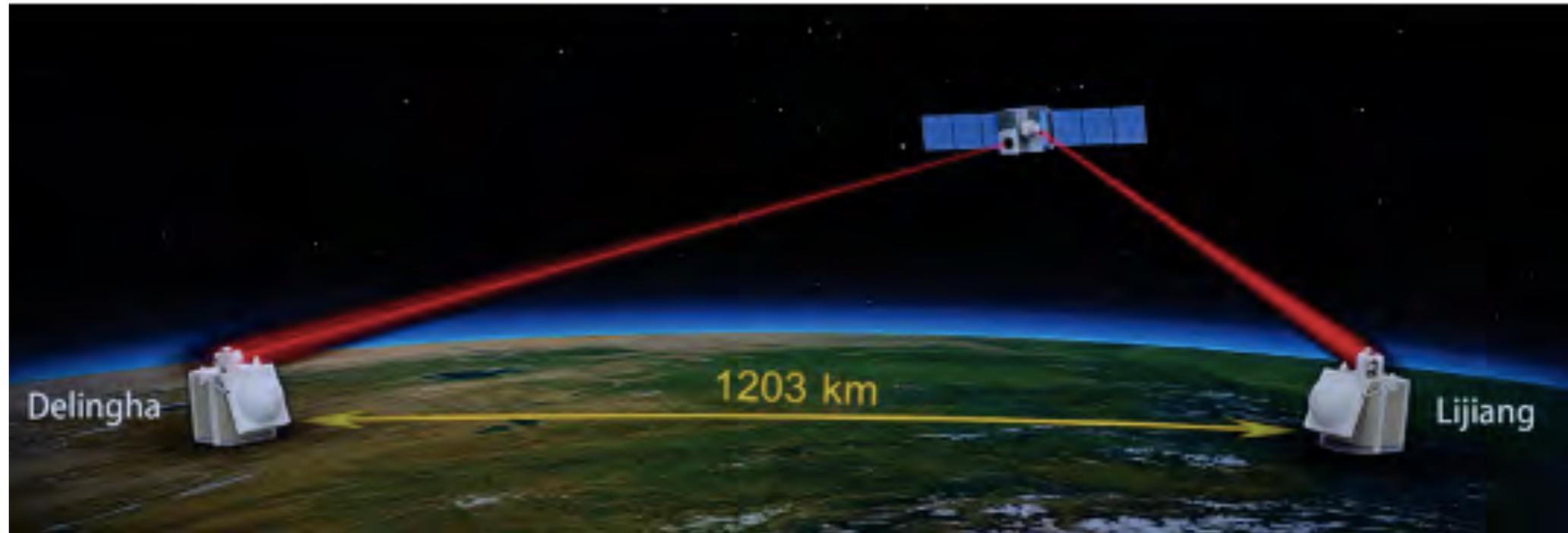
Verschränkung: Experimentelle Überprüfung (Stand 2009)

Weitere Beispiele für Verschränkung: Verschränkte Photonen können in einem **nichtlinearen** optischen Kristall erzeugt werden und sind in ihrer Abstrahl-Richtung verschränkt (parametric down-conversion), Zustand nach Stoßprozessen, Spins von Elektron und Proton im Grundzustand des Wasserstoffatoms, mit einem Laser angeregte Atome emittieren bei Rückkehr in den Grundzustand zwei Photonen mit verschränkter Polarisation.



Verschränkte Photonen, gemessen zwischen den Kanarischen Inseln Teneriffa und La Palma über eine Distanz von 144 km durch die Atmosphäre.

Verschränkung: Experimentelle Überprüfung



2017 konnte Verschränkung über eine Strecke von 1200 km nachgewiesen werden, indem verschränkte Photonen von der Erde zu einem Satelliten geschickt und von dort zu einer weiteren Bodenstation weitergeleitet wurden.

Klassisches Bit und QuBit

Das klassische Bit, mit dem alle unsere Computer rechnen, kann immer in einem von zwei Zuständen sein. In diesem Beispiel ist sie auf 2 Uhr eingestellt, d.h. die Wahrscheinlichkeit, eine 1 bei der Messung zu erhalten, ist größer, als eine 0 zu erhalten.

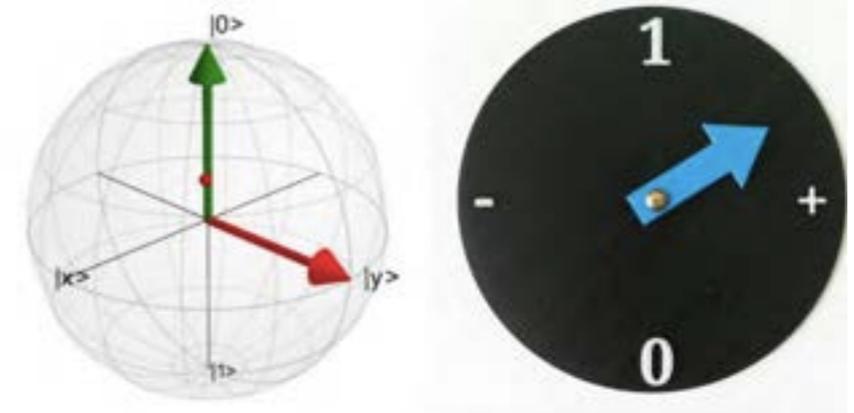
. Das kann auf verschiedene Weise **technisch** realisiert werden, z.B. Strom an und aus, wie z.B. mit einem Schalter:

Im Gegensatz zum klassischen Bit kann das Qubit jeden beliebigen Punkt auf der Kugeloberfläche der Bloch-Kugel annehmen.

Zur Vereinfachung der Darstellung wird die Kugel auf einen Kreis reduziert und als Bloch-Uhr bezeichnet. Mathematisch bedeutet es, dass wir die imaginäre Komponente und die Messung in der z-Basis weglassen. Auf der Bloch-Uhr ist im Falle des klassischen Bits nur die Einstellungen 0 oder 1 zulässig, während das QuBit **alle** „Uhrzeiten“ anzeigen kann. Hier ist die Position des Pfeils frei wählbar. In diesem Beispiel ist sie auf 2 Uhr eingestellt. Im YouTube-Video kannst du dir eine Animation der Bloch-Uhr ansehen: <https://youtu.be/McWqLIP6AuE>



Schalter



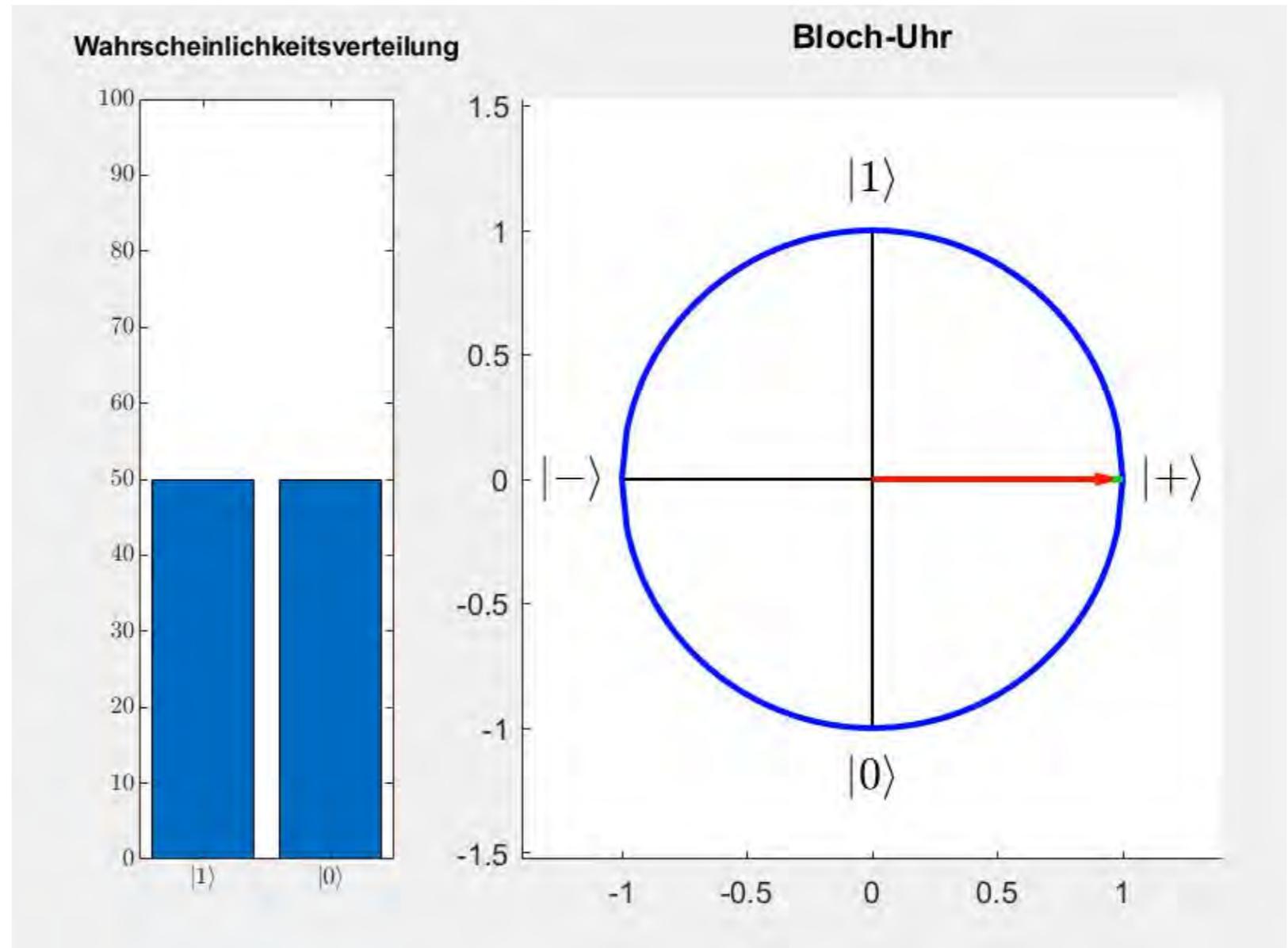
Bloch-Kugel und Bloch-Uhr

Klassisches Bit und QuBit

Einmaliges Messen in dieser Konfiguration ergibt mit 66% Wahrscheinlichkeit 1 und mit 33% 0.

Eine einzige Messung ergibt aber erst mal nur 0 oder 1, erst nach mehrmaligem Wiederholen der gleichen Messung kann auf den Ausgangszustand zurückgerechnet werden.

Entsprechendes gilt für alle andere Pfeilpositionen: Die Wahrscheinlichkeit für die Ergebnisse 0 und 1 ändert sich in Abhängigkeit von der Position. In der Animation sieht man gut, wie sich die Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Pfeilposition ändern:



Quantencomputer

Ein Quantencomputer rechnet mit Qubits anstatt mit Bits. Dadurch hat er einige enorme Vorteile gegenüber klassischen Computern und kann Probleme lösen, für die klassische Computer extrem lange Rechenzeiten benötigen.

Insbesondere im Bereich der Optimierungsprobleme wie Finanzmathematik, Logistik und Molekülsimulationen haben Quantencomputer große Vorteile.

Wer darüber mehr erfahren möchte, kann sich dieses interaktive Buch über Quantencomputer anschauen:

<https://photonlab.h5p.com/content/1291417877260690287>



Schwarze Box/ Black Box

Eine schwarze Kiste ist eine gute Analogie für ein Quantensystem, z.B. ein Atom oder ein Photon. In diese können wir genauso schlecht hineinsehen wie in ein Atom. Erst durch eine Messung können wir etwas darüber erfahren z.B. ob es sich in einem angeregten Zustand befindet oder wie seine Elektronen angeordnet sind. Wir bekommen aber immer nur die Antwort, nach der unsere Messung fragt. Das Gesamtsystem bleibt für uns unzugänglich und in einer Superposition aller möglichen Zustände (z.B. bei Schrödingers Katze: tot und lebendig).

Ebenso ist das Ergebnis der Messung abhängig davon, in welcher Basis man misst, also in welche „Richtung“ man den Zustand des Systems projiziert. Ganz ähnlich funktioniert die schwarze Kiste. Ist sie geschlossen, ist unser System unbestimmt und befindet sich in einer Superposition aller möglichen Zustände. Das Öffnen einer Tür entspricht einer Messung in einer bestimmten Basis.

Aber selbst wenn wir die Kiste öffnen, erfahren wir nicht sofort alles über das System, sondern nur eine Projektion in eine Basis. Das Öffnen einer anderen Tür entspricht dann der Messung in einer anderen Basis. So kann das gleiche System andere Ergebnisse liefern, abhängig davon, in welcher Basis man es misst.

Genauso kann das Ergebnis unterschiedlich sein, selbst wenn man immer in der gleichen Basis misst, da es immer unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für ein Messergebnis pro Base gibt.

Und was hat das mit Schrödingers Katze zu tun?

Der Zustand des Systems wird durch die Lebendigkeit der Katze dargestellt. Die Katze kann wie ein QuBit mehrere Zustände einnehmen und entweder tot oder lebendig. Ungeöffnet befindet sich die Katze in einer Superposition aus tot und lebendig, was wir aber nicht sehen können. Erst durch eine Messung können wir uns das System anschauen, kollabieren aber dabei aber die Superposition in einen der beiden Zustände. Da wir aber in verschiedenen Basen messen können, können wir die Superposition bestimmen! Anders als in der Realität befindet sich das System nach einer Messung immer wieder in seinem Ursprungszustand und kann erneut gemessen werden.



Quiz: Schwarze Box/ Black Box

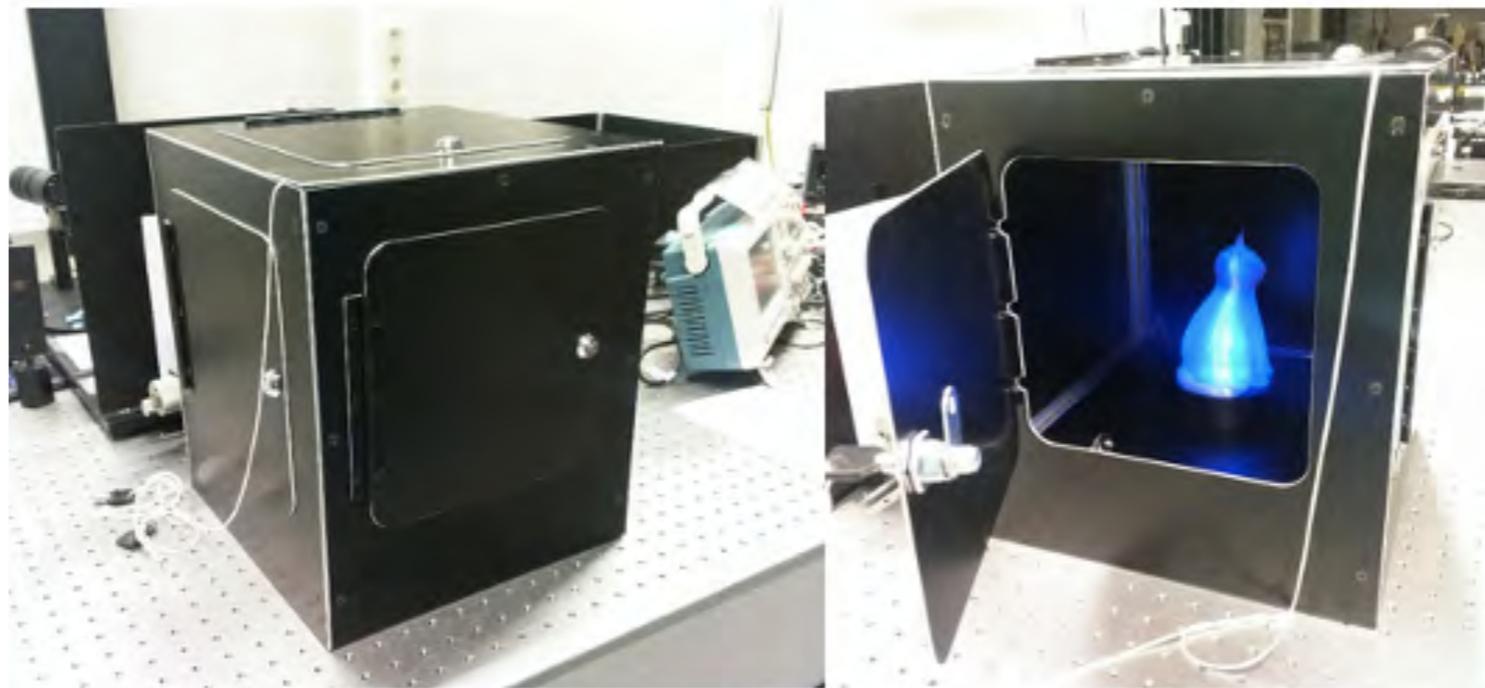
Was passiert, wenn du die Türen A, B und C nacheinander öffnest? Welche Farben siehst du?

Was passiert, wenn du die gleiche Tür mehrmals hintereinander öffnest?

Wie viele Male hintereinander musst du eine Tür öffnen, um eine sichere Aussage über den Ausgang der Messung machen zu können?

Wie kannst du aus den Messungen auf den Zustand des Systems zurückschließen?

In welchem Zustand befindet sich das System?

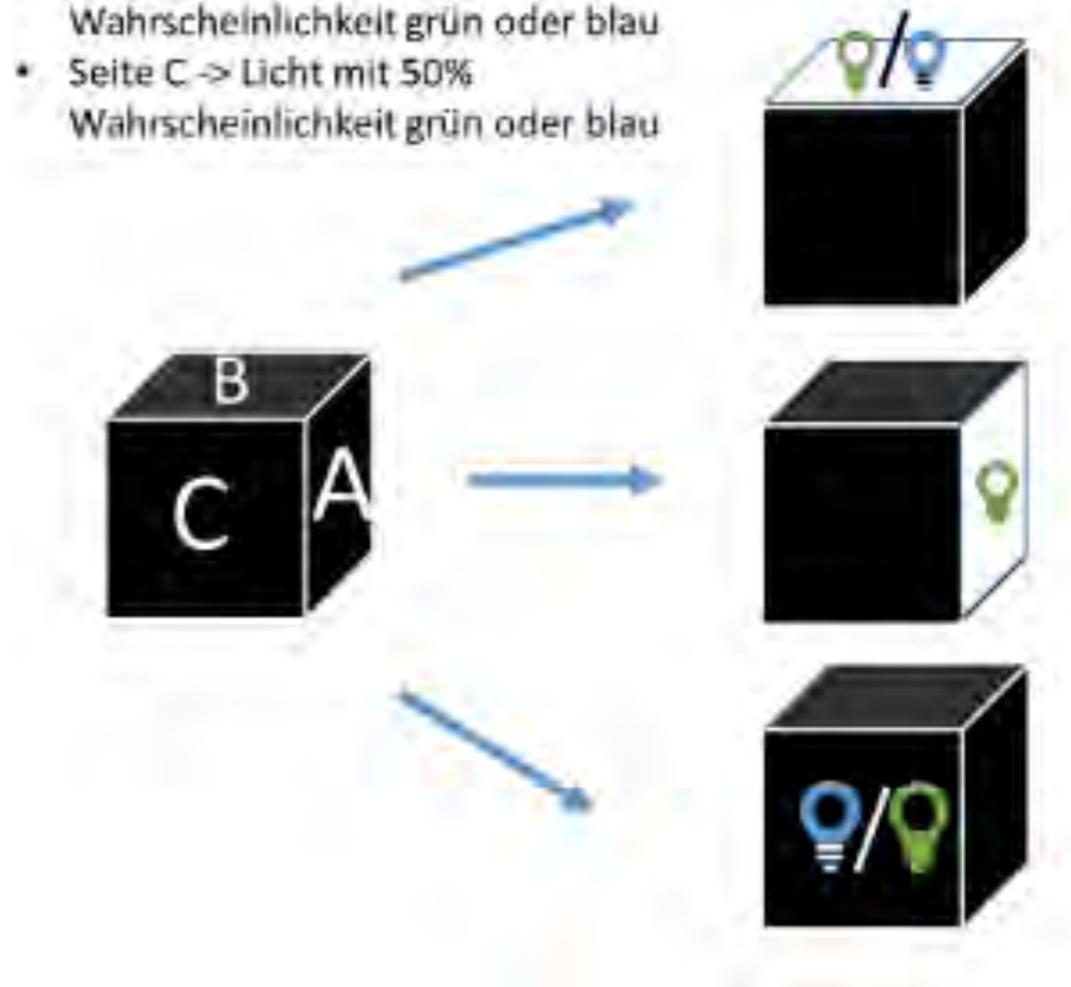


Untertitel

Quiz: Schwarze Box/ Black Box- Auflösung

Die hier eingestellte Superposition ist in einer Basis immer grün und in den zwei anderen Basen mit jeweils 50% Wahrscheinlichkeit blau oder grün. Dies lässt sich durch wiederholtes Messen (= Türen öffnen) herausfinden. In Realität müsste man sein Quantensystem nach einer Messung immer neu im gleichen Zustand präparieren, um so ein Experiment durchführen zu können. Hier siehst du das Prinzip nochmal deutlich:

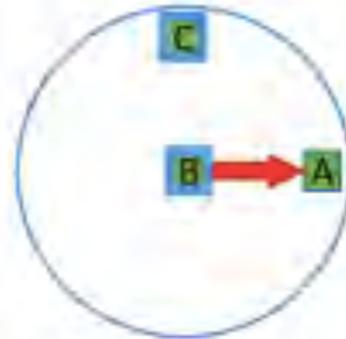
- Seite A -> Licht immer grün
- Seite B -> Licht mit 50% Wahrscheinlichkeit grün oder blau
- Seite C -> Licht mit 50% Wahrscheinlichkeit grün oder blau



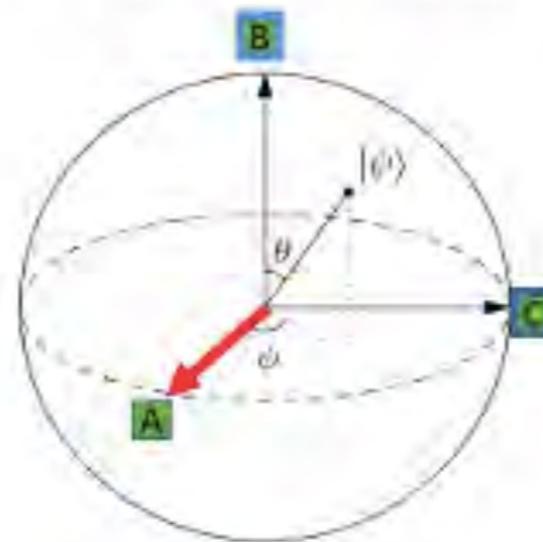
Untertitel

Quiz: Schwarze Box/ Black Box- Auflösung

Zustand des Systems auf der Bloch-Uhr:



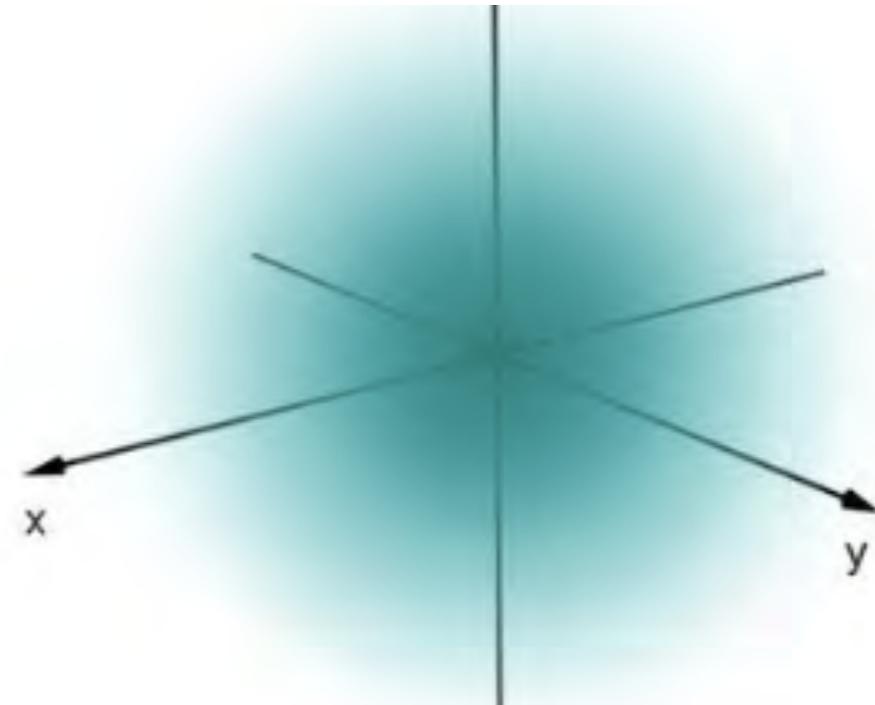
Zustand des Systems auf der Bloch-Kugel:



Grundbegriffe

Ein Quantensystem ist eine abgegrenzte Einheit die den Gesetzen der Quantenphysik gehorcht. Beispiele sind Atome, Elementarteilchen wie Photonen und Elektronen, aber auch Kristalle und Moleküle.

Der Zustand eines (Quanten) Systems ist die Summe aller Parameter, durch das es beschrieben werden kann. In klassischen Zuständen sind das die relevanten Parameter wie Ort und Geschwindigkeit eines Balles oder der Winkel und die Winkelgeschwindigkeit für einen Kreisel. In der Quantenmechanik wird der Zustand auch durch die relevanten Parameter beschrieben, z.B. beim Wasserstoffatom der Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons. Der Unterschied zur klassischen Mechanik ist aber, dass quantenmechanische Zustände durch die **Superposition** der zugehörigen klassischen Zustände bestimmt werden. Diese Superpositionen sind nicht genau bekannt, sondern kann nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angegeben werden. Ein Beispiel findest du rechts.



Punktwolke in 3D.

Die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron im Grundzustand des Wasserstoffatoms zu finden ist hier als Punktwolke angegeben. Je dichter die Punkte sind, desto höher ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit.

Grundbegriffe

Aufenthaltswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen an diesem Ort befindet) eines Punktteilchens im eindimensionalen Raum. Der Aufenthaltsort ist über eine Strecke verteilt (x -Achse) und nur als Wahrscheinlichkeitsverteilung sichtbar. Je größer die Amplitude (y -Achse), desto größer die Wahrscheinlichkeit. Die Spirale ist die Summe aller möglichen Wahrscheinlichkeitsamplituden zu jedem Ort auf der x -Achse. Bei einer Messung kollabiert der Zustand auf ein konkretes, aber zufälliges Ergebnis.

Quelle: Youtube-Video <https://www.youtube.com/watch?v=p7bzE1E5PMY>



GLOSSAR

Glossar

17-BITS PRO BYTE

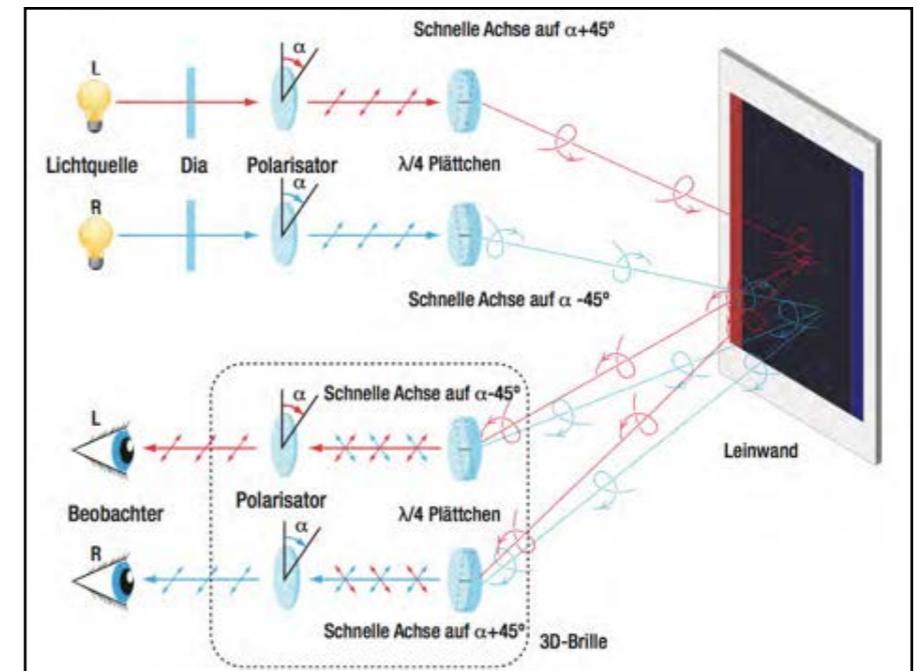
Auf der CD wird die Eins durch eine Änderung in der Höhe geschrieben und die Null durch gleichbleibende Höhe. Damit zwei aufeinanderfolgende Einsen auf die CD geschrieben werden können muss jede Eins von zwei Nullen gefolgt werden. Da auf einer CD mehr Nullen als Einsen geschrieben werden kann somit die gesamte Länge der Information verkürzt werden. Somit besteht die kleinste Vertiefung auf der CD aus der Ziffernfolge: „1001“. Im Mittel wird somit ein Byte von 8 auf 17 Bits gestreckt.

Related Glossary Terms

Index

3D-TECHNIK IM KINO (REALD)

Die Brillen, die wir im Kino auf unsere Nasen setzen, bestehen nicht nur aus linearen Polarisationsfiltern, sondern auch aus einem Verzögerungsplättchen (oder auch $\lambda/4$ - Plättchen).



Zuerst trifft das Licht aus dem Projektor oder unseren Lampen auf einen Polarisator, der das Licht für jedes Auge linear in die gleiche Richtung polarisiert.

Anschließend kommt das $\lambda/4$ - Plättchen oder Verzögerungsplättchen. Es macht aus linear polarisiertem Licht einer bestimmten Wellenlänge zirkular polarisiertes Licht (und umgekehrt). Je nach Ausrichtung des Plättchens, ist der transmittierte Strahl links- bzw. rechtsdrehend. Dann laufen die Schritte eins und zwei in umgekehrter Reihenfolge ab.

Trifft der Strahl auf den beschichteten Schirm, wird er reflektiert und erfährt einen Phasensprung von 90° . Das heißt, der vorher rechtsdrehende Strahl ist nun linksdrehend und vice-versa.

Beim Auftreffen auf die Brille, laufen die ersten zwei Schritte umgekehrt ab. Somit wird erreicht, dass wir immer nur eines der Bilder im dafür vorgesehenen Auge empfangen. Diese Technik erlaubt es uns auch, im Kino den Kopf zu bewegen, da es keine Rolle spielt, aus welchem Winkel das Licht auf die Brille trifft.

Verwandte Glossarbegriffe

Das $\lambda/4$ - Plättchen, Zirkulare Polarisation

Index

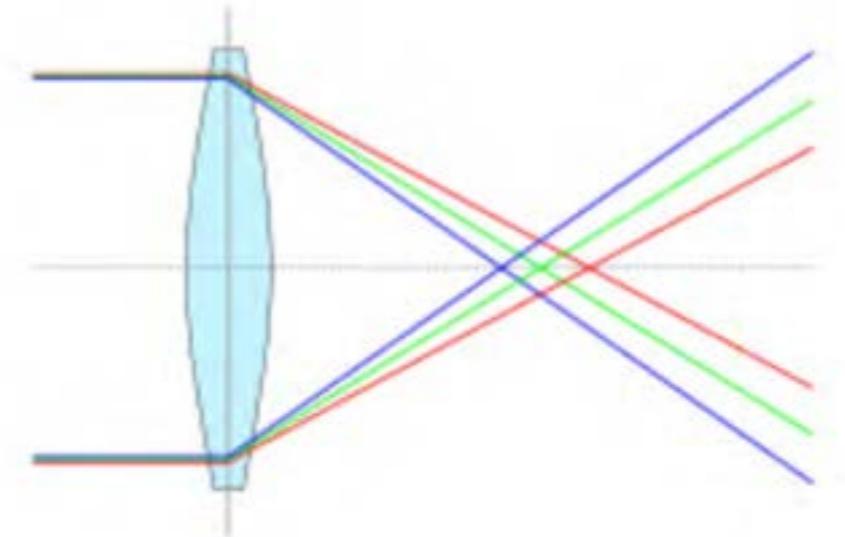
ABBERATIONEN

Eine Abberation ist ein Abbildungsfehler. Man unterscheidet grob zwischen:

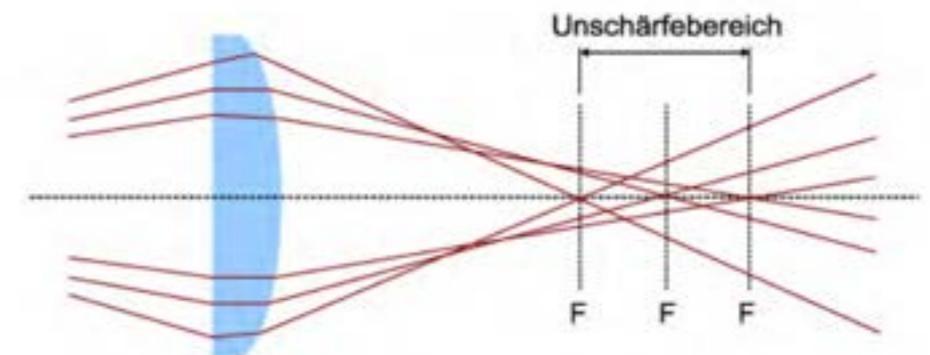
- Chromatische Abberation
- Sphärische Abberation
- Bildfeldwölbung
- Astigmatismus
- Koma
- ...

Hier sieht man eine **chromatische Abberation**.

Diese entsteht, wenn **Licht** verschiedener **Wellenlängen** (Farben) durch eine **Linse** gehen. Denn: Verschiedene **Farben** werden unterschiedlich stark **gebrochen**.



Hier sieht man eine **sphärische Abberation**. Hier sind **verschiedene Brennpunkte** (Foki) zu erkennen, also ein **unscharfes Bild**. Das liegt daran, dass die **Strahlen** auf **verschiedenen Höhen** auf die Linse treffen.



ABBERATIONEN

Was ist eine Bildfeldwölbung?

Wird ein **Gegenstand abgebildet** und **fokussiert** man hierbei (z.B. mit einer Kamera) auf die **Mitte**, erscheint der **Hintergrund unscharf**, denn der Gegenstand wird nicht als **plane** (ebene) **Fläche** abgebildet, sondern als **gewölbte Fläche**.

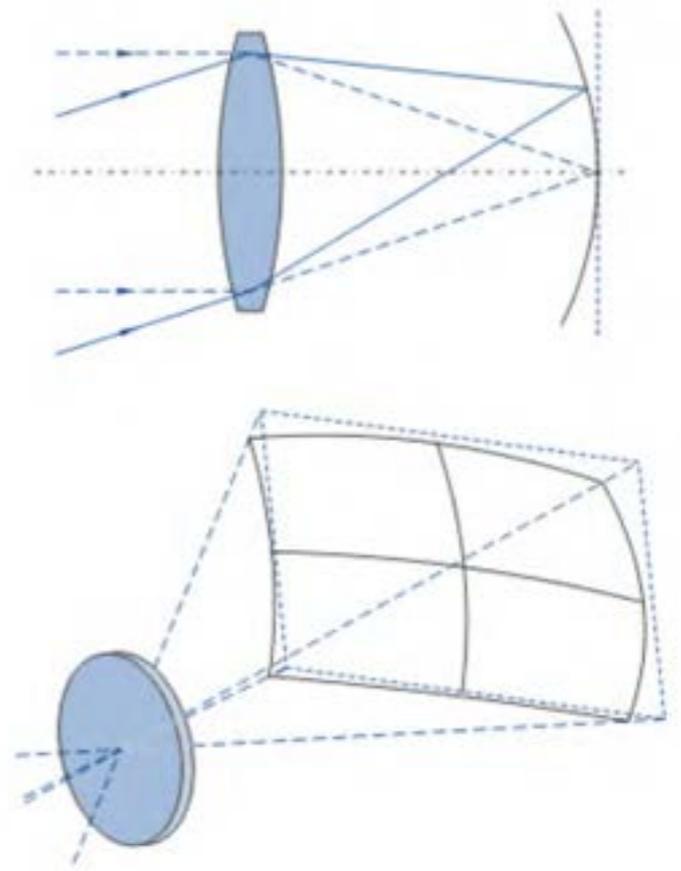
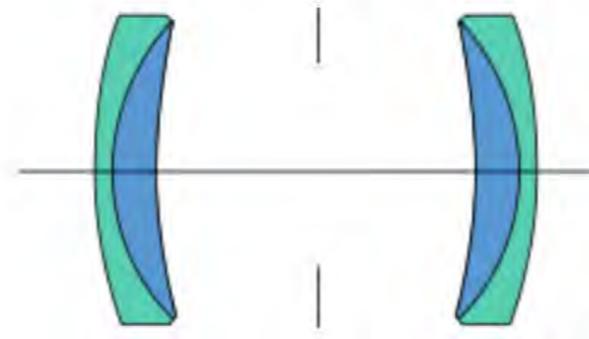
Abbildung: Warum ist der **nicht-fokussierte** Teil des Bildes **unscharf**? Der **Schirm** ist **gewölbt**, nicht **plan** (siehe Bild).

Was kann man tun, um das zu korrigieren?

Man kann zum Beispiel ein **Aplanat**, eine **Kombination** aus **konvexen** und **konkaven** Linsen, benutzen, um den **Fehler zu korrigieren**.

Erfunden wurde dieses Prinzip übrigens von **Carl August Steinheil**.

Hier siehst du ein Aplanat!



Related Glossary Terms

Index

ANLEITUNG ZUR JUSTIERUNG DES QUANTENKRYPTOGRAPHIEVERSUCHS

1. Sensoren

Sind die Sensoren dejustiert, tritt folgendes auf: Man betätigt den Feuerknopf am Laser, aber der Sensor reagiert nicht darauf, obwohl er bei eingestellter Polarisierung eigentlich ansprechen müsste.

Vorgehen:

- Schraube den Sensor ab und schaue in das Loch, wo sich die Photodiode befindet. Diese muss nicht zwingend genau in der Mitte des Lochs sein. Der Laser muss genau auf die Diode treffen.
- Schraube den Sensor wieder in die Halterung und stelle den Laser auf Dauerbetrieb (2 Sekunden auf den Knopf, dann schnell loslassen). Lockere die Schrauben am Sensor (NICHT AM STRAHLTEILER, außer bei völliger Dejustage) und bringe den Sensor grob in Position, sodass der Laserpunkt im Loch verschwindet. Achtung: Laserschutzbrille tragen!

Nun beginnt die Feinjustierung.

- Schraube den Sensor in der groben Position nur so fest, dass er zwar nicht mehr wackelt, ihn mit der Hand aber noch fein verschieben und verdrehen können.
- Eine Person beendet nun den Dauerbetrieb des Lasers (1x drücken) und feuert im Sekundentakt mit dem Laser (kurz drücken). Eine andere Person bewegt dabei den Sensor minimal, solange bis er auf das Signal anspricht. (Achtung: Polarisation am Dreher richtig einstellen!!). Spricht der Sensor an, ziehe die Schrauben fest.

2. Laser/ Polarisatoren: „Symptome“

Im Wesentlichen gibt es drei Fälle, wie die Sensoren ansprechen können. 1, 0 oder beide. Wie sie ansprechen, hängt von der Polarisierung des Laserlichts ab (z.B. 45° bei Alice und 45° bei Bob gibt eine 1). Ist der Polarisator und/oder der Laser dejustiert, funktioniert entweder gar kein Drehwinkel richtig, oder es funktionieren einige Fälle oder manchmal auch nur ein Fall nicht. Zum Beispiel: Alice 45° und Bob 0° liefert richtigerweise kein Ergebnis, Alice 90° und Bob 0° gibt richtigerweise 0, aber Alice 0° und Bob 0° liefert nicht wie gewünscht 1, sondern kein Ergebnis oder gar 0.

Vorgehen: Jetzt gibt es zwei Möglichkeiten, wie der Fehler entstehen kann. Probiere immer zuerst, den Fehler durch die Justage a) zu beheben. Nützt das nichts, musst du die sehr zeitaufwendige Möglichkeit b) probieren. Vorher aber unbedingt die Laborleitung kontaktieren!

a) Nur der Polarisator ist dejustiert

Hinten auf den Ständern beider Polarisatoren kleben Angaben, auf welchem Winkel der Polarisator stand und funktioniert hat, als der Versuch das erste Mal in Betrieb genommen wurde. Stelle den Polarisator wieder auf diesen Winkel ein. Sollte das nicht helfen:

Nimm einen/den Fall der nicht funktioniert und stelle die Dreher auf die entsprechenden Winkel ein. Zum Beispiel Alice 45° und Bob 45° gibt anstatt 1 kein Ergebnis.

- Lockere jetzt die Schraube oben auf dem Polarisator
- Eine Person feuert mit dem Laser im Sekundentakt.
- Drehe vorsichtig (meist reicht nur sehr wenig, ca. 2° - 5°) am Rad mit der Skala (probiere beide Richtungen aus), bis die Sensoren das für die Drehereinstellungen richtige Ergebnis liefern.
- Schraube den Polarisator in der Position fest und probiere alle anderen Fälle bzw. Kombinationen der Dreher aus. Gleiche das Ergebnis immer in der Tabelle ab. (Sie müsste auch laminiert am Tisch liegen).

- Funktioniert wieder ein Fall nicht, wiederhole die oben beschriebene Prozedur für diesen Fall. Danach probiere wieder alle anderen Fälle aus. Möglicherweise funktioniert nun wieder ein Fall nicht... Das Ganze muss so lange wiederholt werden, bis man am Polarisator einen Winkel findet, für den alle Fälle der Tabelle funktionieren.

b) Polarisator und Laser sind dejustiert

Der Laser liefert zwar kein linear polarisiertes Licht, hat aber eine Vorzugsrichtung. Daher ist die Ausrichtung des Lasers durchaus von Belang.

- Nimm den Polarisator aus dem Aufbau.
- Stelle den Laser auf Dauerbetrieb. Der Strahl soll durch die beiden Polarisationsdreher und den Strahlteilerwürfel fallen. Stelle ein Blatt Papier so vor die Sensoren, dass beide Laserpunkte auf dem Papier sichtbar sind.
- Der Dreher bei Alice (oder Eve) wird auf 0° eingestellt, der bei Bob (oder Eve) auf 90° .
- Löse die Halterung des Lasers und drehe den Laser (natürlich ohne ihn herauszunehmen). Wenn man genau hinsieht, wird sich bei einem Laserpunkt auf dem Papier die Intensität ein wenig ändern. Drehe den Laser so, dass die Intensität MINIMAL ist.
- Schraube den Laser in dieser Position fest. Nun ist der Laser richtig ausgerichtet.

Jetzt zum Polarisator:

- Setze den Polarisator wieder in den Aufbau ein und lasse den Laser auf Dauerbetrieb.
- Halte ein Blatt Papier hinter den Polarisationsdreher von Alice (oder Eve).
- Löse die Schraube des Polarisators (siehe Bild oben) und drehe ihn, bis der Laserpunkt auf dem Papier ein MINIMUM zeigt. Im Vergleich zur Laserjustierung eben ist das jetzt sehr deutlich zu sehen.

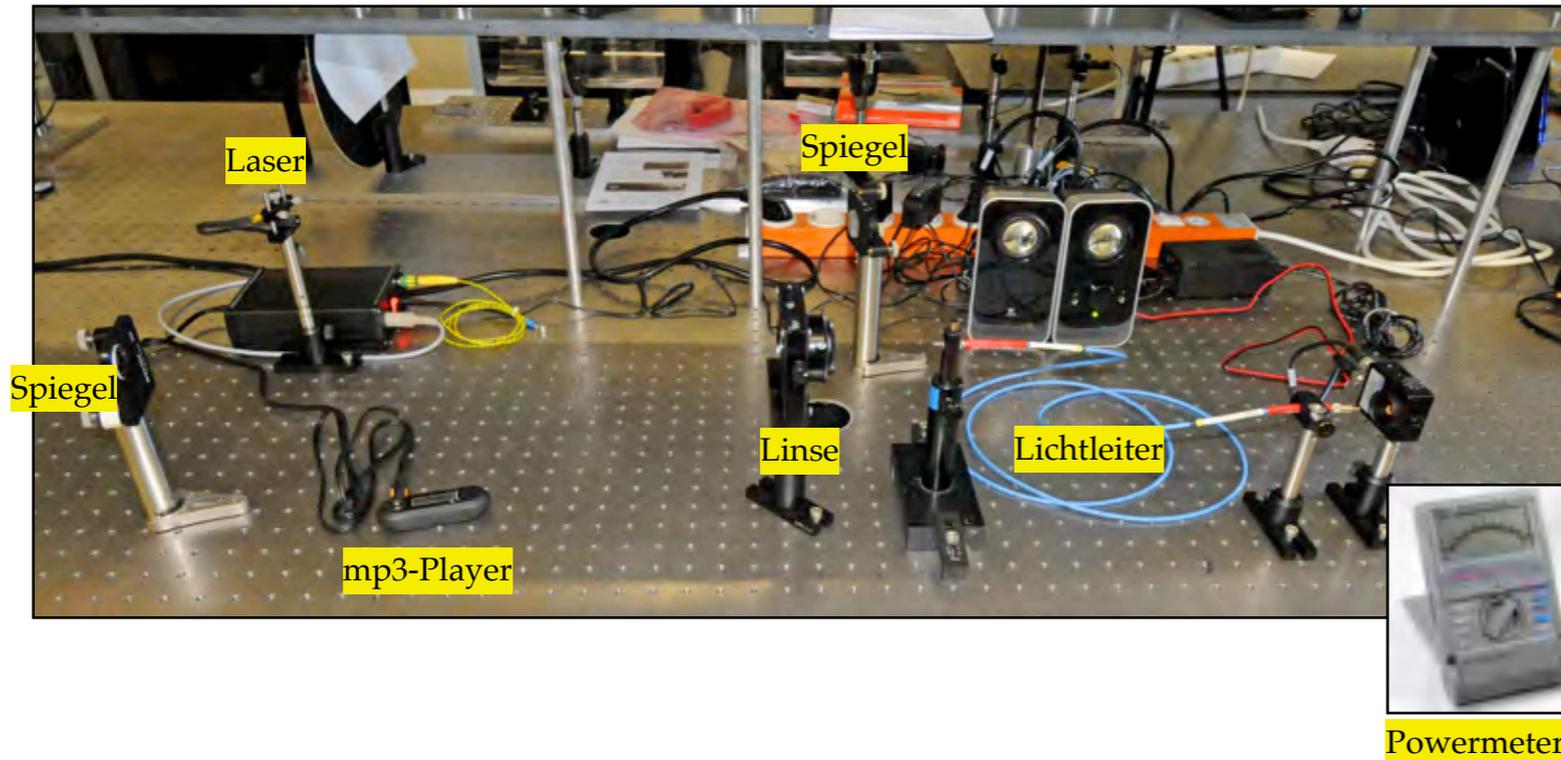
- Merke dir, auf welcher Gradzahl der Polarisator jetzt steht und drehe ihn um -90° . Wenn er also z.B. auf 120° steht: $120^\circ - 90^\circ = 30^\circ$

Jetzt können alle Möglichkeiten der Tabelle durchprobiert werden. Es ist sehr wahrscheinlich, dass jetzt aber noch eine Justierung wie in a) notwendig ist.

Verwandte Glossarbegriffe

Index

AUFBAU LICHTLEITER



Ordne die Komponenten wie auf dem Bild an. Achte darauf, dass man spitze Winkel bei den Spiegeln hat und diese in der Mitte getroffen werden. Die Strahlhöhe sollte 15cm betragen.

Achtung:

Den Lichtleiter nicht zu stark biegen!!!!

Nicht auf den Lichtleiter, die Spiegel oder den Empfänger fassen!!!!

Fixiere den Ausgang des Lichtleiters!

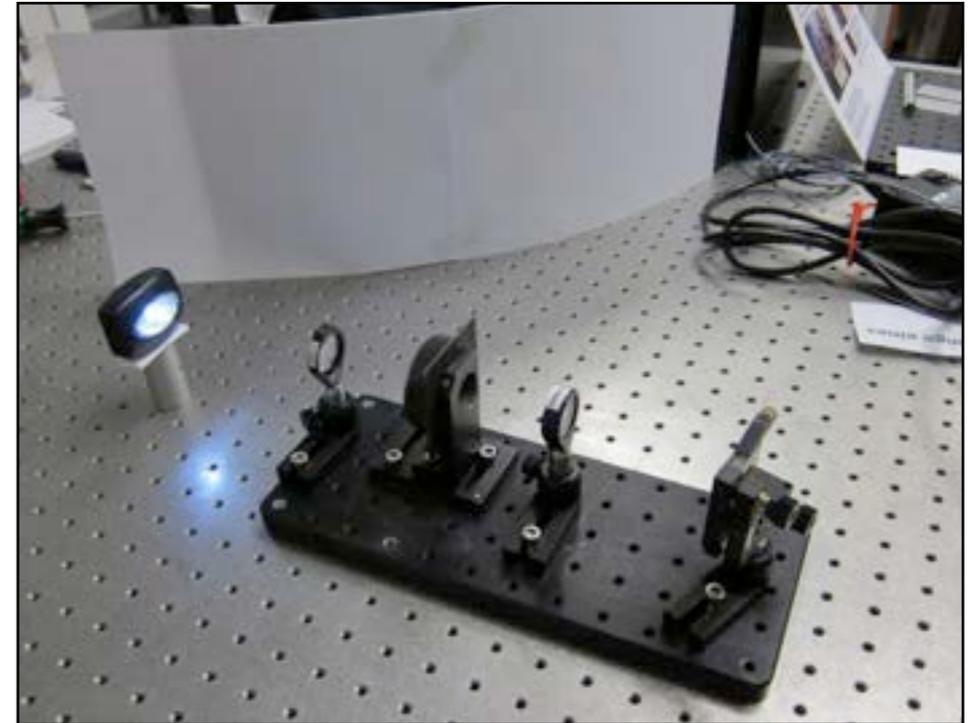
Related Glossary Terms

Index

AUFBAU SPEKTROMETER

Stelle zunächst die **Lampe** so ein, dass nur eine LED leuchtet. Positioniere die LED so, dass der Fokus auf dem **Spalt** steht, kontrolliere dies mit einem weißen Blatt Papier und fahre den weiteren Weg des Lichtes nach. Wenn das Licht die **Linsen** und das **Gitter** zentral trifft, sollten die ersten Spektren auf dem Schirm zu sehen sein. Um Streulicht zu vermeiden, kannst du jetzt das schwarze Blech zwischen LED und Schirm stellen.

Auf dem Schirm sollten jetzt bei richtiger **Justierung** des Gitters drei Spektren zu sehen sein. Das weiße ist das Spektrum der 0. Ordnung, das intensivste ist das der 1. Ordnung. Schwächer werdende Spektren sind jeweils höherer Ordnungen. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, können Sie die **Spaltdicke** variieren. Eventuell müssen auch noch ein paar Linsen gedreht oder die **Entfernung** der LED zu der ersten Linse verändert werden.



Related Glossary Terms

Index

BEUGUNG AM EINFACHSPALT

Für einen Einfachspalt **der Dicke h** , der mit einem Laser der **Wellenlänge λ** (rot: $\lambda = 633 \text{ nm}$, grün: $\lambda = 532 \text{ nm}$)* beleuchtet wird, ergibt sich für den **Winkel α** , unter dem die Maxima erscheinen, folgende Formel

$$h \cdot \sin(\alpha) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

($m=1,2,\dots$ Ordnung der Maxima)

(Formel für die Beugung am Einfachspalt)

Für kleine α ergibt sich für das 1. Maximum ($m=1$):

$$h = \frac{3}{2}\lambda \frac{D}{d}$$

Interessant ist, dass sich das Beugungsbild (Interferenzbild) vom Einfachspalt und dem Haar im Fernfeld (d.h. wie in unserem Aufbau) nicht unterscheiden. Das ist das Babinet'sche Theorem.

Verwandte Glossarbegriffe

Fresnelsche-Zonenplatte

Index

BROWNSCHE BEWEGUNG

Die Brownsche Bewegung bezeichnet eine zufällige Wärmebewegung von kleinen Teilchen in Flüssigkeiten und Gasen, die nicht von einer Kraft festgehalten werden. Die ausgeführten Bewegungen sind statistisch und ihre Intensität temperaturabhängig. Ursache ist die permanente Bewegung der unsichtbaren Wassermoleküle die an die sichtbaren Styroporkügelchen stoßen

Related Glossary Terms

Index

CHROMATISCHE ABBERATION

Was ihr braucht: Lichtquelle (Halogenlampe), Linse ($f=100\text{mm}$ bikonvex), blauer (so im Bild) oder roter Farbfilter, Irisblende, Schirm, Gitternetz (Gegenstand)

1. Im Prinzip verwendet ihr den **gleichen Aufbau** wie bei der sphärischen Abberation. Diesmal aber wollen wir die **chromatische Abberation** betrachten! Wenn ihr nicht mehr genau wisst, was das ist, klickt [hier](#).
2. Um den **Farbfehler** zu **korrigieren**, setzen wir nun einen der beiden **Farbfilter** in das **System** (zwischen **Irisblende** und **Linse**) ein. **Was könnt ihr beobachten?**

Jetzt solltet ihr das **Bild des Gitters** nur noch in der **Farbe des Farbfilters** sehen. Was wir gemacht haben, ist, dass wir alle **Farben** bis auf eine "ausgeblendet" haben. Das **reduziert** den **chromatischen Abbildungsfehler!**

Forschungsfrage: Wie variiert die **Bildweite b** in **Abhängigkeit** von der **Farbe** des **Filters**?

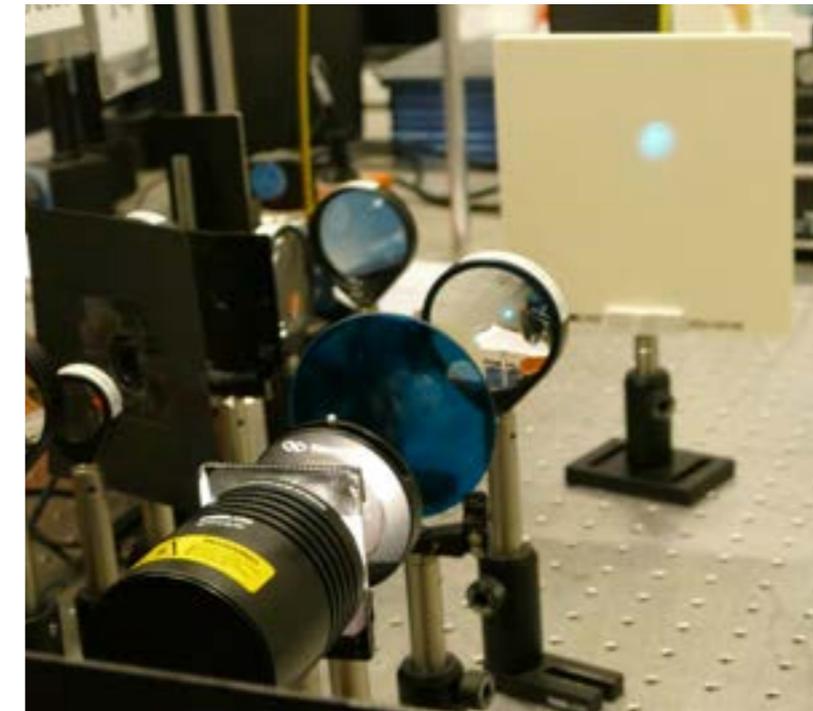
Tipp: Um mit **verschiedenen Farben** immer ein **scharfes Bild** zu erhalten, **bewegt** den **Schirm minimal**.

Ein kleiner Hinweis: Das Bild wird beim blauen Farbfilter dann **schärfer**, wenn die **Bildweite** verringert wird. Anders herum bei rot!

CHROMATISCHE ABBERATION

Was du hier siehst:

Links im Bild steht die Halogenlampe, gleich daneben das Gitternetz, daneben die Irisblende und zwischen der Linse und der Irisblende kannst du den blauen Farbfilter erkennen! Ganz rechts im Bild, am Ende des Systems, wie in den vorherigen Experimenten, ist der Schirm.



DAS $\lambda/4$ - PLÄTTCHEN

Dieses "Plättchen" wird auch Verzögerungsplättchen genannt und ist ein essentieller Bauteil einer RealD-Brille. Nur durch dieses Plättchen kann die Anwendung von zirkularer Polarisation ermöglicht werden.

Das Plättchen macht aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes.

Trifft linear polarisiertes Licht auf das Plättchen, das in einem Neigungswinkel von 45° zur optischen Achse angebracht ist, so wird der Vektor des elektrischen Feldes (E-Vektor) in zwei gleich große Komponenten geteilt (senkrecht und waagrecht).

Innerhalb des Plättchens ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts jedoch unterschiedlich, sodass zwischen beiden Teilen des E-Vektors, beim Verlassen des Plättchens, eine Phasenverzögerung um ein Viertel der Wellenlänge (λ) entstanden ist. Ob das Licht links- oder rechtszirkular ist, hängt von der Ausrichtung des Verzögerungsplättchens (+ oder -45°) ab.

In den Kinobrillen sind nicht nur lineare Polarisatoren, sondern auch $\lambda/4$ -Plättchen verarbeitet. Beide

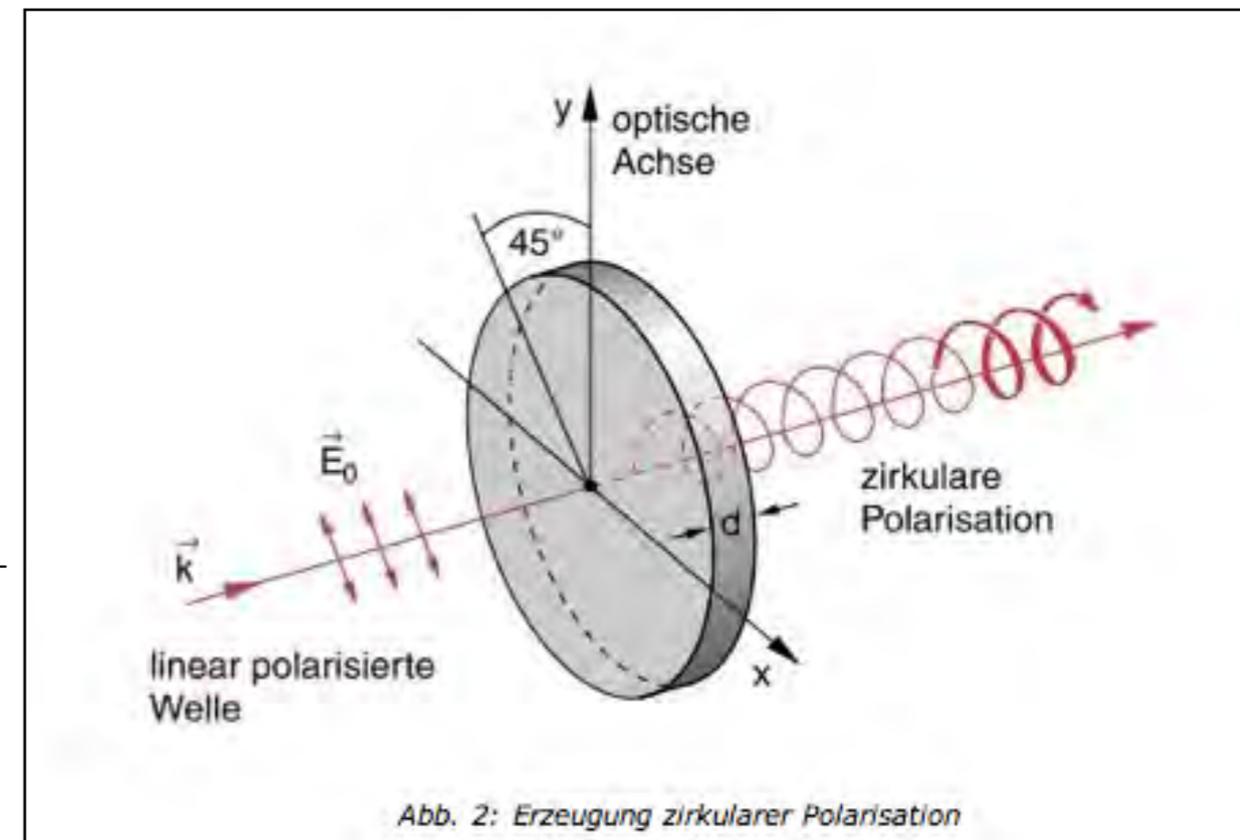
Polarisationsfilter sind parallel ausgerichtet, allerdings

lässt ein Plättchen ausschließlich rechts-, das andere hingegen nur linkszirkuläres Licht durch. (Eine genaue Abbildung findest du unter "3D-Technik im Kino (RealD)").

Verwandte Glossarbegriffe

3D-Technik im Kino (RealD)

Index



DREISATZ

Strecke $a \hat{=}$ 17 Stück Zucker

Strecke $b \hat{=}$ x Stück Zucker

$$x = \frac{17 \cdot b}{a} \text{ Stück Zucker}$$

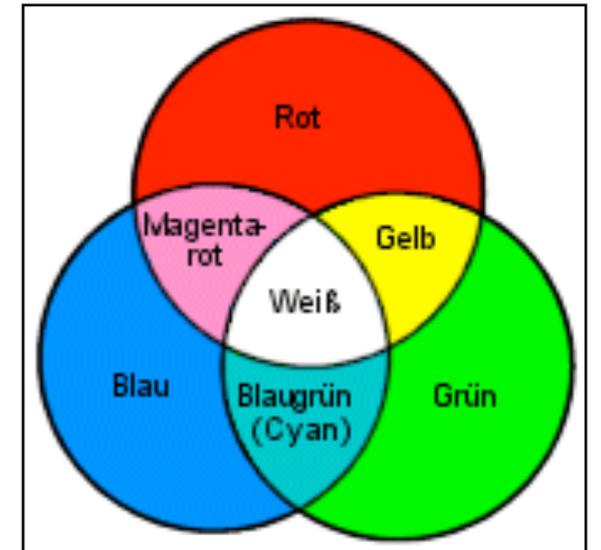
Related Glossary Terms

Index

FARBENLEHRE FÜR PROFIS: ADDITIVE UND SUBTRAKTIVE FARBMI- SCHUNG

Jeder von uns weiß, wie man mit dem Wasserfarbkasten ganz einfach aus Gelb und Blau seinen eigenen Grünton herstellen kann. Doch wie geht das bei Licht?

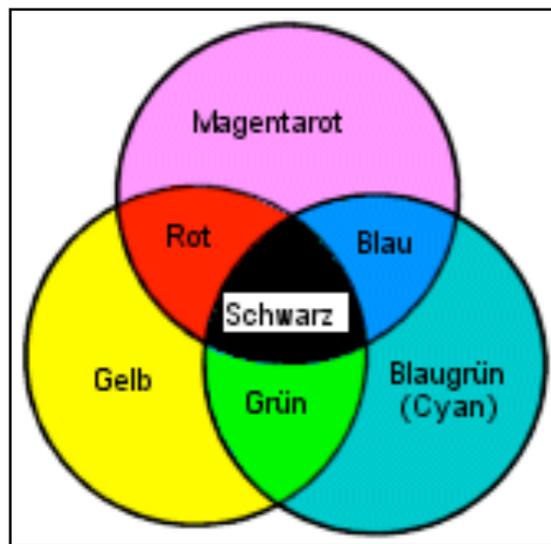
In unserem Fall nutzen wir die Eigenschaften der **additiven Farbmischung**. Hier werden durch das Hinzufügen oder Addieren der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau andere Farben kreiert. Mischt man alle drei zusammen, erhält man weißes Licht. (Zum selber Ausprobieren braucht man hierfür Taschenlampen in den passenden Farben).



Die **subtraktive Farbmischung** funktioniert ein bisschen anders: Hier werden aus einer weißen

Lichtquelle, wie z. B. dem Licht eines Tageslichtprojektors, verschiedene Farben mithilfe von Filterfolien heraus- oder abgezogen. Die Farbfilter, die genutzt werden, sind Magenta, Cyan und Gelb. Filtert man aus weißem Licht all diese Bestandteile heraus, bleibt nur Schwarz oder "Dunkelheit" zurück.

Die subtraktive Farbmischung wird auch bei unseren Druckern zu Hause benutzt, daher brauchen wir Tintenpatronen in Magenta, Cyan und Gelb.



http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/images/Subtraktive_Farbmischung.gif

http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/images/Additive_Farbmischung_c.gif

Für die Anaglyphentechnik sind beide dieser Verfahren von großer Bedeutung. Man nutzt verschiedene Farbfilter (Rot/Cyan), die nur einen Teil des Lichts in der passenden Farbe durchlassen. Die andere Farbe ist auf diesem Auge gesperrt, da es sich bei den gewählten Farben um Komplementärfarben handelt. Legt man, wie in unserem Versuch, ein rot- und cyanfarbendes Bild aufeinander, wird von jedem Auge nur eines der Halbbilder aufgenommen, da die Filter in der Brille das 'falsche' Bild blockieren. Der größte Nachteil dieser Technik besteht in der Farbdarstellung. Durch die Einfärbung der einzelnen Teilbilder kommt es zu einem Farbverlust, da alle Farben außer Rot und Cyan durch subtraktive Farbmischung gebildet werden müssen.

Verwandte Glossarbegriffe

Index

FEHLSICHTIGKEIT

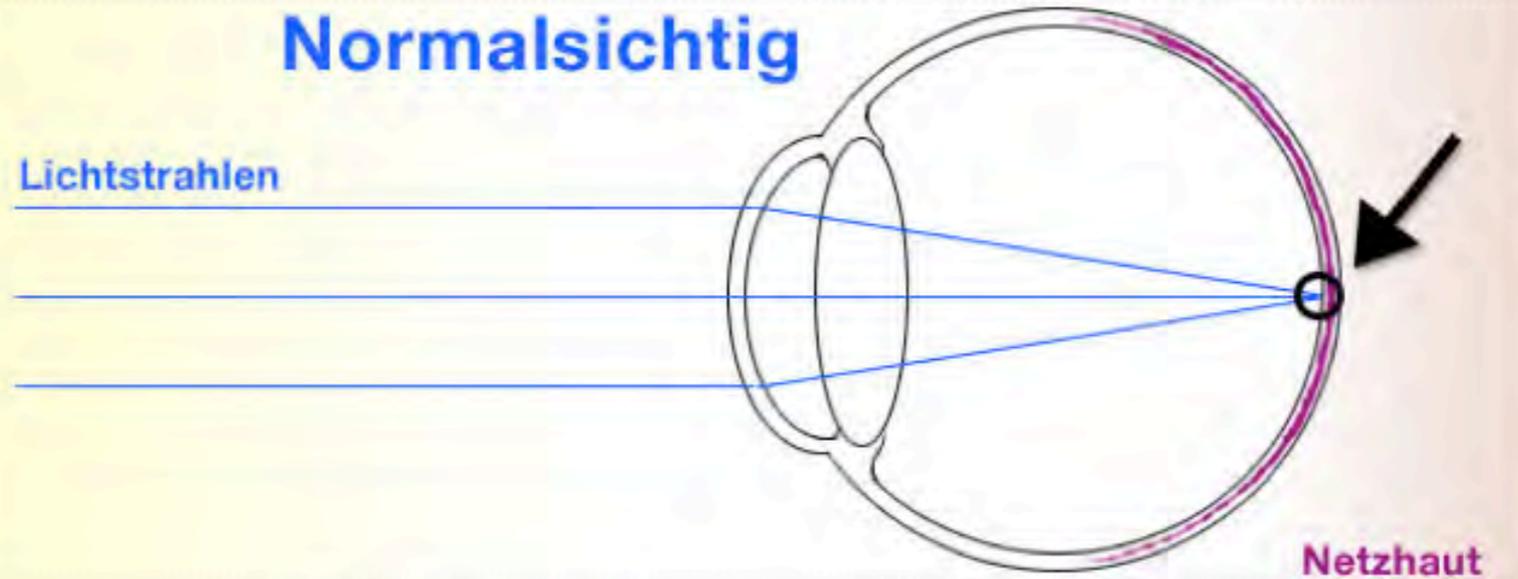
Kurzsichtig

Lichtstrahlen



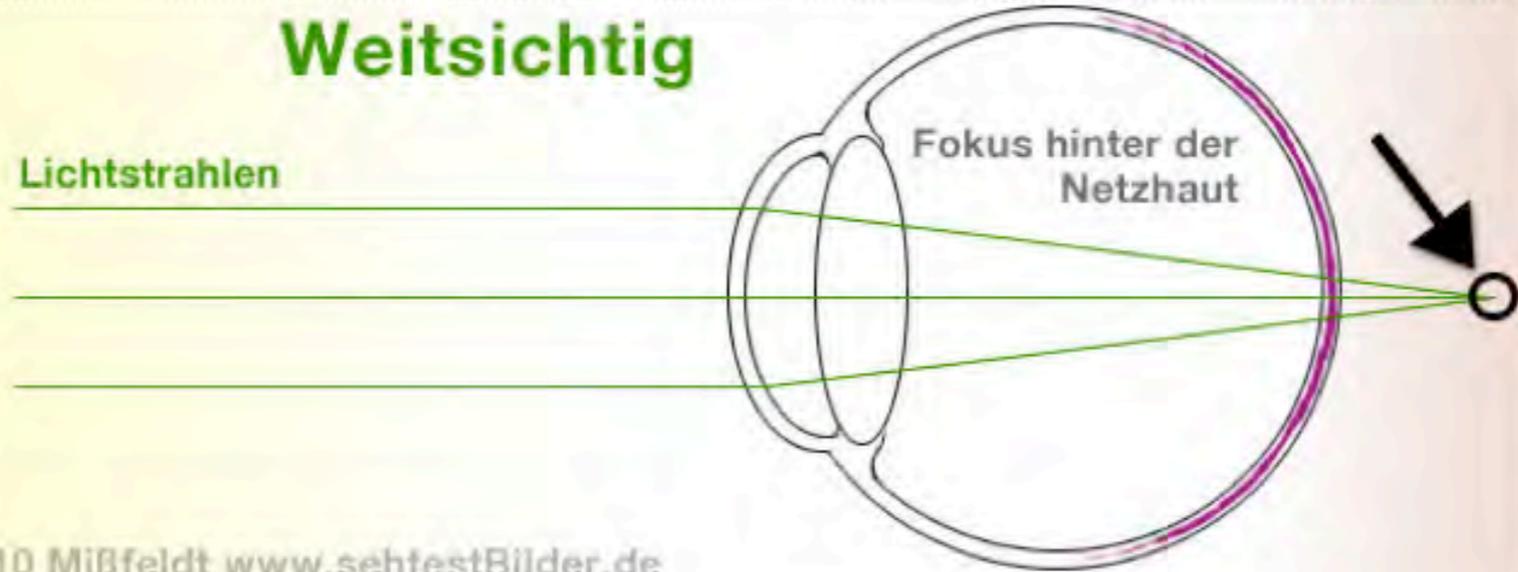
Normalsichtig

Lichtstrahlen



Weitsichtig

Lichtstrahlen



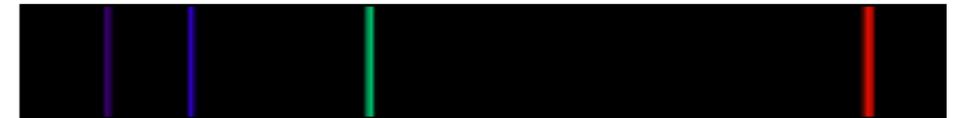
FRAUNHOFER LINIEN

Um die Elemente der Sonne zu bestimmen, beobachtet man ebenfalls das Spektrum dieser Lichtquelle. Bei dieser ist es aber so, dass die Sonne in allen Wellenlängen leuchtet, aber durch die Absorption und erneute Emission bestimmter Wellenlängen durch Elemente auf der Oberfläche diese Wellenlängen im Spektrum nicht vorkommen. Diese dunklen Linien im Spektrum nennt man Fraunhofer Linien. Sie sind das Spektrum der Element, aus denen die Sonne besteht.

Kontinuierliches Spektrum: Vollständiges Spektrum



Emissionslinien: Die Wellenlängen, in denen ein Element leuchtet



Absorptionslinien: Die Linien, die im Sonnenspektrum fehlen



Related Glossary Terms

Index

<http://de.wikipedia.org/wiki/Spektrallinie>

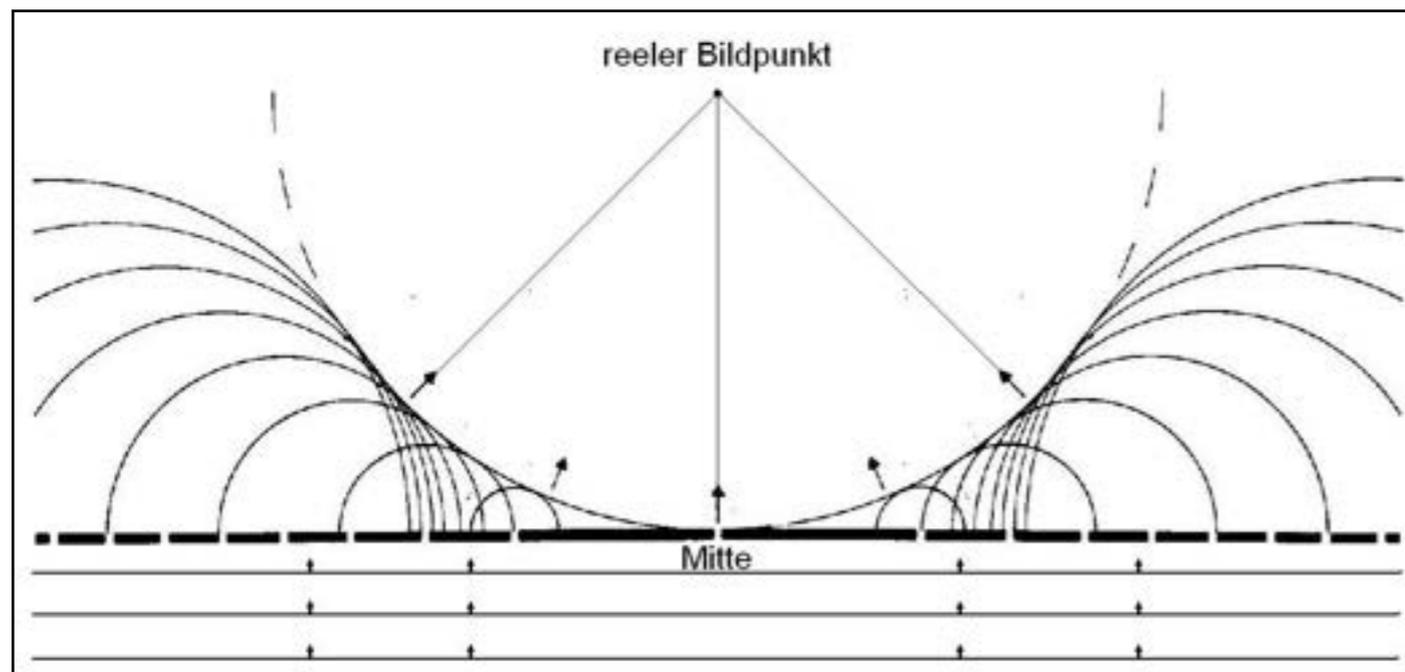
FRESNELSCHE-ZONENPLATTE

Eine Fresnelsche Zonenplatte ist eine Anordnung aus konzentrischen Zonen, deren Radien nach der Formel

$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{gf}{f+g}}$ angeordnet sind und abwechselnd lichtdurchlässig und lichtundurchlässig sind. Dieses

Spaltmuster kann Licht beugen und somit funktioniert es wie eine Linse mit Brennweite f ; Gegenstandsweite g ; Wellenlänge λ ; $n=1,2,3,4,\dots$

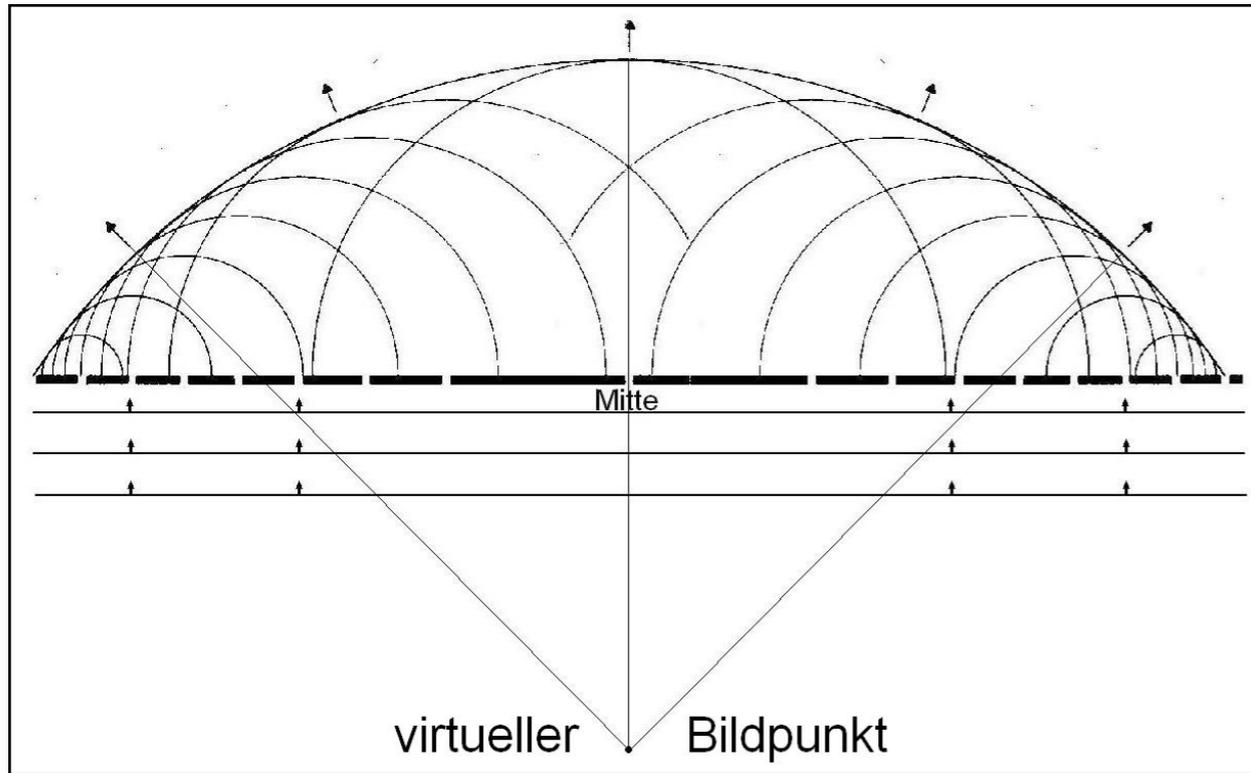
Trifft eine ebene Welle auf die Fresnelsche Zonenplatte, deren Gegenstandsweite unendlich ist, wird sie im Brennpunkt gebündelt. Somit entsteht ein reeller Bildpunkt im Abstand f zur Platte.



Die Wellenfront, die auf den reellen Bildpunkt zuläuft, kann durch das Einzeichnen von einzelnen Elementarwellen konstruiert werden. Im mittleren Spalt ist die Elementarwelle zum Zeitpunkt T_0 eingezeichnet. Geht man einen Spalt nach außen, so ist dort eine Elementarwelle eingezeichnet, die zu einem Zeitpunkt „-T“, also genau eine Periode früher entstanden ist. Geht man drei Spalten nach außen wird die

Elementarwelle zum Zeitpunkt „ $-2T$ “ gezeichnet. Führt man dies weiter fort, so ergänzen sich diese Elementarwellen zu einer Wellenfront, die auf den reellen Bildpunkt zuläuft.

Zeichnet man jedoch nach außen die Elementarwellen zu jeweils einer späteren statt früheren Periode, also „ $+T$ “, ein, ergibt sich ein anderes Bild. Es entsteht eine Wellenfront, die von einem virtuellen Bildpunkt hinter der Platte kommt. (Dieser Punkt ist die Position des Objekts bei der Rekonstruktion eines Hologramms.)



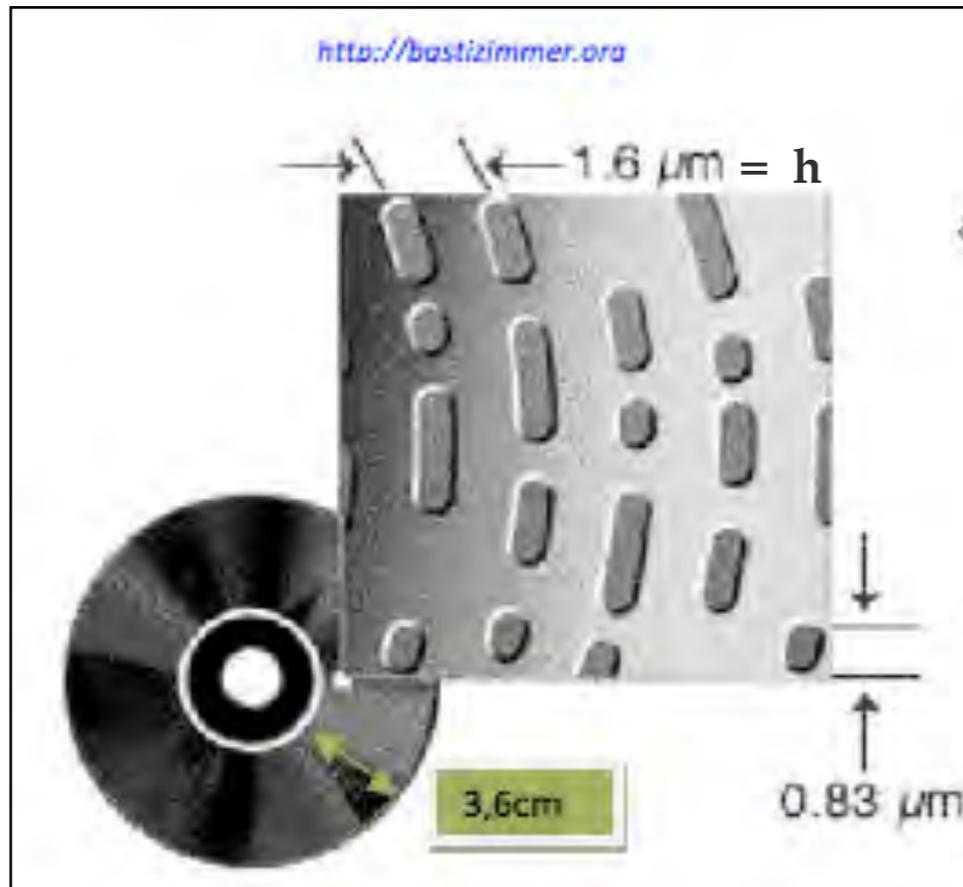
Die Fresnelsche Zonenplatte hat somit die Eigenschaften einer **Sammellinse** und einer **Zerstreuungslinse**.

Verwandte Glossarbegriffe

Beugung am Einfachspalt, Interferenz, Interferenz am Doppelspalt

Index

Haardicke: CD oder DVD?



Licht kann auch an andere Strukturen gebeugt werden. Auf einer CD, DVD oder Blue-Ray Disc sind die Daten in Spurrillen gespeichert. Diese Spurrillen wirken für einfallendes Licht wie ein optisches Gitter, an dem es reflektiert wird. Je enger die Rillen beieinander liegen (je kleiner der Gitterabstand ist), desto mehr Speicherplatz ist vorhanden. Eine DVD hat mehr Speicherplatz als eine CD.

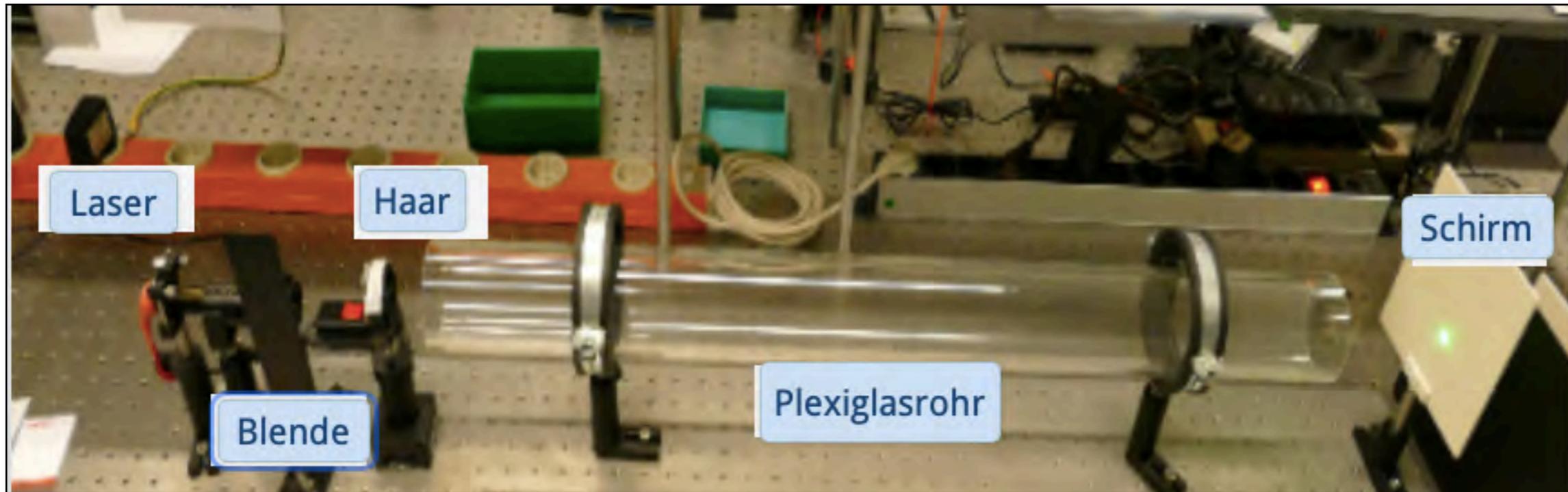
Für die Reflexion von Licht an einem optischen Gitter gilt die gleiche Formel wie für die Beugung am Doppelspalt, nur dass hier h der Gitterabstand (Abstand zweier Spurrillen) ist.

Schaue dir dazu nun die Formel für die Beugung an einem Gitter noch einmal an. Dieses Mal ist sie nach der Ablenkung des Lichtstrahls, also d , aufgelöst:

$$d = \frac{\lambda D}{h}$$

Wie muss sicher der Gitterabstand (h) ändern, damit die Ablenkung größer wird?

[Lösung hier!](#)



Baue den Versuch wie auf dem Bild auf. Der von der CD oder DVD reflektierte Laserstrahl sollte auf der Rückseite des Schirms auftreffen.

Teste, bei welchem der Versuchsobjekte er stärker abgelenkt wird und beantworte mit diesem Versuch die Frage auf der nächsten Seite. Wie kann man dazu die Schlussfolgerungen aus dem Vorversuch nutzen?

Für Profis:

Warum funktioniert dieser Versuch mit einer Blue-Ray-Disc nicht? Kannst du dir erklären, warum die Blue-Ray Disc diesen Namen erhalten hat?

Welche Scheibe ist die DVD?

Welche Antwort ist richtig?

- a) Nr. 1
- b) Nr. 2
- c) Keine von beiden
- d) Es sind beides DVDs

Related Glossary Terms
Index

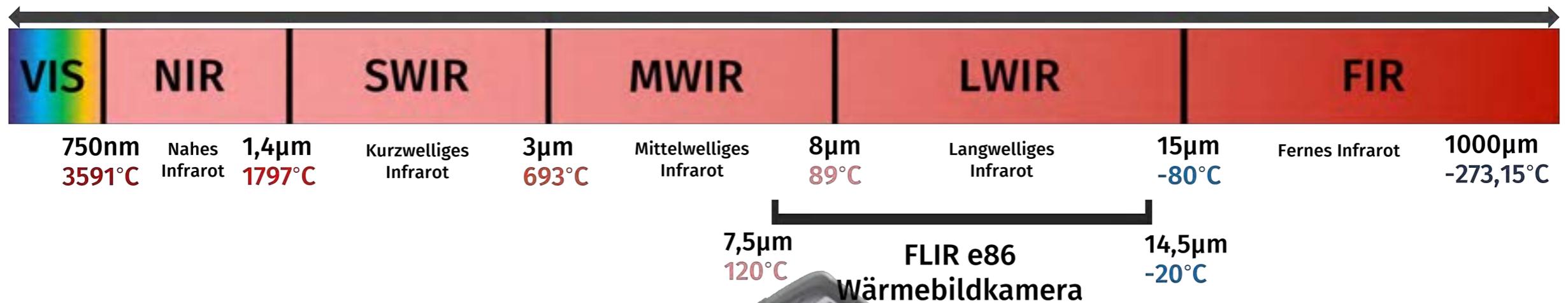
Antwort a) ist richtig.

INFRAROT SPEKTRUM

Das Spektrum der Infrarot Strahlung ist sehr groß und wird in mehrere Bereiche geteilt.

So ist auch die Wärmebildkamera, welche ihr nutzen werdet an einen bestimmten Bereich gebunden.

Das Emissioinspektrum zusammen mit dem Eigenschaften des Materials ist einer Temperatur zuzuordnen. So kann die Wärmebildkamera nur in dem ihr sichtbaren Bereich Temperaturen ermitteln.



Wichtig!

Wärmebild bedeutet nicht Infrarotbild.

Das Wärmebild ist nur eine Repräsentation der Temperaturen anhand der Infrarotstrahlung. Die eigentliche Infrarot-Emission kann sich anders ausprägen.



Da die Wärmebildkamera nur von 7,5µm bis 14,5µm blicken kann, ist sie an die Temperaturen zwischen -20°C und 120°C gebunden.

INTERFERENZ

Wenn Wellen aufeinandertreffen können, sie sich gegenseitig verstärken oder abschwächen. Diesen Effekt nennt man Interferenz. Trifft ein Maximum auf ein Maximum, entsteht ein doppelt so hohes Maximum. Trifft dagegen ein Maximum auf ein Minimum, heben sich die Wellen gegenseitig auf. So können komplizierte Interferenzmuster, aus Stellen gegenseitiger Auslöschung und Verstärkung entstehen.



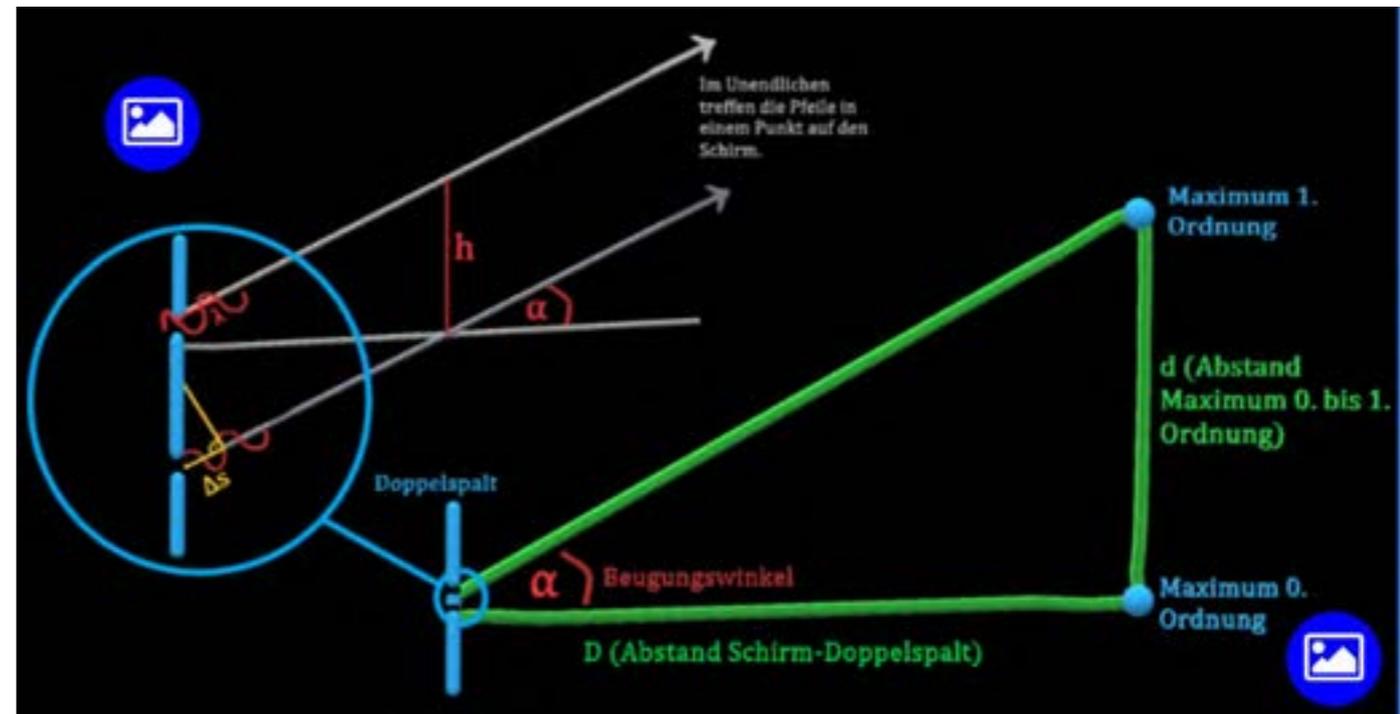
Related Glossary Terms

Fresnelsche-Zonenplatte, Interferenz am Doppelspalt

Index

INTERFERENZ AM DOPPELSPALT

Weil die Herleitung der Beugung am Einfachspalt, wie es an einem Haar der Fall ist, sehr kompliziert ist, wird hier die Formel für die Interferenz am Doppelspalt erklärt, die ein ähnliches Interferenzmuster erzeugt. Wenn der Längenunterschied der Strecke von einem Spalt zu einem Punkt auf dem Schirm und vom anderen Spalt zu dem gleichen Punkt exakt eine Wellenlänge ist, befindet sich an diesem Punkt das erste Maximum.



Die beiden Winkel in der Zeichnung sind gleich, weil sie nur um 90° gedreht wurden. Weil der Spaltabstand im Vergleich zum Abstand vom Schirm extrem klein ist, kann man die beiden Strecken im linken Bild als parallel betrachten. Die anliegende Kathete des Dreiecks steht also senkrecht auf beiden Strecken. Deshalb ist die andere Kathete exakt der Längenunterschied der Strecken. Zur Erinnerung; wenn dieser exakt eine Wellenlänge (λ) ist, ist α der Winkel, unter dem das 1. Maximum erscheint. Es gilt also:

$$\sin(\alpha_1) = \frac{\lambda}{h} \quad (\text{aus dem linken Bildausschnitt}) \quad \text{und} \quad \sin(\alpha_1) = \frac{d}{D} \quad (\text{aus dem rechten Bildausschnitt})$$

Da man mit beiden Formeln $\sin(\alpha_1)$ berechnet, kann man sie gleichsetzen. Aufgelöst nach dem Spaltabstand bzw. der Haardicke (h) ergibt sich: $h = \lambda \frac{D}{d}$

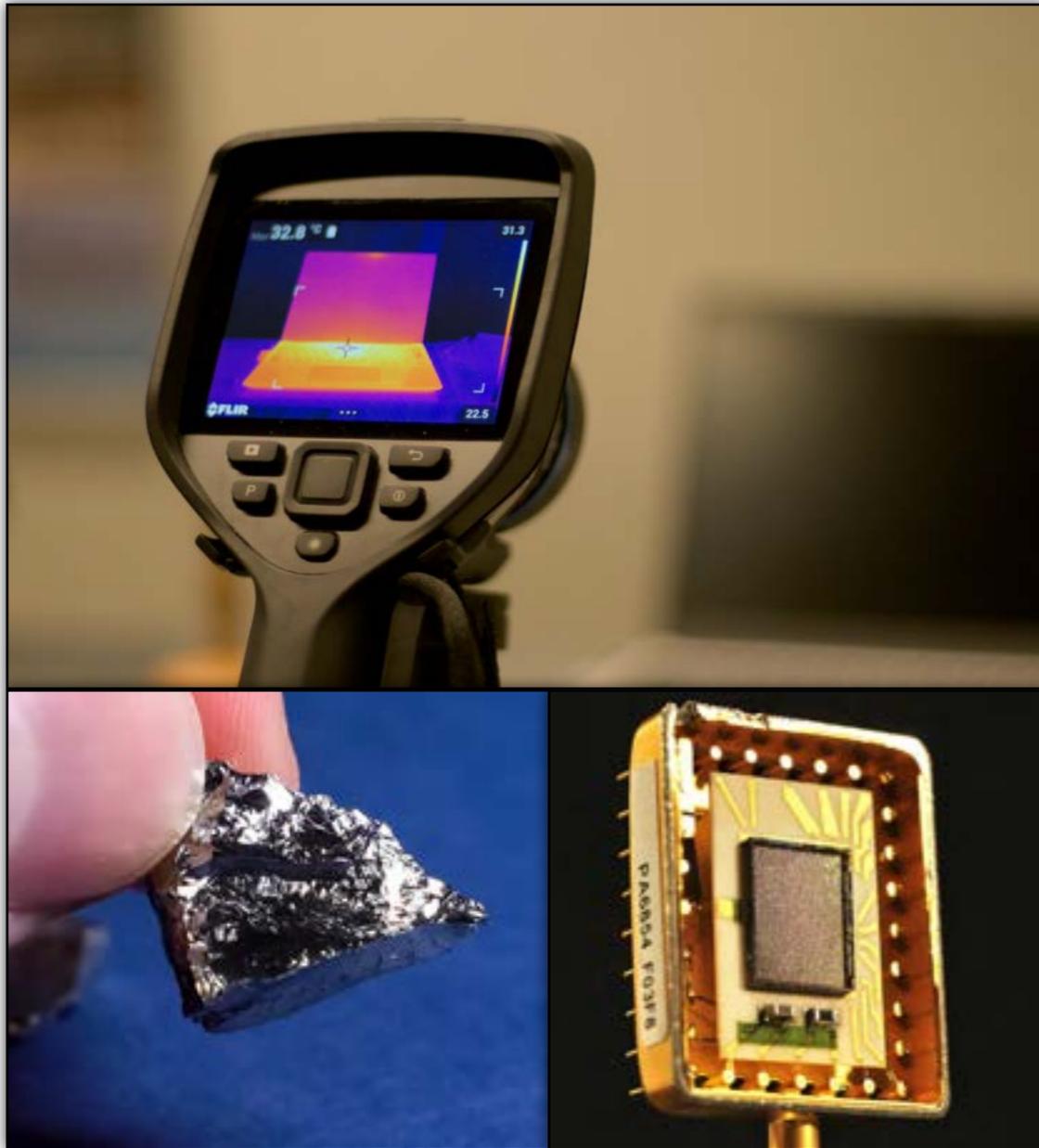
Wie man sieht, unterscheidet sich diese Formel nur im Vorfaktor $\frac{3}{2}$ von derjenigen aus dem Versuch.

Related Glossary Terms

Fresnelsche-Zonenplatte, Interferenz

Index

FUNKTIONSWEISE



Germanium (Quelle: <https://www.flir.com/discover/rd-science/what-are-ir-camera-lenses-made-of/>)

Microbolometer (Quelle: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microbolometer>)

Eine Infrarotkamera funktioniert sehr ähnlich zu einer normalen optischen Kamera, indem sie mittels geometrischer Optik und einem Sensor das Infrarotlicht aufammelt.

Mit dem Unterschied, dass sie einen speziellen Microbolometer Sensor zum aufnehmen der Bilder nutzen. Auch die Linsen zum fokussieren des Infrarotlichts bestehen aus keinem normalen Glas. Sie bestehen aus Germanium da dieses transparent für Infrarotlicht ist.

Diese Infrarotaufnahmen werden uns anschließend in Falschfarben auf dem Bildschirm wiedergegeben.

Auf der nächsten Seite gibt es noch mehr Infos zur Bedienung.

FORTGESCHRITTENE BEDIENUNG



Im Hauptmenü stehen einem einige Optionen zur Verfügung. So kann man hier die Kamera kalibrieren oder auch nur die falsche Farbpalette ändern.

Bitte nicht an den fortgeschrittenen Einstellungen spielen. Alles andere kann verändert werden, aber bitte nach dem verwenden wieder rückgängig machen.

HERLEITUNG VORFAKTOR

Durch die Absorption der thermischen Strahlung der Erdoberfläche steigt die Temperatur der Atmosphäre und sie beginnt nun ihrerseits in Richtung Erdoberfläche ($I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}}$) und in Richtung Weltall ($I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}}$) abzustrahlen. Da die Atmosphäre in keine Richtung bevorzugt abstrahlt, gilt in diesem einfachen Modell:

$$I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} = I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}} \quad (2)$$

Da sich die Atmosphäre auch im Strahlungsgleichgewicht befindet, muss die eingestrahelte Leistung der absorbierten entsprechen, also:

$$I_{\text{Erdob.} \rightarrow \text{Atm.}} = I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} + I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}} \quad (3)$$

Mit den Erkenntnissen (1), (2) und (3) folgt insgesamt:

$$\underbrace{I_{\text{Erdob.} \rightarrow \text{Atm.}}}_{\text{von der Atmosphäre aufgenommene Energie}} = 0,8 \cdot I_{\text{Erdob.} \rightarrow} = \underbrace{I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} + I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}}}_{\text{von der Atmosphäre abgestrahlte Energie}} = 2 \cdot I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}}$$

Und damit:

$$I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} = 0,4 \cdot I_{\text{Erdob.} \rightarrow} \quad (4)$$

40 % der von der Erde emittierten Strahlung werden also von der Atmosphäre wieder in Richtung Erde zurückgeschickt. Und hier liegt der grundlegende Unterschied zwischen einer Erde mit Atmosphäre und der Felsenerde:

Die Erdoberfläche wird von der Atmosphäre als weitere Strahlungsquelle bestrahlt!

Auch hier wird sich ein Strahlungsgleichgewicht einstellen und so muss die Erdoberfläche diese zusätzlich eingestrahelte Energie auch wieder abstrahlen. Es gilt also:

$$\underbrace{I_{\text{Erdob.} \rightarrow}}_{\text{von der Erdoberfläche abgestrahlte Energie}} = \underbrace{I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdob.}} + I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}}}_{\text{von der Erde aufgenommene Energie}} = \underbrace{I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdob.}} + 0,4 \cdot I_{\text{Erdob.} \rightarrow}}_{\text{mit Gleichung (4)}}$$

Aufgelöst nach $I_{\text{Erdob.} \rightarrow \text{Atm.}}$ ergibt sich:

$$I_{\text{Erdob.} \rightarrow} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdob.}} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 397 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

JUSTIEREN DER SPIEGEL

Achtung: Beim Justieren nicht auf die Spiegel fassen!

Justiert wird, indem man die Schrauben der Spiegelhalterung verdreht. Dadurch wird der Laserstrahl senkrecht bzw. waagrecht abgelenkt. Feinjustiert wird, indem man an den Justierschrauben dreht, wodurch der Spiegel gekippt und der Laserstrahl horizontal oder vertikal abgelenkt wird.

Grobjustierung der Höhe: Schraube am Post (=Stange der Halterung) lösen.

Grobjustierung seitlich: Schraube lösen, mit der die Halterung auf dem Lasertisch befestigt ist.

Related Glossary Terms

Index

JUSTIEREN DER POLARISATIONSFILTER

Achtung: Beim Justieren nicht auf die Spiegel fassen!

Die Polarisationsfilter sind oft dejustiert. Hier sind ein paar Tipps, wie du versuchen kannst, das Problem zu lösen:

-Stelle einen Filter in je einen Arm und drehe ihn, bis die Interferenz verschwindet: Die Filter stehen jetzt senkrecht aufeinander.

-Stelle dann den 3. Filter zwischen Strahlteiler und Schirm und drehe ihn, bis die Interferenz möglichst stark ist. Nun steht der 3. Filter im 45° -Winkel zu den anderen beiden!

Related Glossary Terms

Index

JUSTIERMODUS - MESSMODUS QUANTENKRYPTOGRAPHIE

Die Sensorelektronik hat einen grünen Knopf, mit dem zwischen dem Justiermodus und dem Messmodus umgestellt wird. Beim **Justiermodus** leuchtet die seitliche LED **gelb**. Ist dieser Modus aktiviert, dann leuchten **BEIDE** blauen LEDs an den Sensoren, wenn ein Laserpuls mit gleicher Intensität bei ihnen eintrifft - das entspricht den Fällen, bei denen die Basen von Alice und Bob nicht übereinstimmen.

Der **Messmodus**, bei dem die LED **grün** leuchtet, verhält sich im Fall unterschiedlicher Basen anders: Er wählt zufällig eine der beiden blauen LEDs aus und lässt diese aufleuchten. Dies simuliert den Weg eines einzelnen Photons, das am Strahlteiler mit 50% Wahrscheinlichkeit zufällig transmittiert oder reflektiert wird.

Verwandte Glossarbegriffe

Index

KETTENLÄNGEN-TEST: WIE ZUFÄLLIG IST DIE ZUFÄLLIG GEWÜRFELTE BINÄRKETTE?

Wir fragen uns, wie wahrscheinlich eine Einser-Kette der Länge „mindestens 4“ bei 100 Würfeln ist.

Es ist $1 \leq \text{Lauflänge (hier 4)} \leq 100$) in einer Bitfolge der Länge 100 erfüllt, sodass wir nun die Wahrscheinlichkeit berechnen können.

Um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, teilen wir die 100 Zahlen (0en und 1 en) in 25 4er-Blöcke auf.

Nun ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kette der Länge 4 entsteht genau $2/16$ und dass es NICHT passiert, dann $1 - 2/16 = 7/8$ (=Gegenwahrscheinlichkeit).

Jetzt ist es notwendig, mit 25 potenzieren, da wir zu Beginn die 100 aufgeteilt haben, aber wir die Länge der Wahrscheinlichkeit „mindestens eines 4er-Blocks bei 100 Zufallszahlen“ betrachten wollen.

Wir potenzieren hierfür die Wahrscheinlichkeit für das Gegenereignis $(7/8)^{25} = 0,0354\dots$ und runden hier etwas auf (da es sich bei diesem Rechenweg um eine Abschätzung handelt).

Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 95 % gibt es bei guten Zufallszahlen eine 4er Kettenlänge. Bei nur 100 Würfeln ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass vier Zahlen ohne Wechsel aufeinanderfolgend vorkommen. Überprüfe deine eigenen gewürfelten Zahlen.

Related Glossary Terms

Index

KOPENHAGENER INTERPRETATION

Die Vermeidung einer anschaulichen Vorstellung, wie sich Quantenobjekte „unterwegs“ verhalten, nennt man auch Kopenhagener Interpretation.

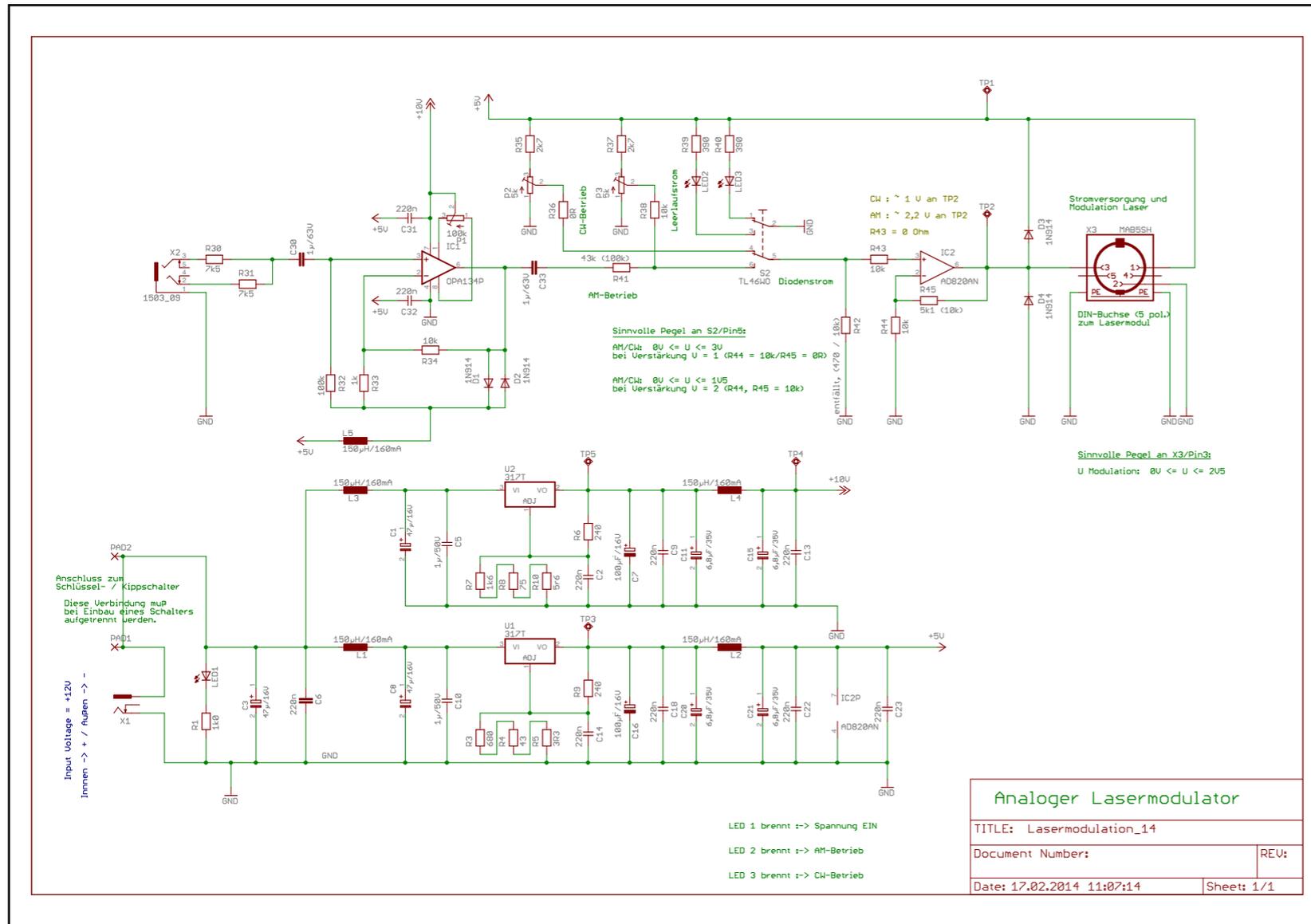
Die Kopenhagener Deutung ist eine Erklärung dafür, wie die Welt der winzigen Teilchen in der Quantenmechanik funktioniert. Sie besagt, dass diese Teilchen, wie Elektronen auch, bevor wir sie messen, nicht wirklich an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Zustand sind. Stattdessen befinden sie sich in einer Art „unscharfem“ oder auch „verschmiertem“ Zustand, bei dem sie überall sein könnten und verschiedene Eigenschaften gleichzeitig haben könnten. Erst wenn wir eine Messung durchführen, „kollabiert“ dieser Zustand und das Teilchen zeigt uns einen bestimmten Ort und eine bestimmte Eigenschaft. Dies führt dazu, dass die Quantenmechanik sehr probabilistisch ist, da wir im Voraus nicht genau vorhersagen können, was bei einer Messung passieren wird.

Related Glossary Terms

Index

Lasermodulator

Schaltbild des im Schülerlabor verwendeten Lasermodulators.



Related Glossary Terms

Index

LAYERDISPLAYS / PARALLAXENFUNKTION

Diese Technik kommt ganz ohne Brille aus. Das Paradebeispiel hierfür ist der Nintendo 3DS, Fernseher oder auch Smartphones.

Im Gerät sind mehrere Schichten (*layers*) verbaut. Jede Schicht hat dabei eine ganz bestimmte Funktion.

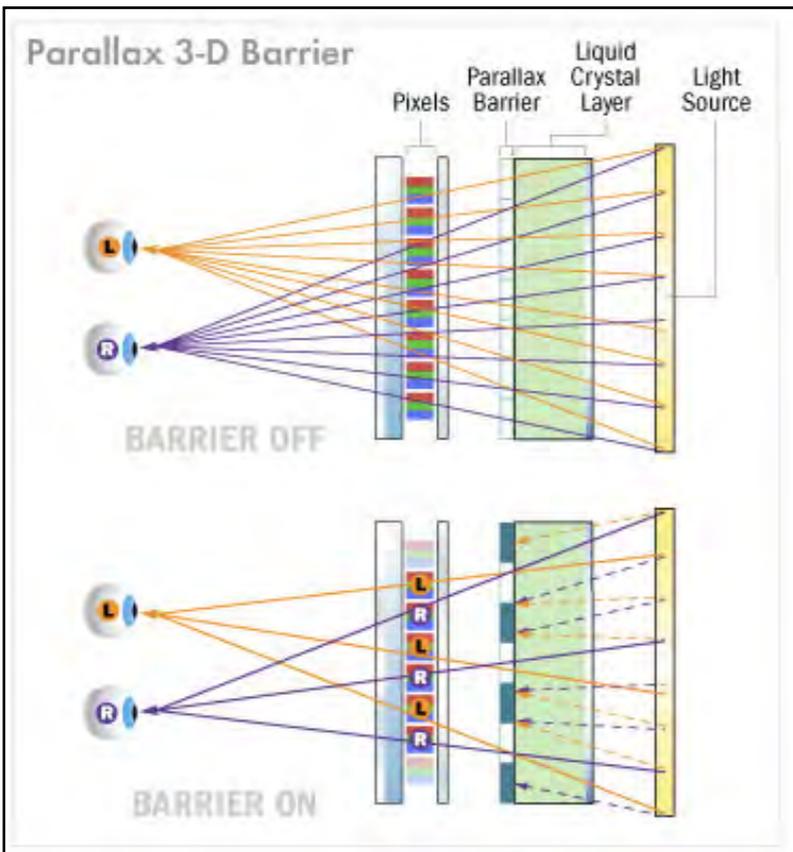
Die erste Schicht bringt uns nur das Hintergrundlicht (*source light*).



Die zweite besteht aus einem LCD-Display, welches die für uns sichtbaren Bilder aussendet.

Die dritte Schicht nennt man Parallaxenbarriere. Wenn man sie aktiviert, sorgt sie dafür, dass immer nur ein Bild aus einem Winkel eines unserer Augen erreicht. Ein guter Vergleich sind alte Wackelbilder: Hier ändert man durch Neigung den Winkel und somit das gesehene Bild. In den Displays geschieht all dies elektronisch.

Nur durch vorheriges Kallibrieren kann der sogenannte 'sweet spot' gefunden werden. In diesem Punkt trifft wirklich immer nur ein Bild in das passende Auge. Dies ist auch der große Nachteil dieser Technik, da der Nutzer, um den Effekt genießen zu können, relativ statisch in seiner Position bleiben muss.



**Related Glossary Terms
Index**

LCD-DISPLAYS

Liquid Crystal Displays (LCD), kennen wir alle von zuhause, sind sie doch in Fernsehern und Computern eingebaut. Doch wie funktionieren sie und wieso senden sie bereits polarisiertes Licht aus?

Die Displays bestehen aus einer Schicht langkettiger, molekularer Flüssigkristalle, die zwischen zwei speziell polierten Glasplatten liegen. Diese sind bei Raumtemperatur frei gegeneinander beweglich. Die Glasplatten sind von der Außenseite mit Polarisationsfolien beklebt, deren Transmissionsrichtungen senkrecht zueinander stehen. Die Kristalle richten sich durch die spezielle Herstellung der Glasplatten so aus, dass sie auf den gegenüberliegenden Seiten zueinander senkrecht stehen. Zwischen diesen bildet sich eine Art Wendeltreppe (siehe nebenstehende Abbildung).

Die Kristalle richten sich durch die spezielle Herstellung der Glasplatten so aus, dass sie auf den gegenüberliegenden Seiten zueinander senkrecht stehen. Zwischen diesen bildet sich eine Art Wendeltreppe (siehe nebenstehende Abbildung).

Trifft ein Lichtstrahl von unten auf die Zelle wird er, durch den Polarisator in Richtung der Moleküle ausgerichtet. Durchläuft das Licht die Kristallzelle, kommt es zu einer außergewöhnlichen Wechselwirkung. Die Polarisationsrichtung dreht sich um 90° , da sie der Ausrichtung der Moleküle folgt.

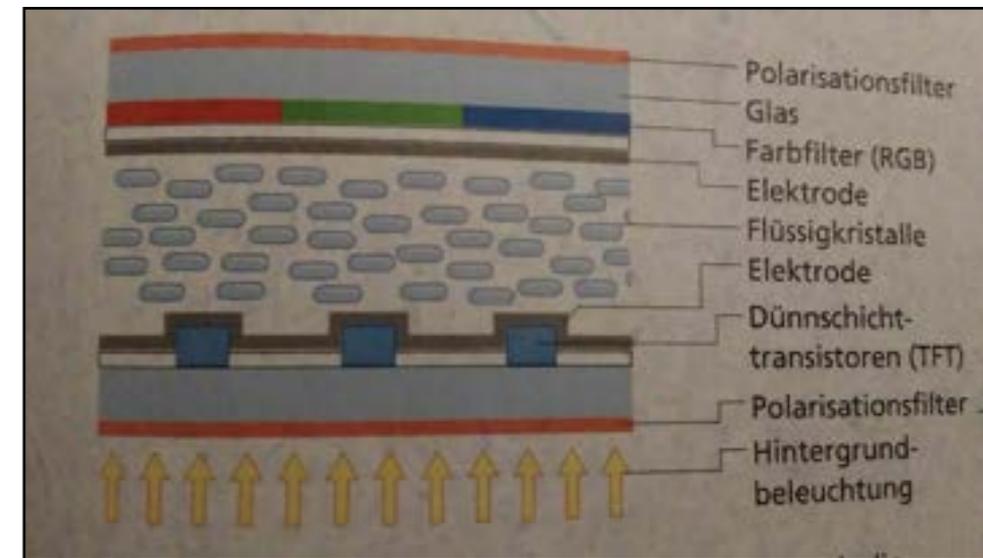
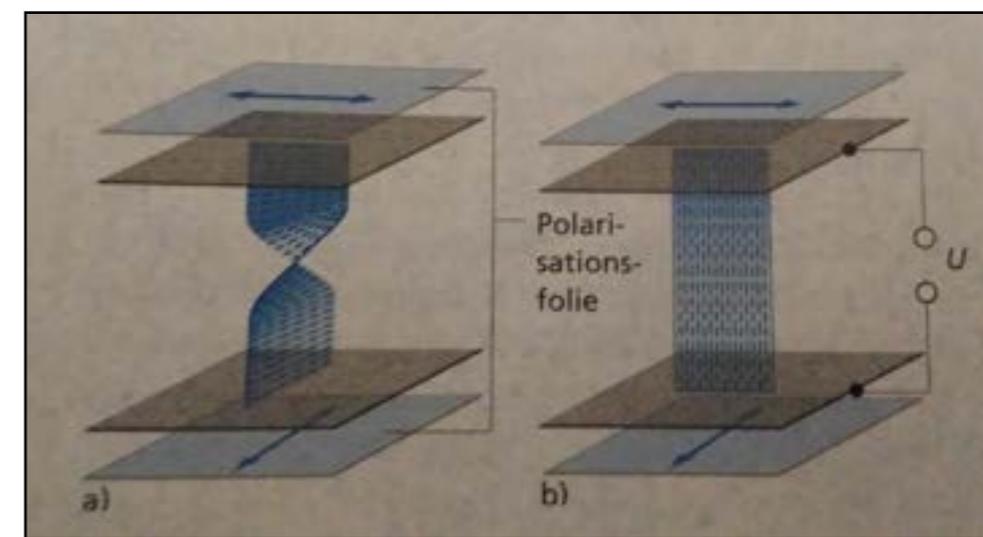
Durch das Anlegen einer Spannung an die Zelle, kann deren Fähigkeit Licht durchzulassen, beeinflusst werden. In einem LCD-Display gibt es Zellen in den Farben Rot, Grün und Blau. Diese können mithilfe von Transistoren angesteuert werden. Die Zellen lassen sich einzeln an- und ausschalten. So erhalten wir ein aus Pixeln zusammengesetztes Bild. Da das Licht, welches von der Hintergrundbeleuchtung kommt, den soeben beschriebenen Polarisationsprozess durchläuft, sendet ein LCD-Display polarisiertes Licht aus.

Durch das Anlegen einer Spannung an die Zelle, kann deren Fähigkeit Licht durchzulassen, beeinflusst werden. In einem LCD-Display gibt es Zellen in den Farben Rot, Grün und Blau. Diese können mithilfe von Transistoren angesteuert werden. Die Zellen lassen sich einzeln an- und ausschalten. So erhalten wir ein aus Pixeln zusammengesetztes Bild. Da das Licht, welches von der Hintergrundbeleuchtung kommt, den soeben beschriebenen Polarisationsprozess durchläuft, sendet ein LCD-Display polarisiertes Licht aus.

Durch das Anlegen einer Spannung an die Zelle, kann deren Fähigkeit Licht durchzulassen, beeinflusst werden. In einem LCD-Display gibt es Zellen in den Farben Rot, Grün und Blau. Diese können mithilfe von Transistoren angesteuert werden. Die Zellen lassen sich einzeln an- und ausschalten. So erhalten wir ein aus Pixeln zusammengesetztes Bild. Da das Licht, welches von der Hintergrundbeleuchtung kommt, den soeben beschriebenen Polarisationsprozess durchläuft, sendet ein LCD-Display polarisiertes Licht aus.

Durch das Anlegen einer Spannung an die Zelle, kann deren Fähigkeit Licht durchzulassen, beeinflusst werden. In einem LCD-Display gibt es Zellen in den Farben Rot, Grün und Blau. Diese können mithilfe von Transistoren angesteuert werden. Die Zellen lassen sich einzeln an- und ausschalten. So erhalten wir ein aus Pixeln zusammengesetztes Bild. Da das Licht, welches von der Hintergrundbeleuchtung kommt, den soeben beschriebenen Polarisationsprozess durchläuft, sendet ein LCD-Display polarisiertes Licht aus.

Durch das Anlegen einer Spannung an die Zelle, kann deren Fähigkeit Licht durchzulassen, beeinflusst werden. In einem LCD-Display gibt es Zellen in den Farben Rot, Grün und Blau. Diese können mithilfe von Transistoren angesteuert werden. Die Zellen lassen sich einzeln an- und ausschalten. So erhalten wir ein aus Pixeln zusammengesetztes Bild. Da das Licht, welches von der Hintergrundbeleuchtung kommt, den soeben beschriebenen Polarisationsprozess durchläuft, sendet ein LCD-Display polarisiertes Licht aus.



Abbildungen aus: Diehl Bardo, Erb Roger, Harri Heise und Kotthaus Udo, eds. 2009. *Phyisk Oberstufe-Gesamtband*. Berlin. Cornelsen Verlag.

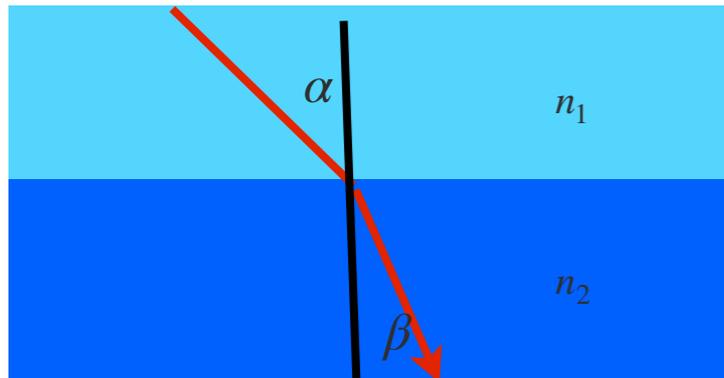
Verwandte Glossarbegriffe

Index

LICHTBRECHUNG

Zusammenfassung:

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit verschiedenen Brechungsindices, wird er an der Grenze gebrochen, d.h. er ändert seine Richtung. Geht der Lichtstrahl von einem Medium mit geringem Brechungsindex (z.B. Luft) in eines mit höherem Brechungsindex (z.B. Wasser) über, wird der Lichtstrahl zum Lot auf der Grenze der Medien hin gebrochen - beim Eintritt in ein Medium mit geringerem Brechungsindex dagegen vom Lot weg. Dieser Löffel hat also einen Knick wegen des Phänomens der Brechung!



Material mit geringem Brechungsindex



Was ist **Brechung** also nun???

Brechung ist eine **Richtungsänderung** eines einfallenden Lichtstrahls auf ein anderes **Medium** mit **unterschiedlichem Brechungsindex**. Das passiert deswegen, weil sich Licht in verschiedenen Materialien unterschiedlich schnell ausbreitet. Wenn man das als Formel ausdrücken will, sieht das so aus:

$c(n)$ ist die Lichtgeschwindigkeit im Medium, c_0 ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und n ist der Brechungsindex.

$$c(n) = \frac{c_0}{n}$$

Genauer gibt es auf der nächsten Seite.

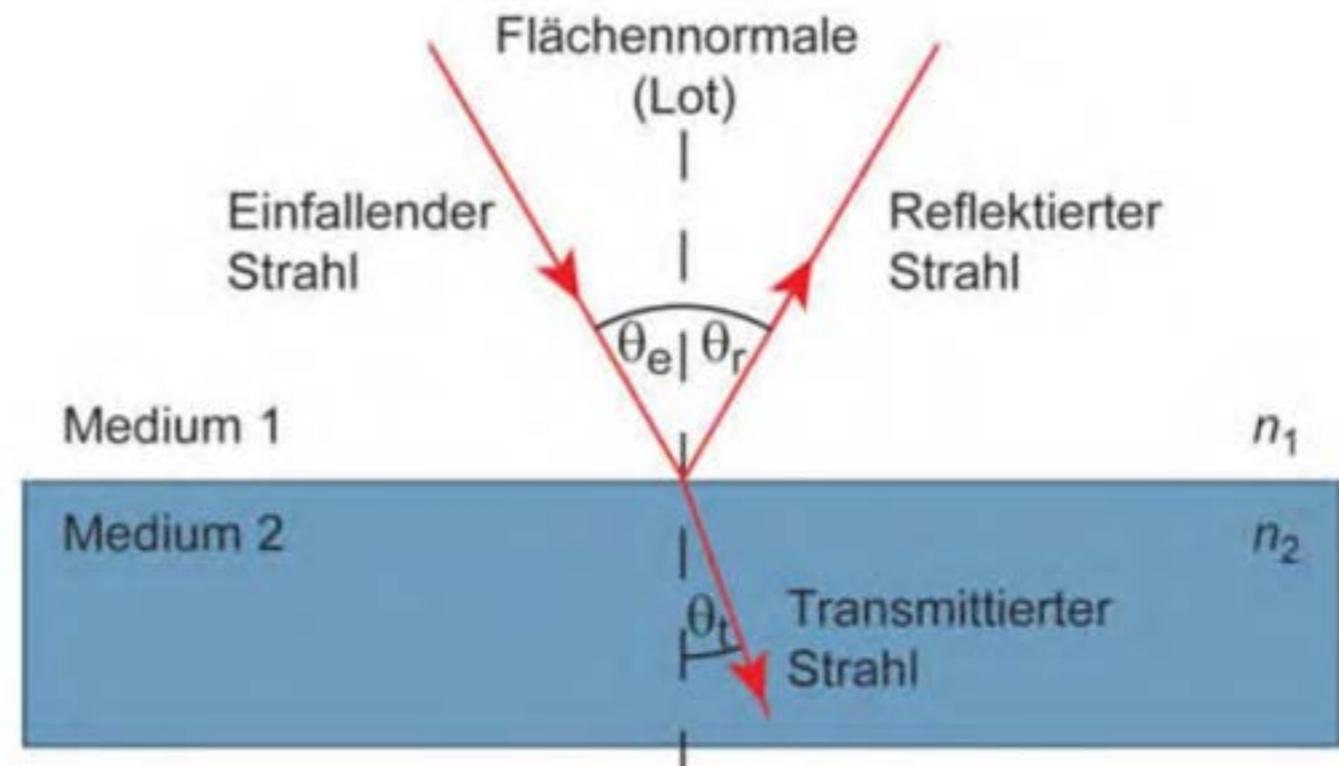
LICHTBRECHUNG

Im Bild wird die **Brechung** und **Reflexion** eines Strahls gezeigt: Ein **einfallender Strahl** aus dem **homogenen Medium 1** trifft auf die Oberfläche des **Mediums 2**. **n** ist der **Brechungsindex**, also eine einheitenlose Zahl die beschreibt, wie stark oder schwach das Licht gebrochen/reflektiert wird.

Die **Winkel** (e=**Einfallswinkel**, r=**Reflexionswinkel** und t=**Transmissionswinkel**) beschreiben hier den Verlauf der Strahlen.

Die Richtungsänderung des gebrochenen Strahles kann man durch das **Brechungsgesetz (Snelliussches Gesetz)** beschreiben:

$$n_1 \sin(\theta_e) = n_2 \sin(\theta_t)$$



LINSENGLEICHUNG

Strahlt der **abzubildende Gegenstand** Licht aus und **sammelt** sich dieses, nachdem es ein **optisches System** durchquert hat, in einem **Punkt** auf einem Schirm, so haben wir eine **Abbildung!**

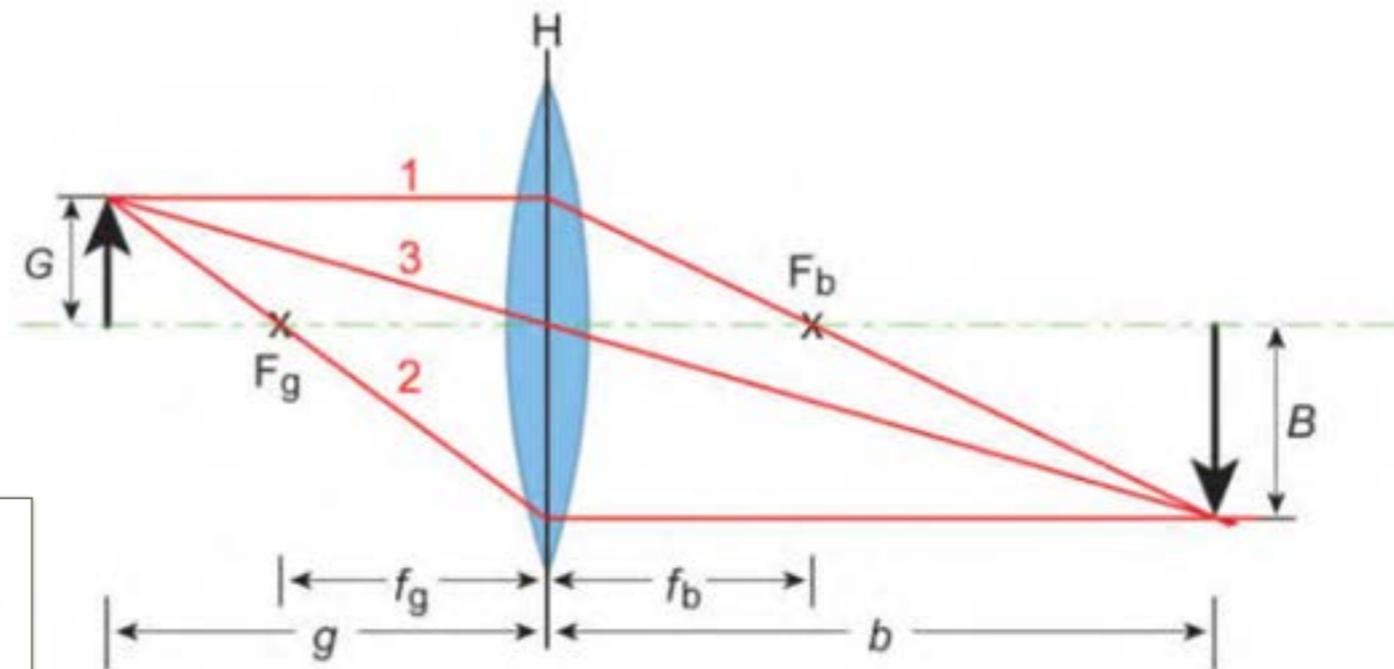
Hier gehen vom **Gegenstand** mit **Gegenstandsweite g** (Abstand von Gegenstand zu Linse) drei repräsentative Hilfsstrahlen aus. **Weg 1** verläuft erst **parallel** zur **optischen Achse** (Symmetrieachse) und dann durch den Brennpunkt F_b . **Weg 2** verläuft erst durch den Brennpunkt F_g und dann **parallel** zur Achse. **Weg 3** geht **direkt** durch den **Mittelpunkt** der Linse (Mittelpunktstrahl). Den Abstand von Linse zum Bild nennt man **Bildweite b**.

Disclaimer: In Wirklichkeit gehen natürlich sehr viel mehr Strahlen als auf dem Bild von dem Gegenstand aus.

Wichtig ist auch der **Brennpunkt F** der Linse, in dem sich achsparallel einfallende Strahlen **treffen**.

Die berühmte **Linsengleichung** oder auch **Abbildungsgleichung** beschreibt die Zusammenhänge dieser Größen:

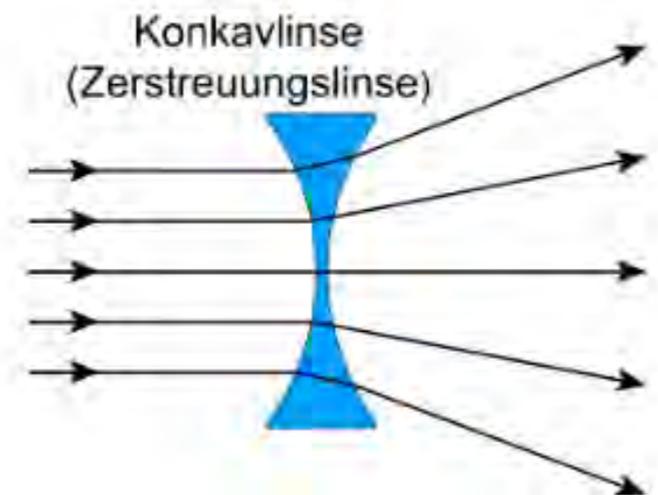
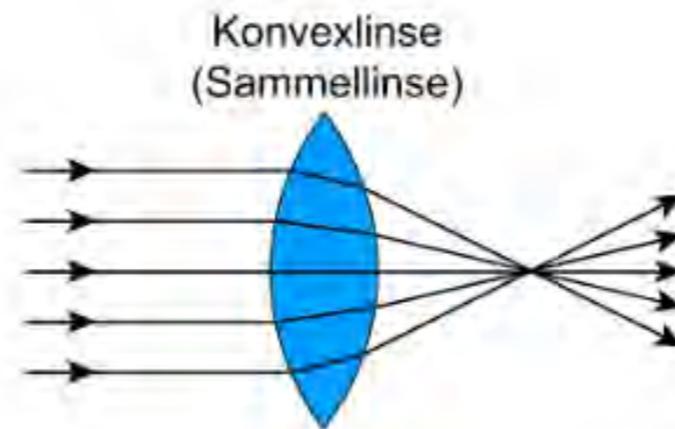
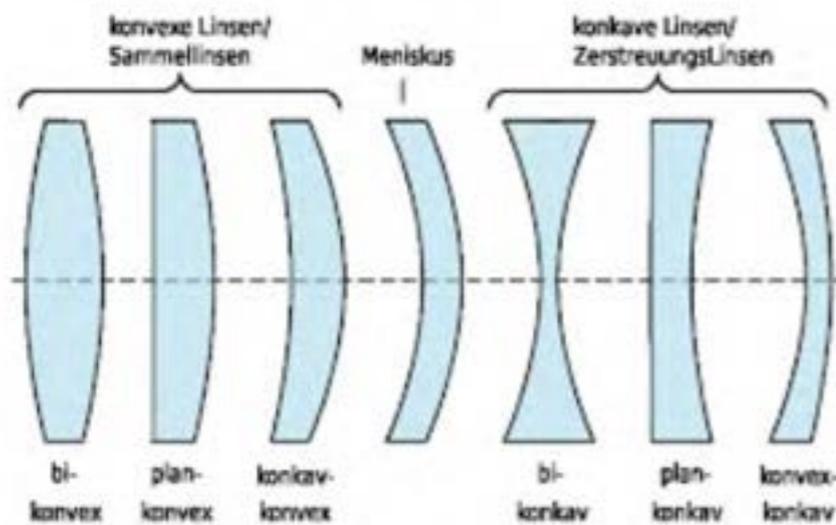
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$



LINSEN

Linse verändern den **Strahlengang**, indem sie Licht **zerstreuen** (konkave Linsen) oder **sammeln** (konvexe Linsen). Das tun sie, indem sie die Lichtstrahlen an der **Eintritts-** sowie **Austrittsfläche** gemäß dem vorher beschriebenen **Brechungsgesetz** brechen. In der Linse selber ändern die Strahlen nicht ihre Richtung.

Eine **bikonvexe Linse** sammelt die einfallenden Lichtstrahlen, eine **bikonkave** zerstreut sie.



LÖSUNG GEOMETRISCHE OPTIK, VERSUCH 1

Fragestellung: Gibt es eine zweite Gegenstandsweite (oder Bildweite), bei der du ein scharfes Bild erhältst?

Lösung: Im Experiment ist der zweite scharfe Bildpunkt sehr schwer zu lokalisieren. Das liegt daran, dass das Bild sehr klein ist. Mathematisch ist der Fall auch etwas für Profis, weil die Gleichung aufwändig zu lösen ist. Die Gleichung ist nämlich quadratisch und kann durch Lösen mit der Mitternachtsformel zwei Lösungen ergeben.

LÖSUNG BLUE-RAY-DISC

Weil die Spurrillenabstände auf einer Blue-Ray-Disc noch viel kleiner sind als auf einer DVD ($0.32 \mu\text{m}$), wird grünes Licht von diesem Gitter nicht mehr reflektiert. Man braucht Licht einer kleineren Wellenlänge (z.B. blaues), um diese Strukturen noch aufzulösen. Die Blue-Ray ist nach der Farbe des Lasers benannt, den man braucht, um sie auszulesen.

Related Glossary Terms

Mikrometer

Index

LÖSUNGEN SPEKTROMETER

Unten findest du die Auflösungen der verschiedenen Spektren unter Glossarkapitel „Spektrum 1-5“, bzw, hier: [Seite 315](#)

Related Glossary Terms

Spektrum 1, Spektrum 2, Spektrum 3, Spektrum 4, Spektrum 5

Index

MIKROMETER

$1 \mu\text{m} = 1 \text{ Mikrometer} = 10^{-6} = 0.000001 \text{ m}$

Related Glossary Terms

Lösung Blue-Ray-Disc, Nano

Index

NANOMETER

1 nm (Nanometer) = 10^{-9}m = 0.000000001 m

1 ns (Nanosekunde) = 10^{-9}s = 0.000000001 s

Related Glossary Terms

Mikrometer

Index

OPTISCH AKTIVE SUBSTANZEN

Alle Moleküle besitzen Ladungsschwerpunkte, also auch ein elektrisches Feld, das durch die Elektronen erzeugt wird. Da Licht auch ein elektrisches Feld besitzt, wechselwirkt das Feld der Moleküle mit dem Licht - die Welle wird abgelenkt. Doch die Moleküle sind in einer Lösung statistisch verteilt. Warum wird die Welle in der Zuckerlösung also nicht auch in die entgegengesetzte Richtung abgelenkt, sodass sie in der Summe unverändert am Ende der Küvette austritt?

Der Grund hierfür ist die Chiralität. Glucose ist chiral, d.h. sie besitzt keine Drehspiegelachse und kein exaktes Spiegelbild, welches die Ablenkung rückgängig machen könnte. Sie ist also optisch aktiv. Das Licht wird in der Glukoselösung daher immer in die gleiche Richtung abgelenkt. Glukose lenkt nach rechts ab, andere Stoffe (bspw. Fruktose) lenken nach links ab – abhängig von der jeweiligen Molekülstruktur.

Related Glossary Terms

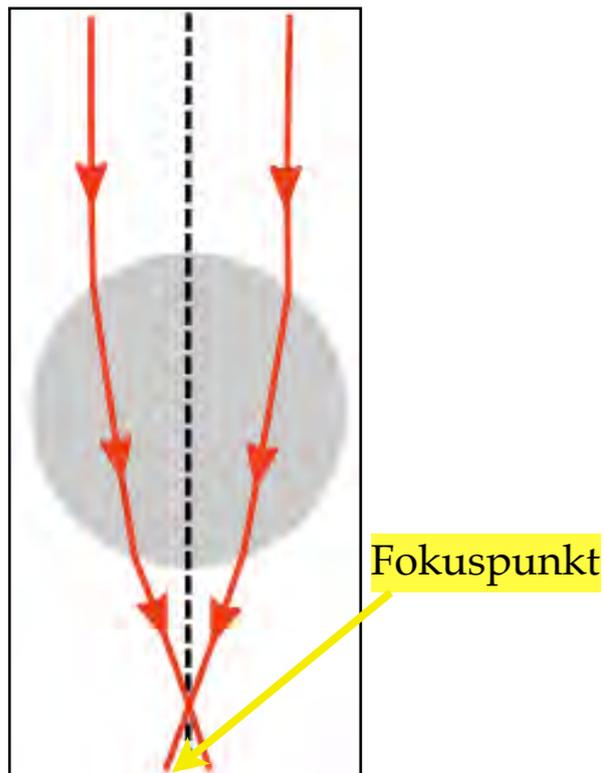
Polarisation

Index

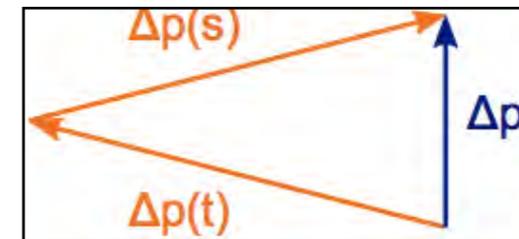
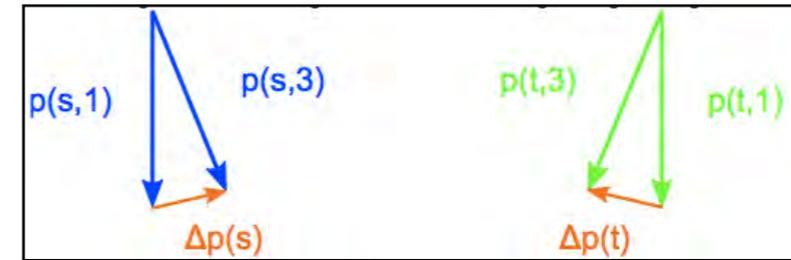
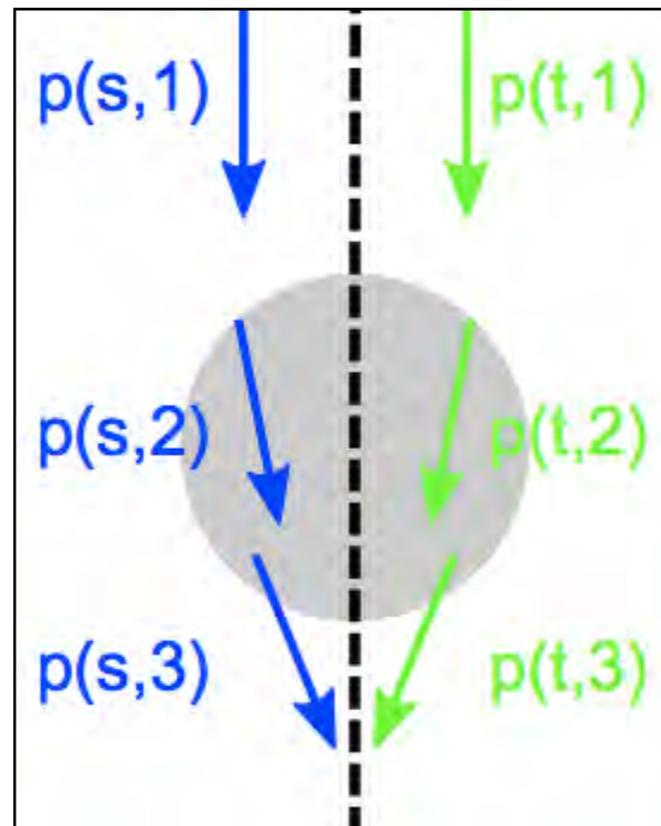
OPTISCHE PINZETTE

Wird eine winzige Kugel mit der optischen Pinzette eingefangen, wirkt auf sie immer ein Impuls auf den Fokuspunkt zu. Warum dies so ist, wird hier erklärt.

Der Strahlengang durch die Kugel, wenn sie sich oberhalb des Fokuspunktes befindet.

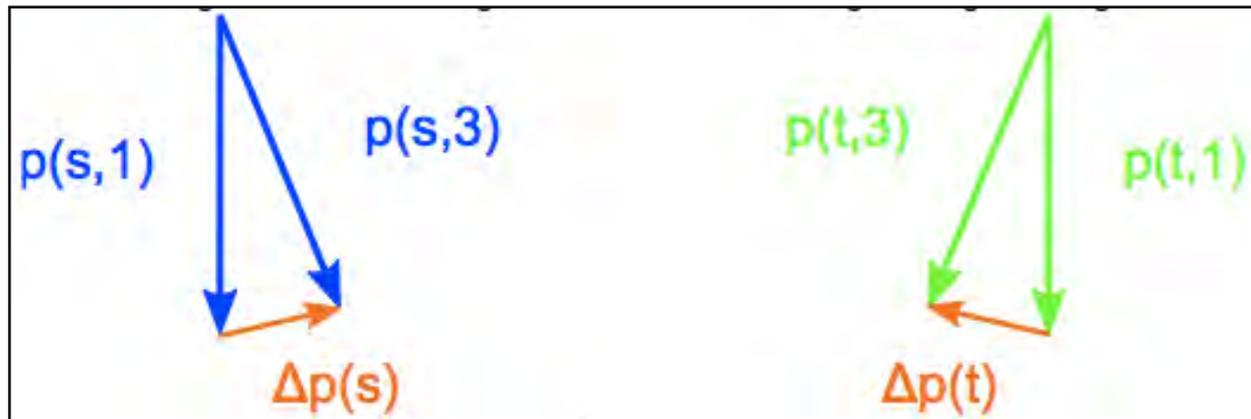


Daraus resultierende Impulse:



Führt man diese Berechnung für andere Positionen der Kugel durch, erhält man ebenfalls stets einen Impuls auf den Fokuspunkt zu. Die Kugel wird also dort eingefangen und kann durch eine Bewegung dieses Punktes verschoben werden.

Bestimmt man die Differenzimpulse der beiden Lichtstrahlen (obere Abb.) und addiert diese (untere Abb.) erhält man den gesamten Differenzimpuls Δp aller Photonen. Auf die Kugel wirkt ein exakt gegenteiliger Impuls. Dieser geht senkrecht nach unten, also genau auf den Fokuspunkt zu.

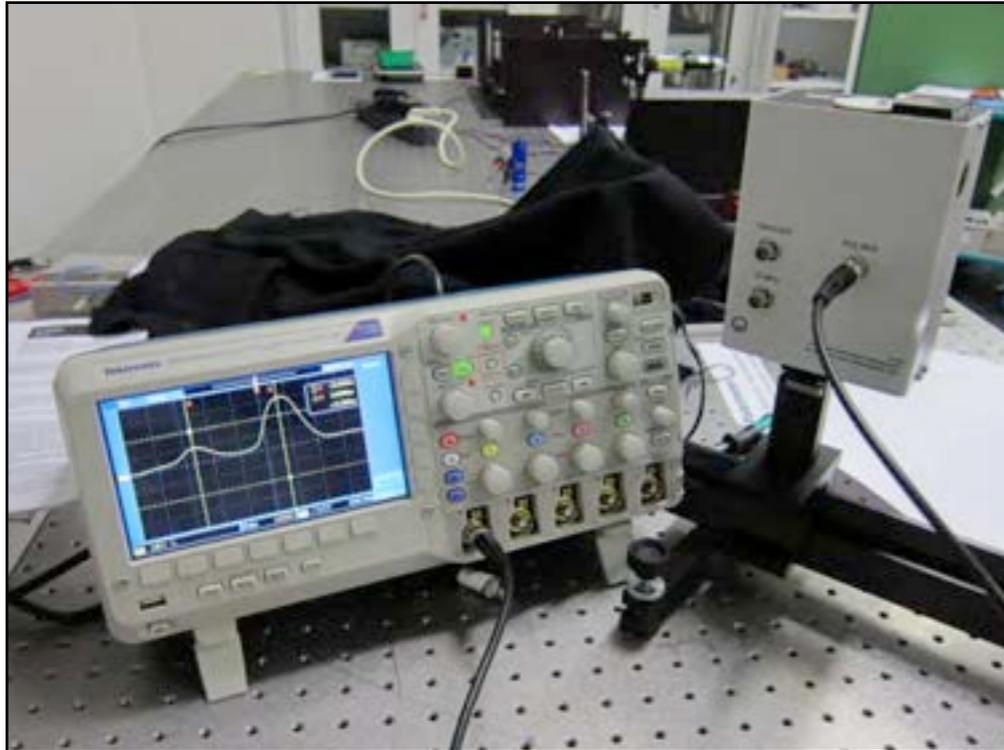


Führt man diese Berechnung für andere Positionen der Kugel durch, erhält man ebenfalls stets einen Impuls auf den Fokuspunkt zu. Die Kugel wird also dort eingefangen und kann durch eine Bewegung dieses Punktes verschoben werden.

Related Glossary Terms
Index

OSZILLOSKOP

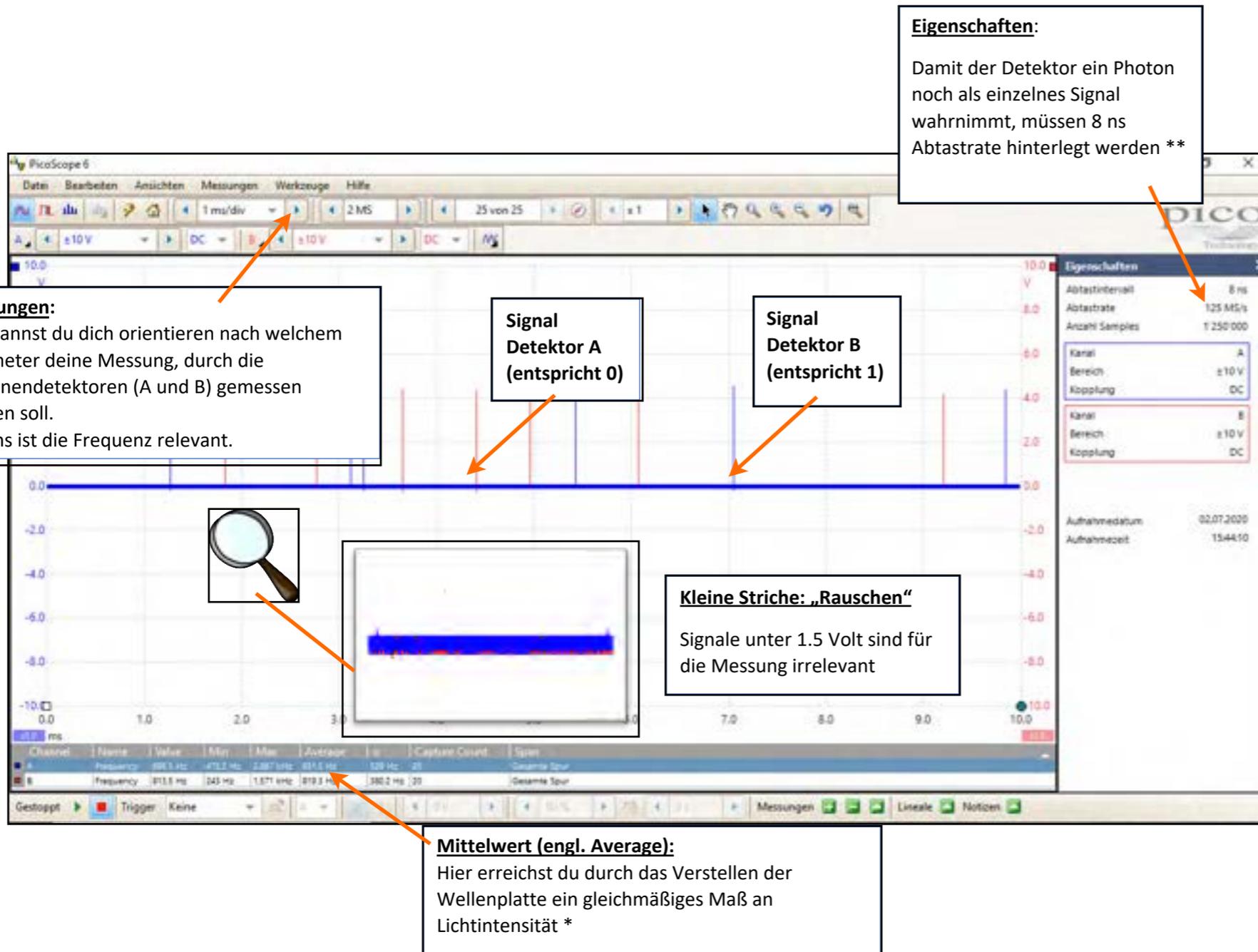
Ein Oszilloskop ist ein elektrisches Messgerät, das einen Spannungsverlauf in einem Diagramm darstellt, Auf der X-Achse ist meist die Zeit und auf der Y-Achse meist die Spannungsstärke dargestellt.



[Related Glossary Terms](#)

[Index](#)

OSZILLOSKOPBILD INTERPRETIEREN



Related Glossary Terms

Index



Rätselhaftes Licht !

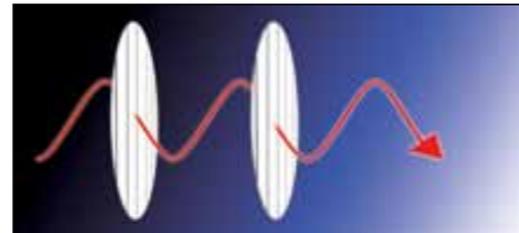


In der Hand hältst Du drei gleiche Folien, so genannte Polarisationsfolien.
(Auf beiden Seiten klebt noch eine Schutzfolie.)
Anwendung finden solche Folien im 3D-Kino, in der Fotografie oder in Flüssigkristall-Bildschirmen.

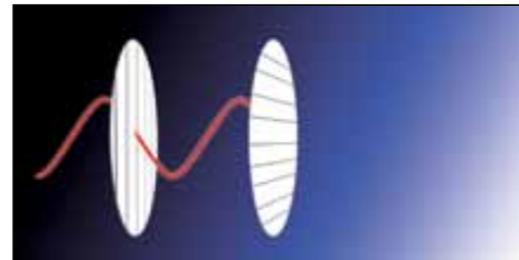
- a) Lege zunächst zwei Folien übereinander und halte sie gegen eine Lichtquelle. Verdrehe nun die Folien gegeneinander. Was beobachtest Du?
- b) Suche nun die Position, in der kein (kaum) Licht durch die beiden Folien dringt. Nun wird es spannend! Nimm die dritte Folie und stecke sie **zwischen** die beiden auf dunkel gestellten Folien. Die mittlere Folie wird nun gedreht, ohne die beiden anderen gegeneinander zu verschieben. Was beobachtest du? Kannst Du das erklären?

Erklärung:

Licht verhält sich wie eine Welle; die Teilcheneigenschaften wollen wir hier außer Acht lassen. Eine Lichtwelle schwingt senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Licht einer normalen Lampe ist unpolarisiert. Polarisatoren sind Filter, die nur Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung, d.h. Polarisation durchlassen. In unserem Fall ist das Licht, nachdem es den ersten Polarisator durchquert hat, stets in dieselbe Richtung linear polarisiert.



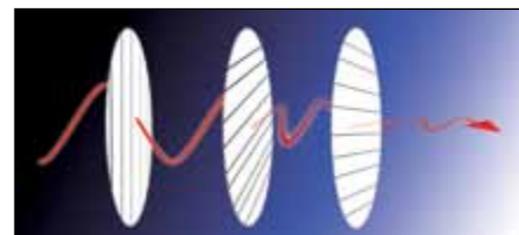
Parallele Polarisatoren:
Der zweite Polarisator lässt das vom ersten Filter polarisierte Licht passieren.
(Achtung: Hier ist der magnetische Anteil des Lichtes skizziert!)



Senkrechte Polarisatoren:
Der zweite Polarisator lässt kein Licht durch!



Schräge Polarisatoren:
Der zweite Polarisator lässt einen Anteil* des Lichtes durch!
** Bei 45° sind es 50% (Gesetz von Malus). Man kann sich auch die Amplitude des Lichts als schrägen Vektor vorstellen und diesen in zwei zueinander senkrechte Anteile zerlegen. Einen in Durchlassrichtung und einen in Sperrichtung.*



Drei jeweils schräg zueinander stehende Polarisatoren:
Der zweite Polarisator lässt einen Anteil des Lichtes durch, der dritte ebenfalls. Und das, selbst wenn der erste und der letzte senkrecht aufeinander stehen.



POLARISIERENDER STRAHLTEILER

Dieser funktioniert genau wie ein normaler Strahlteiler, nur dass die Polarisationsrichtung das Kriterium dafür ist, ob das Licht transmittiert (durchgelassen) oder reflektiert wird. Für den Quantenkryptographieversuch bedeutet das:

0° polarisiertes Licht wird reflektiert

90° polarisiertes Licht wird transmittiert

Verwandte Glossarbegriffe

Strahlteiler, Strahlteilerwürfel

Index

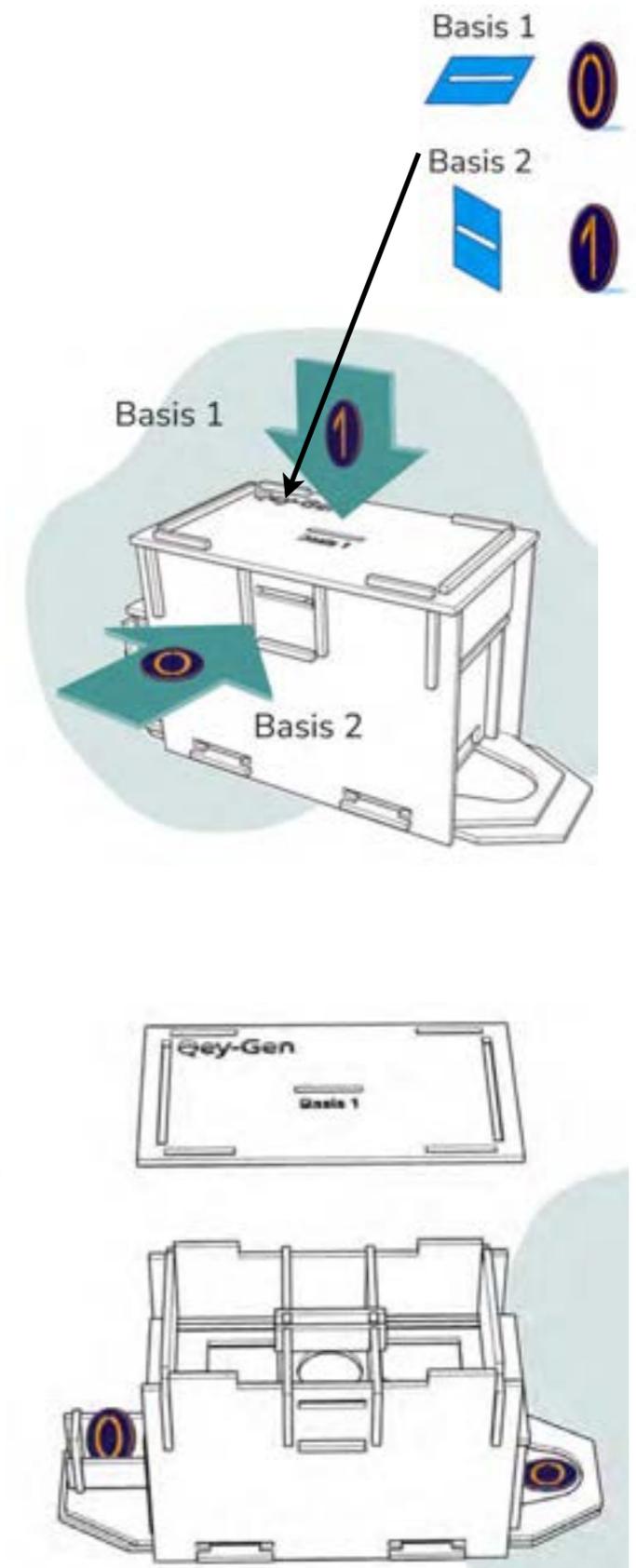
QEYGEN

Der "QeyGen" ist ein Quantenschlüsselgenerator, anhand dessen du das Prinzip der Basen nachvollziehen kannst. Wir fangen erstmal mit der **Funktionsweise** der Box an.

Die Box hat zwei Schlitze, in die man eine 50 Cent Münze einwerfen kann. Wenn wir uns für einen entscheiden und die Münze einwerfen ist sie in „Basis 1 oder Basis 2“ präpariert.

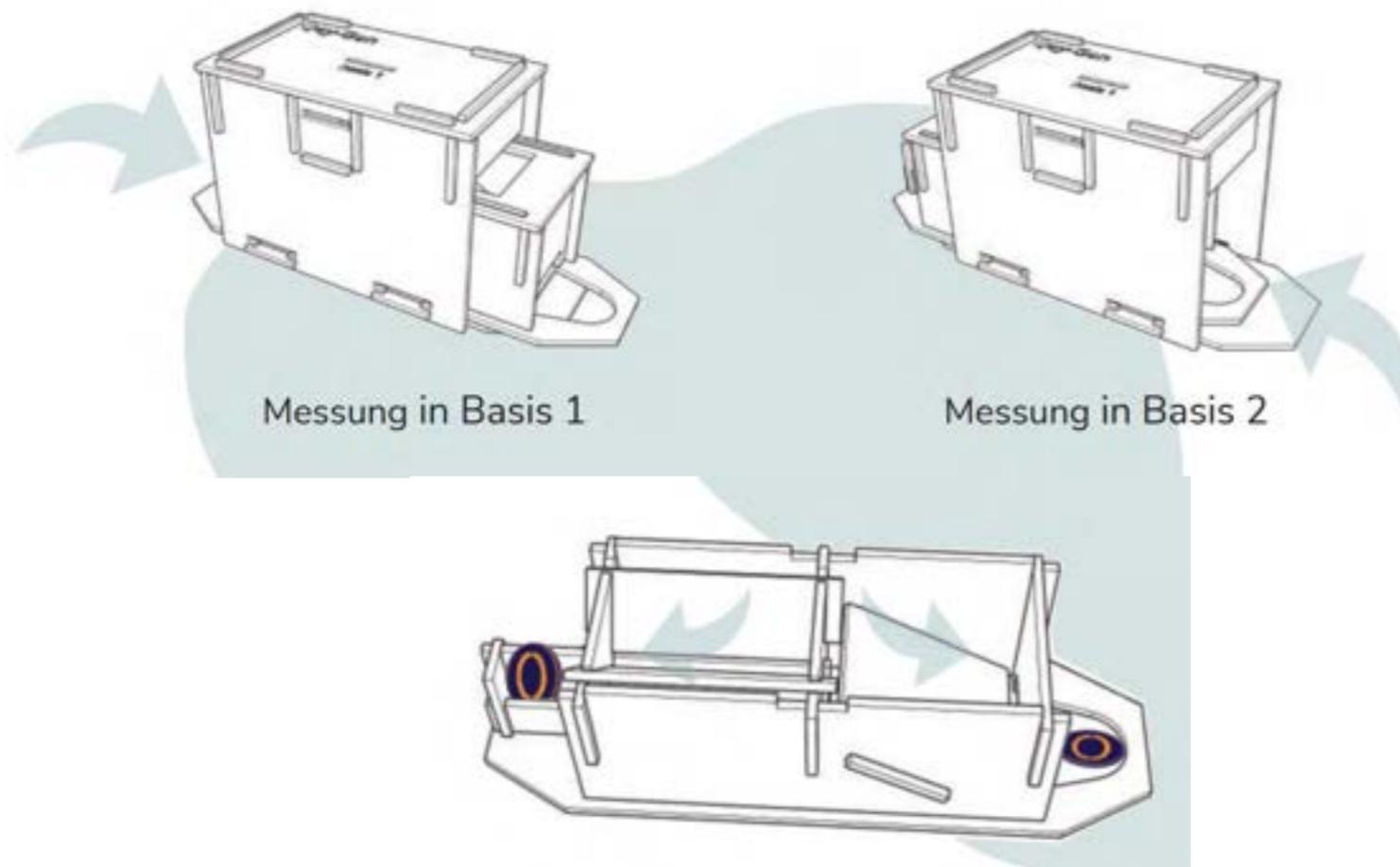
In unserem Experiment beschreiben die Basen, welche Art von Photonen Alice losschickt. Also senkrecht oder waagrecht, mit dem Wert 1 oder 0. Genau wie bei unserer Box.

Wenn wir den Qey-Gen öffnen, sehen wir, dass die Münze in einer Vorrichtung gehalten wird, je nachdem, in welcher Basis wir sie einwerfen. Die innere Box lässt sich nach links oder rechts verrücken, wobei die Münze entweder eine Rampe runter rutscht und flach auf dem Boden liegen bleibt, oder einen Art Trichter herunterfällt und auf der Kante endet. Ähnlich wie bei dem Einwerfen nennt man dies eine Messung in Basis 1 (waagrecht) oder in Basis 2 (senkrecht).



QEYGEN

Wenn man also eine Münze in Basis 2 einsetzt und auch in Basis 2 misst, bleibt der Zustand der Münze unverändert. Falls Zahl nach oben zeigt, so zeigt beim Messen auch Zahl nach oben. Sollte man jedoch in Basis 1 messen, so kippt die Münze auf eine Kante, und zu 50% zeigt eine 0 und zu 50% eine 1 zu dir. So entsteht genau der gleiche Effekt wie bei den Quanten. Bei gleicher Basis bleibt der Wert gleich, bei unterschiedlichen entscheidet der Zufall über den Wert.



QEYGEN: VOREXPERIMENT

Das erstellen von abhörsicheren Schlüsseln ist tatsächlich gar nicht mal so einfach zu verstehen. Wir haben dir aber eine Schritt-für-Schritt-Anleitung als Beispiel zur Verfügung gegeben. In unserem Beispiel nennen wir einfachheitshalber Spielerin 1 "Alice" und Spieler 2 "Bob".

1. Alice schiebt geheim die Münze in Basis 1 oder 2 und notiert sich auf ihrem Tabellenblatt die Basis und den Wert der Münze. Der „Wert“ der Münze ist welche Zahl zu dir (wenn Basis 1) oder welche Zahl nach oben (im Fall Basis 2) zeigt. Während Alice ihre Münze einwirft, muss Bob wegsehen!

2. Nun führt Bob eine Messung durch und notiert sich das Ergebnis. Wenn er nach Basis 1 ausmessen will, muss er die innere Box nach rechts verschieben. Bei Basis 2 muss er das innere nach links verschieben, bis die Münze herunter fällt. Alice muss natürlich wegsehen!

3. Alice legt immer die Münze ein und Bob liest sie aus. Diesen Vorgang wiederholen sie 12 Mal. Doch Moment. Wie könnt ihr euch sicher sein das niemand heimlich gelauscht hat? In den nächsten Schritten nutzt ihr eure Werte, um einen Schlüssel zu bauen und um auf Lauscher zu testen.



Wurf	Basis	Wert	Wurf	Basis	Wert
1.	1	1	1.	2	0
2.	1	0	2.	1	0
3.	2	1	3.	1	1
4.	1	1	4.	1	1
5.	1	1	5.	2	0
6.	1	1	6.	2	1
7.	2	1	7.	1	1
8.	1	0	8.	1	0
9.	2	0	9.	2	0
10.	2	1	10.	2	1
11.	2	1	11.	1	0
12.	1	0	12.	1	0



QEYGEN: VOREXPERIMENT

4. Jetzt besprechen Alice und Bob offen, bei welchem Wurf sie welche Basis gewählt haben, ohne den Wert zu verraten. Alle Würfe mit unterschiedlichen Basen streichen sie durch. Damit baut ihr euren Schlüssel und führt den Lauschtest durch.

5. Doch Moment mal. Wie können wir sicher sein, dass niemand gelauscht hat? Alice und Bob benötigen nur vier Werte für den Schlüssel. Solange sie nie den Wert laut sagen, können sie zusammen frei wählen, welche sie benutzen wollen (hier 8, 9, 10 und 12). Über die übrigen Werte können sie sich laut austauschen (hier 2 und 4). Sie müssen richtig, also gleich sein. Sind sie nicht gleich, hat jemand gelauscht. Je mehr Werte sie vergleichen, desto sicherer ist, dass niemand gelauscht hat. Ihr könnte auch mehr als zwölf Münzwürfe machen, um mehr Werte für den Lauschtest zu haben.

Verwandte Glossarbegriffe

Index

Wurf	Basis	Wert		Wurf	Basis	Wert
1.	-	-		1.	-	-
2.	1	0	.....	2.	1	0
3.	-	-		3.	-	-
4.	1	1	.....	4.	1	1
5.	-	-		5.	-	-
6.	-	-		6.	-	-
7.	-	-		7.	-	-
8.	1	0	.....	8.	1	0
9.	2	0	.....	9.	2	0
10.	2	1	.....	10.	2	1
11.	-	-		11.	-	-
12.	1	0	.....	12.	1	0

Wurf	Basis	Wert
1.	-	-
2.	1	0
3.	-	-
4.	1	1
5.	-	-
6.	-	-
7.	-	-
8.	1	0
9.	2	0
10.	2	1
11.	-	-
12.	1	0

Lauschtest

0 0 1 0

QUANTENTEILCHEN

Wir wissen, dass die Welt um uns herum aus Atomen aufgebaut ist. Was aber nicht so offensichtlich ist, ist, dass die Regeln der Physik für die kleinsten Teilchen anders sind als in unserer großen, makroskopischen Welt.

Objekte in unserer Alltagswelt beschreiben wir, indem wir ihren „Zustand“ bestimmen: Dieser setzt sich aus Impuls und Geschwindigkeit des Objektes zusammen. Für kleine Teilchen, wie z.B. subatomare Partikel, können wir den Zustand und die Eigenschaften nicht direkt messen. Das liegt daran, dass sich die einzelnen Zustände als sogenannte „Superposition“ überlagern! Experimente zeigen, dass Quantenteilchen in zwei unterschiedlichen Zuständen gleichzeitig auftreten: Wir können aber nicht beide Zustände gleichzeitig messen!

Messungen: Ein anderer wichtiger Aspekt in der Quantenwelt sind die Messungen eines Zustandes. Anders als in unserer Welt, können wir nicht einfach die Geschwindigkeit messen - nein! In der Quantenwelt kriegen wir statt ein Ergebnis eine **Wahrscheinlichkeit** für dieses Ergebnis. Wenn wir beispielsweise versuchen, den **Zustand** eines Quantensystems zu bestimmen, detektieren wir unser Quantenteilchen in einer bestimmten Position mit der Wahrscheinlichkeit, die davon abhängt, wie stark der Ort von der **Superposition** beeinflusst wird.

Verwandte Glossarbegriffe

Superposition

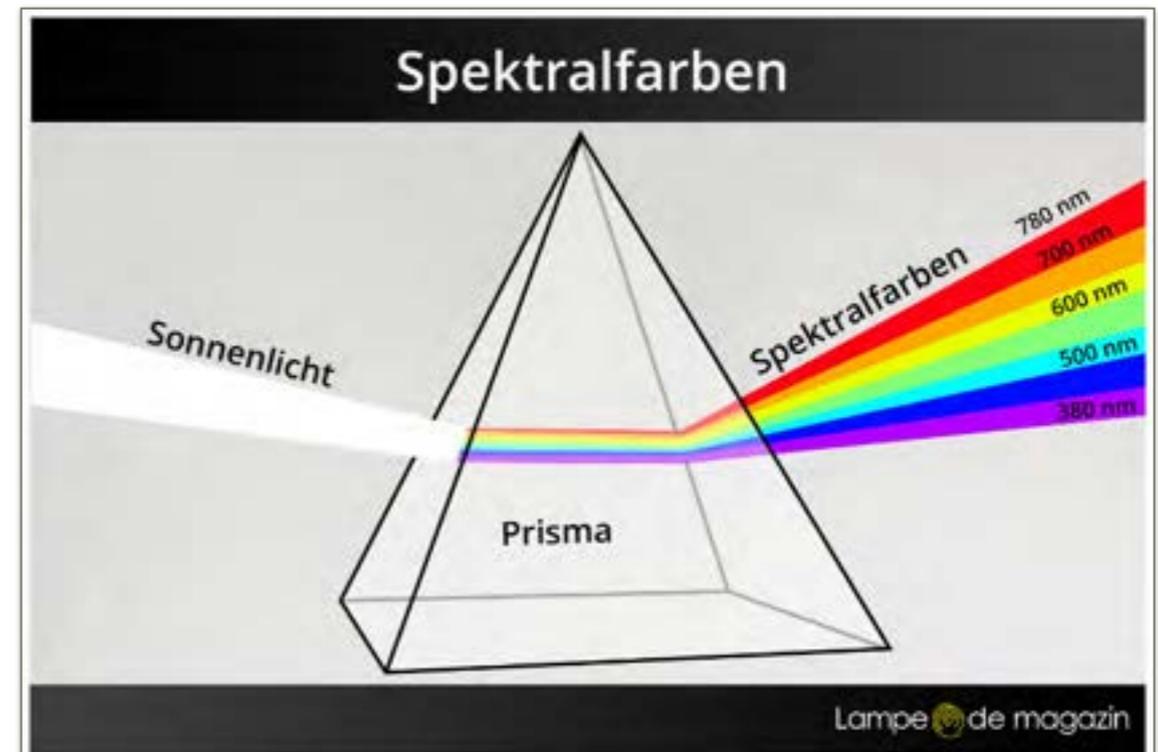
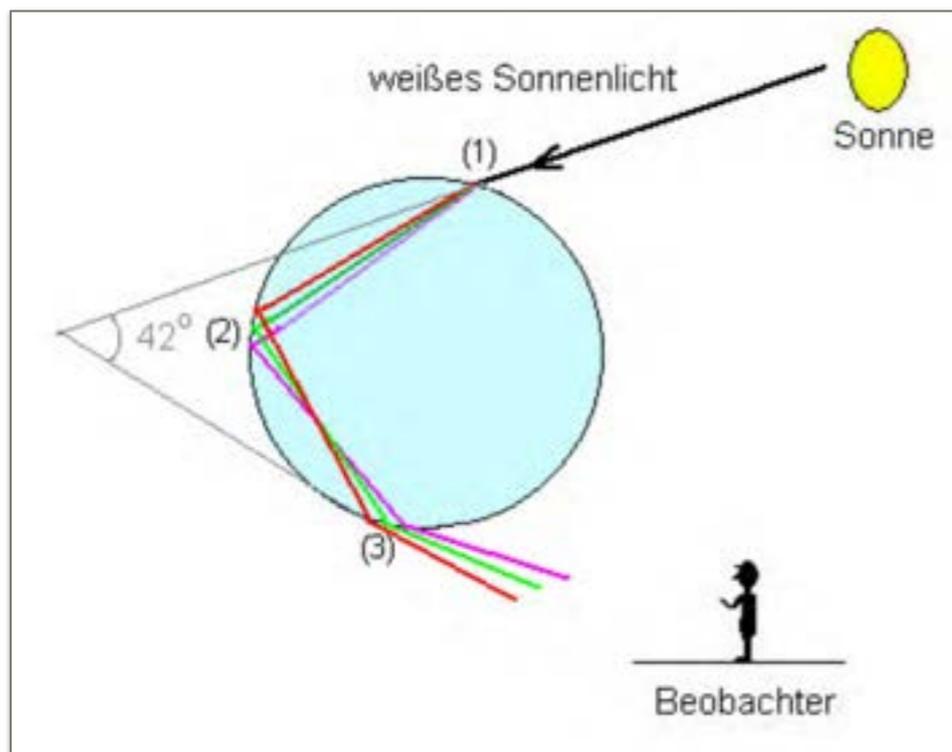
Index

REGENBOGEN

Wie funktioniert eigentlich ein Regenbogen?

Als Ursache für die Entstehung eines Regenbogens ist die Farbzerlegung oder Dispersion des Lichts durch Brechung. Trifft das weiße Sonnenlicht, das alle Spektralfarben enthält, auf Regentropfen, so wird es beim Eintritt in den Regentropfen (Übergang Luft-Wasser) gebrochen.

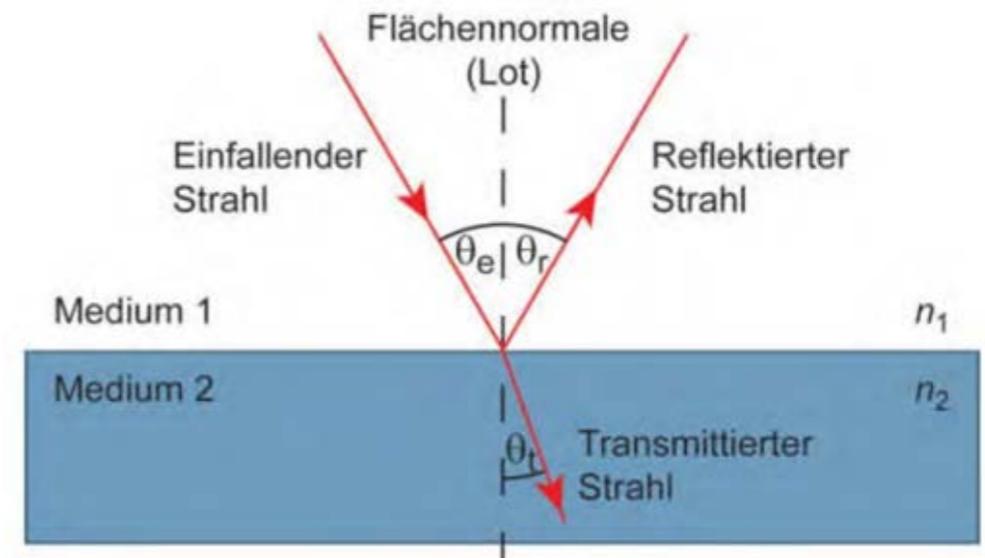
Hier etwas **geometrische Optik**: Nach **zweimaligen** Nutzen des **Gesetz von Snellius** ergibt sich zwischen **Beobachter**, **Tropfen** und **Sonne** ein Winkel von etwa 42° . Dabei ist der Brechungsindex von Luft etwa 1 und der des Wassers etwa 1,5.



REFLEXION

Im Bild wird die **Brechung** und **Reflexion** eines Strahls gezeigt: Ein **einfallender Strahl** aus dem **homogenen Medium 1** trifft auf die **Oberfläche des Mediums 2**. **n** ist der **Brechungsindex**, also eine **einheitenlose Zahl** die beschreibt, wie **stark oder schwach** das Licht **gebrochen/ reflektiert** wird.

Die **Winkel** (e=**Einfallswinkel**, r=**Reflexionswinkel** und t=**Transmissionswinkel**) beschreiben hier den Verlauf der Strahlen. Der **einfallende Winkel** ist **gleich dem reflektierten Winkel**:



$$\theta_e = \theta_r$$

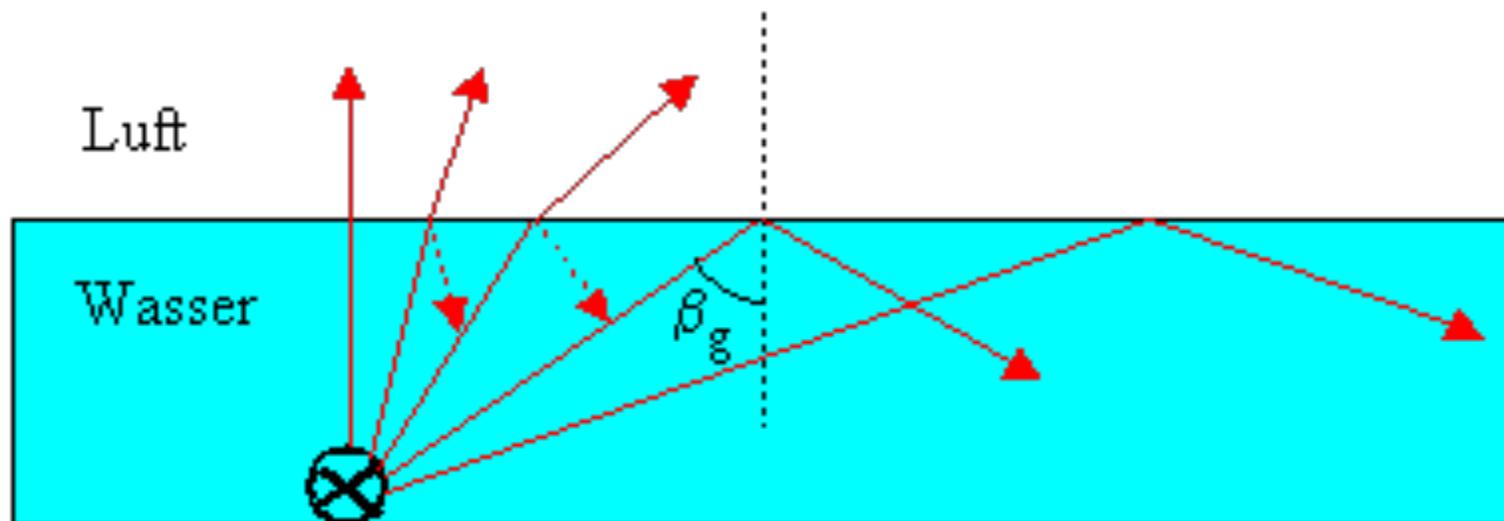
Unter **Totalreflexion** versteht man die **komplette Reflexion** eines **einfallenden Strahles**. Nach dem **Snelliusschem Gesetz** gibt es einen **Einfallswinkel**, bei dem der **Brechungswinkel** 90° ist. **Jenseits dieses Winkel** kann **Licht** nicht mehr **gebrochen**, sondern nur noch **reflektiert** werden. Genau **DANN** spricht man von **Totalreflexion**!



REFLEXION

Trifft Licht an die Grenze zweier Medien mit verschiedenen Brechungsindices, wird immer ein gewisser Anteil reflektiert. Anders als auf der Folie davor, trifft Licht vom Medium mit dem höheren Brechungsindex in ein Medium mit niedrigerem Brechungsindex. Je flacher der Winkel ist, desto größer ist der reflektierte Anteil. Ab einem bestimmten Grenzwinkel wird das gesamte Licht reflektiert. Dies nennt man **Totalreflexion**.

Unten siehst du die verschiedene Strahlen, die gar nicht, teilweise oder totalreflektiert werden. Die folgende Skizze dient als anschauliche Erklärung für das Experiment "Wasser als Lichtleiter"!



RICHTIGE ANTWORT KAPITEL 22 ERKLÄRUNG

Die Polarisationsfolie lässt nur eine Polarisationsrichtung durch. Durch das Fehlen des zweiten Filters direkt am Monitor kommt jede Polarisationsrichtung raus. Daher sieht man, wenn man den Filter verdreht, nicht nur die Polarisationsrichtung, die man sehen soll, sondern auch Teile der anderen Polarisationsrichtungen. So bilden sich falsche Farbmischungen.

Verwandte Glossarbegriffe

LCD-Displays

Index

Kapitel 22 - Durchführung/Aufgabe

SCHRITT-FÜR-SCHRITT ANLEITUNG

Zuerst werden die drei Buchstaben mithilfe der Tabellen in Binärcodes übersetzt.

Schritt 1	Schlüsselübertragung	<ul style="list-style-type: none"> Alice wählt zufällig eine Basis (also x oder +) und ein Bit (also 0 oder 1). Bob wählt zufällig seine Basis (also x oder +). Beide stellen ihre $\lambda/2$ Platten entsprechend ein. Dann wird das Photon durch den Aufbau geschickt (bei uns der Laserpuls). Bob schreibt auf, ob er eine 0 oder eine 1 oder nichts eindeutiges gemessen hat.
Schritt 2	Löschung falscher Basen	Alice und Bob gehen die Messungen durch und sagen sich gegenseitig, welche Basen Sie genommen haben. Sie behalten die Ergebnisse, bei denen die Basen gleich waren (den Rest streichen sie durch).
		Dabei verraten beide nur die Basen und nicht die übertragenen und gemessenen Bits. Der Witz: sie wissen jetzt, beide, welche Bits übrig bleiben (haben also einen geheimen Schlüssel), haben sich aber nur über die Basen ausgetauscht.
Schritt 3	Test auf Spion	Alice und Bob vergleichen einige der übertragenen Bits mit der gleichen Basis. Bei Fehlern war ein Spion in der Leitung und der übertragene Schlüssel wird gelöscht. Die Bits zum Testen der Anwesenheit eines Spions werden aus dem eigentlichen Schlüssel gelöscht.
Schritt 4	Verschlüsseln der Nachricht	Erst jetzt verschlüsselt Alice die eigentliche und sensible Nachricht mit dem generierten Schlüssel über die binäre Addition.
Schritt 5	Versenden der Nachricht	Die verschlüsselte Nachricht wird nun öffentlich von Alice an Bob verschickt.
Schritt 6	Entschlüsseln der Nachricht	Bob entschlüsselt die geheime Nachricht mit seinem Schlüssel über die binäre Addition. Mit dem oben eingehaltenen Prozedere war die Verschlüsselung zu 100% sicher.

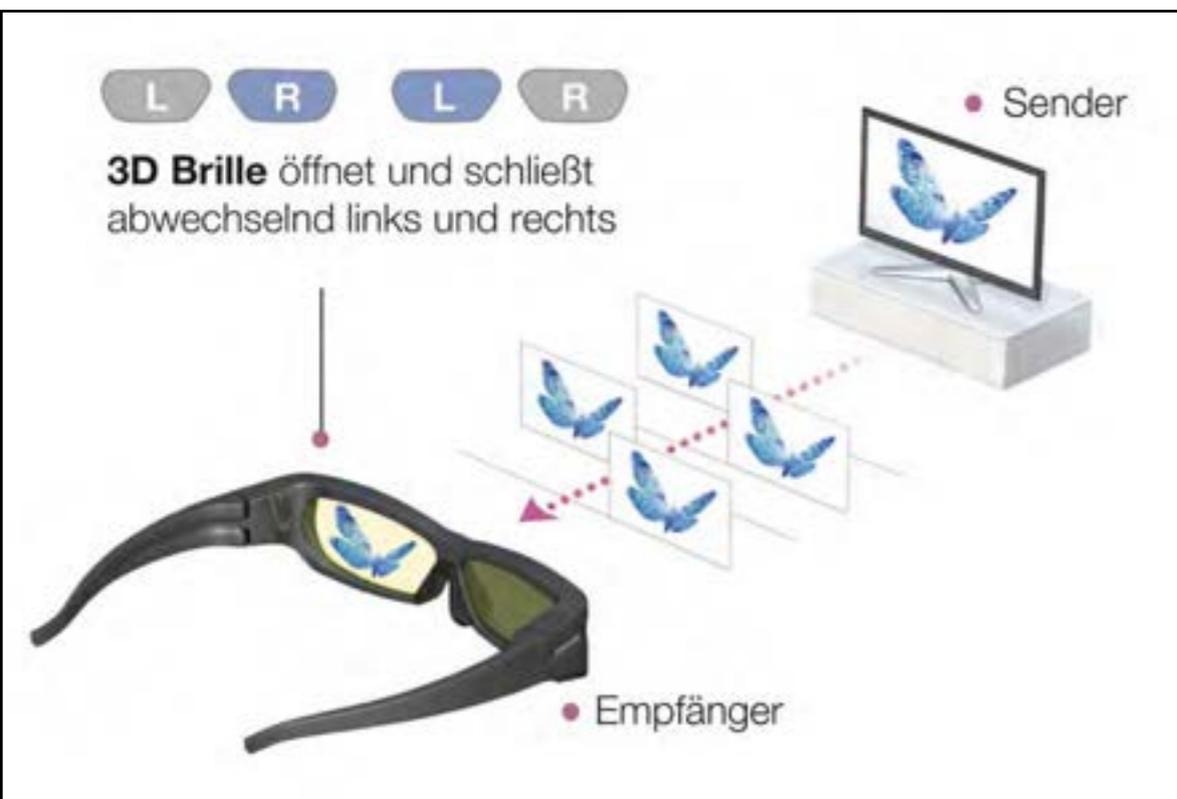
Verwandte Glossarbegriffe

Index

SHUTTERBRILLEN

Das englische Wort "shutter" bedeutet auf Deutsch unter anderem "Rollo" oder "Gatter". Das Verb 'to shut' bedeutet unter anderem "etwas schließen".

Die Brille enthält spezielle Materialien, wodurch abwechselnd jeweils das rechte oder linke Augenglas verdunkelt wird (wie bei einem Rollo vor dem Fenster). Der Fernseher sendet in derselben Sekunde, in der z.B. das linke Augenglas geschlossen ist, das Bild passend ans rechte Auge.



Dieser Vorgang passiert so schnell, dass wir als Zuschauer gar nichts davon mitbekommen. Der Wechsel zwischen den einzelnen Bildern geschieht in der Regel mit ca. 100 Hz, was ca. 50/60 Bildern pro Sekunde, pro Auge entspricht. Der verwendete Fernseher / Projektor muss in derselben Zeit 100/120 Bilder aussenden. Die Elektronik im Inneren der Brille steuert alles vollautomatisch.

Diese Technik wird nur in wenigen Kinos (Arri Kino in

München) genutzt, da die Kosten für die Brillen vergleichsweise hoch sind. Zudem müssen Sie immer aufgeladen sein.

Verwandte Glossarbegriffe

Layerdisplays/Parallaxenfunktion

Index

SICHERHEITSHINWEISE

Im Labor wird mit Lasern (ca. 1 mW) gearbeitet, die bei falschem Umgang zu Augenschäden führen können. Folgende Regeln dienen der eigenen Sicherheit bei einem Laborbesuch. Werden sie nicht befolgt, muss das Labor verlassen werden. Die Unterschrift bestätigt, dass die Regeln gelesen wurden und angewendet werden.

Niemals direkt in den Laserstrahl schauen!

Die Augen dürfen sich niemals auf der Höhe des optischen Tisches befinden.

Man schaut immer schräg von oben auf das Experiment.

Wegen der Reflexion des Laserlichts darf man an den Händen keine Ringe, Armreife oder Uhren tragen.

Auch lange Ketten müssen abgelegt werden.

Der Laserstrahl darf beim Experimentieren niemals über den eigenen optischen Tisch hinaus leuchten. Zum Abfangen des Laserstrahls werden schwarze Metalle verwendet.

Mit Beginn des Experimentierbetriebes: Laserschutzbrillen aufsetzen.

Im Labor darf weder gegessen noch getrunken werden.

Im Notfall den Not-Aus Schalter in der Nähe des Eingangs oder beim Sicherungskasten am Fenster drücken.

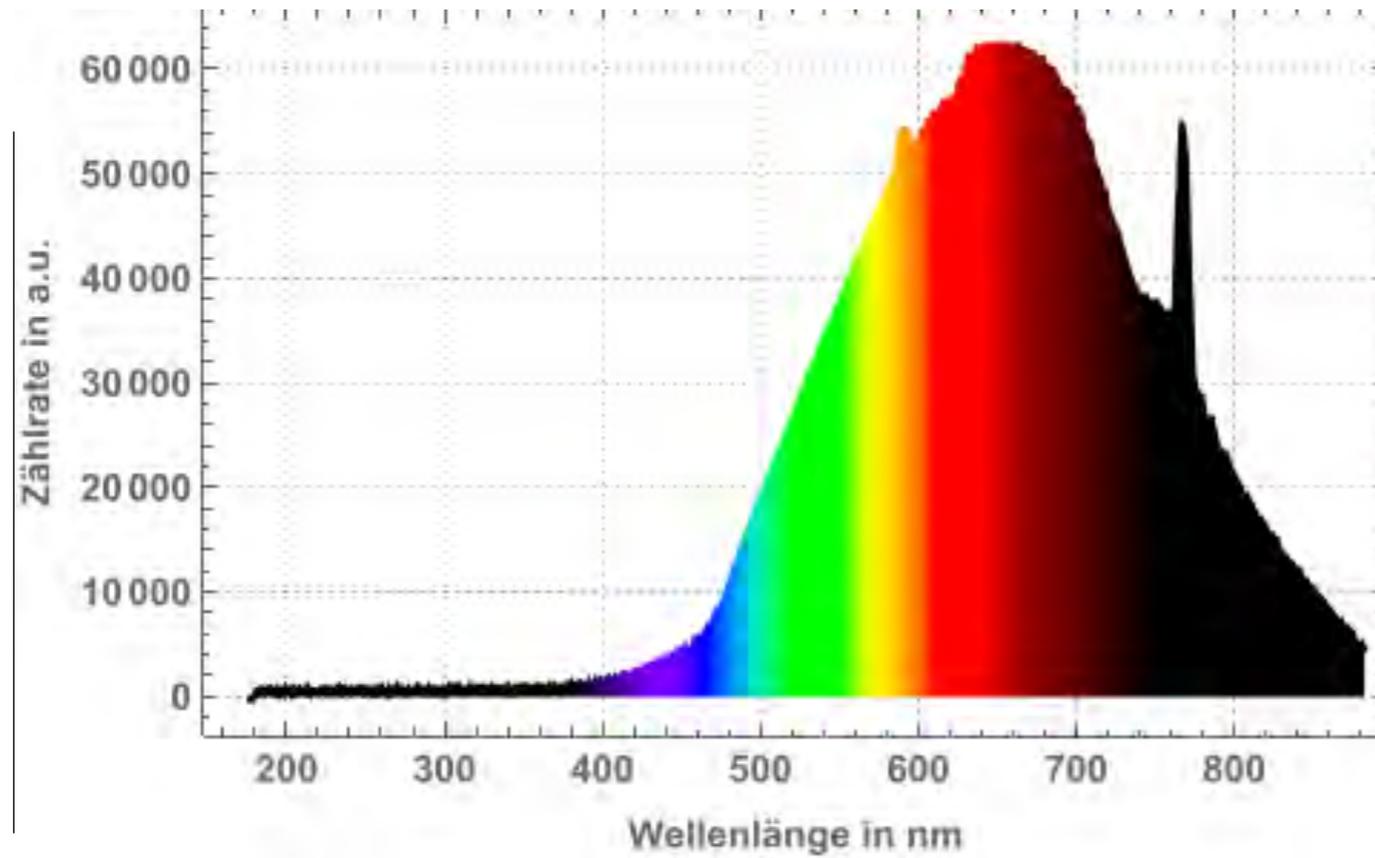
Ich bin mit der Veröffentlichung von Fotos von mir auch im Internet einverstanden.

Related Glossary Terms

Index

Kapitel 1 - Lasersicherheit

SPEKTRUM 1



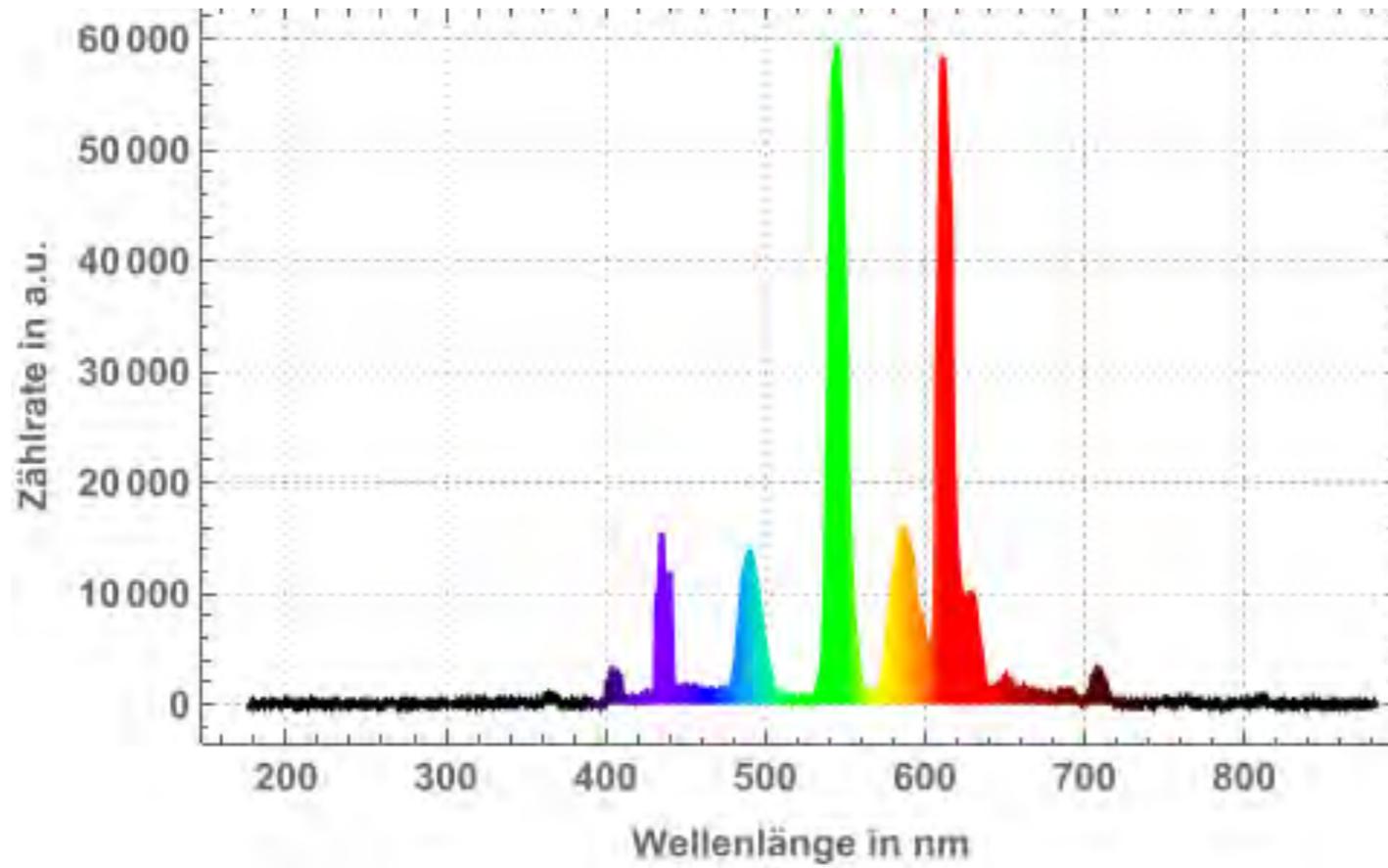
Kerzenflamme

Related Glossary Terms

Lösungen Spektrometer, Spektrum 2

Index

SPEKTRUM 3



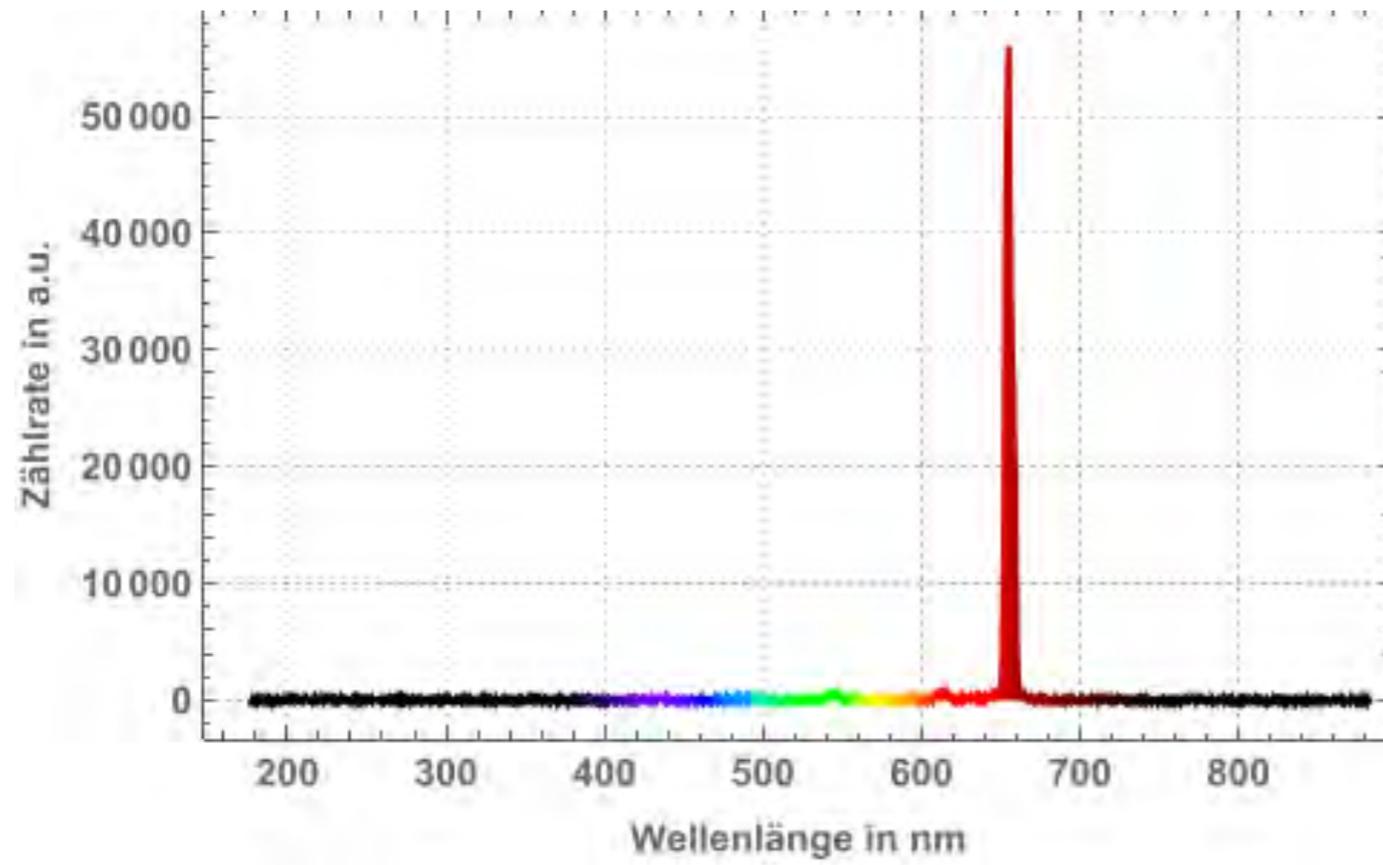
Leuchtstoffröhre

Related Glossary Terms

Lösungen Spektrometer

Index

SPEKTRUM 2



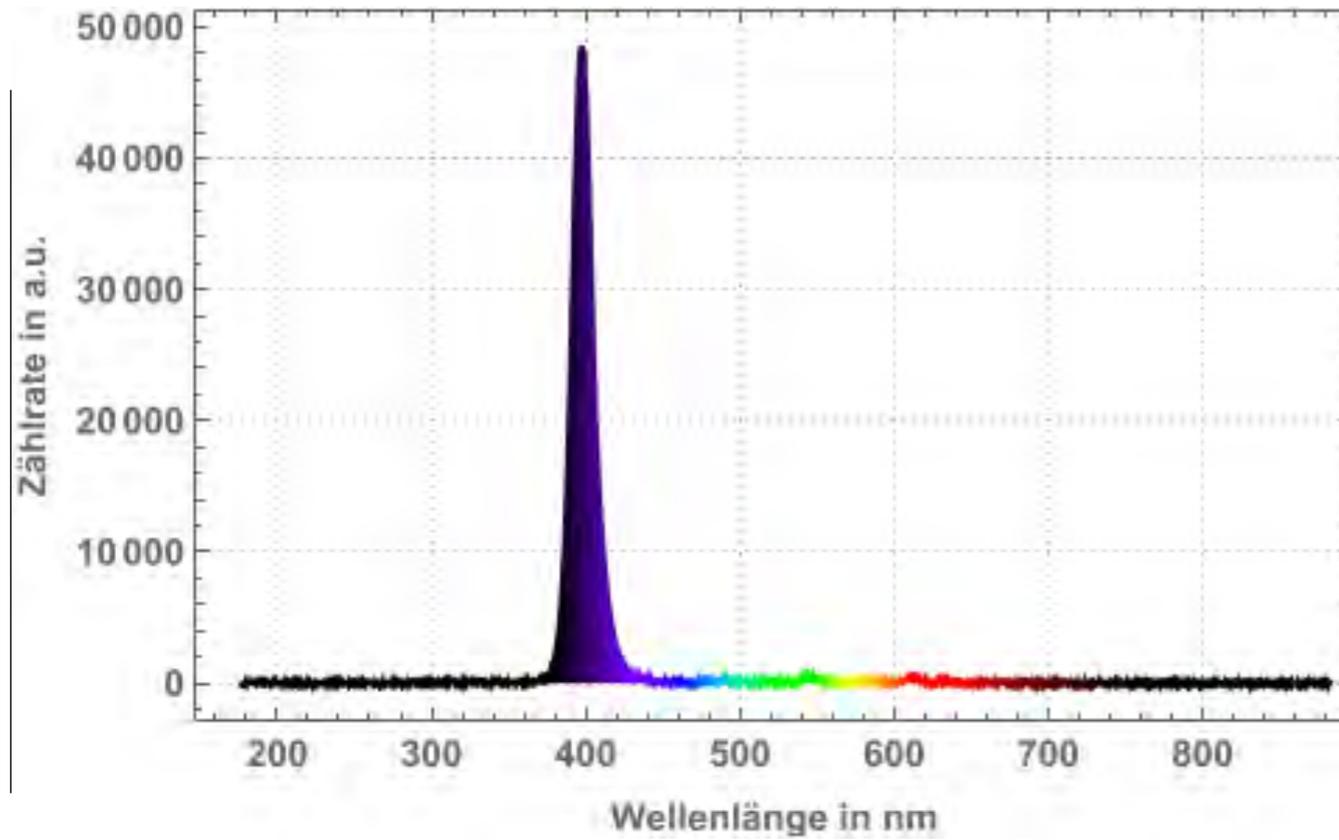
Laser Rot

Related Glossary Terms

Lösungen Spektrometer, Spektrum 1

Index

SPEKTRUM 4



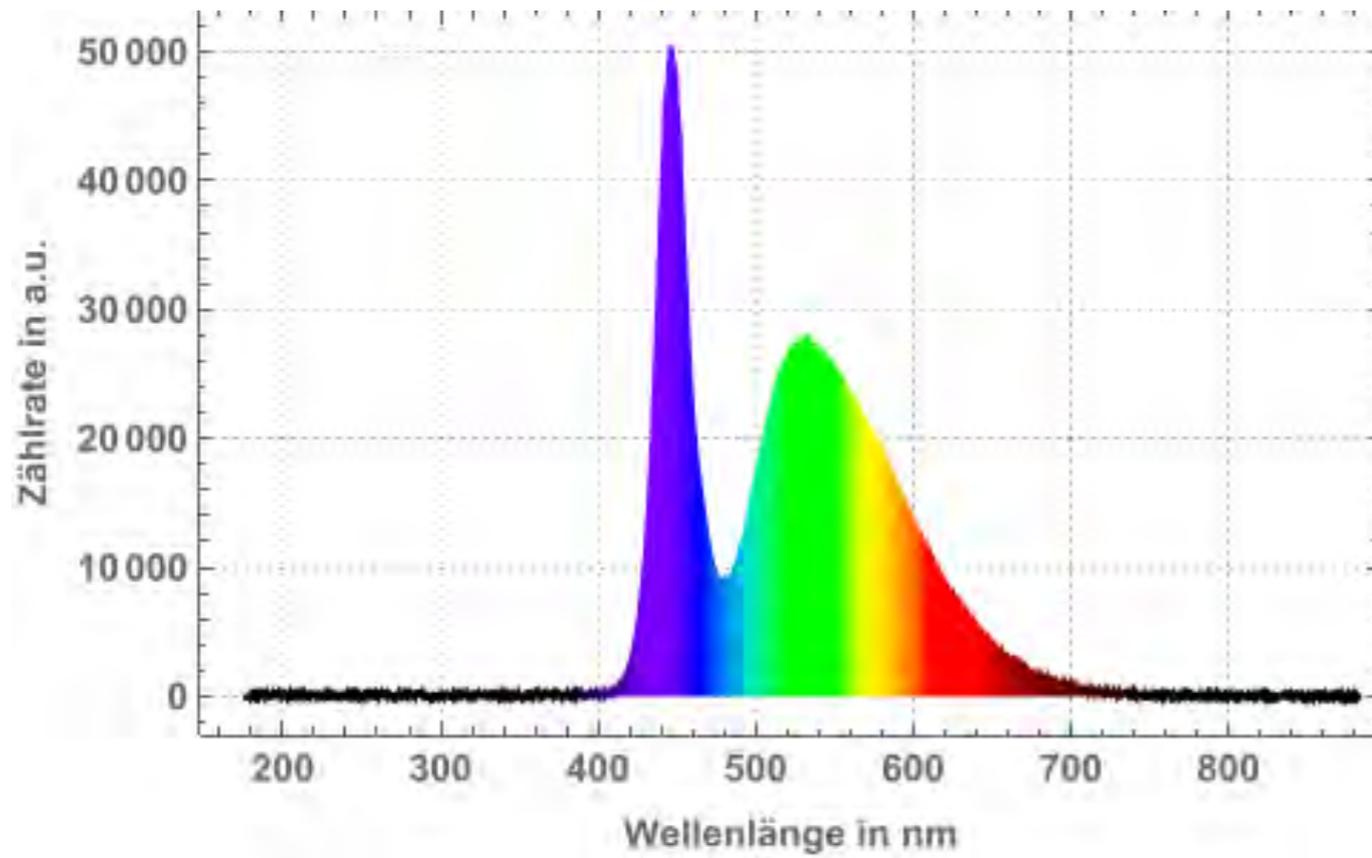
UV-Lampe

Related Glossary Terms

Lösungen Spektrometer, Spektrum 5

Index

SPEKTRUM 5



weiße LED

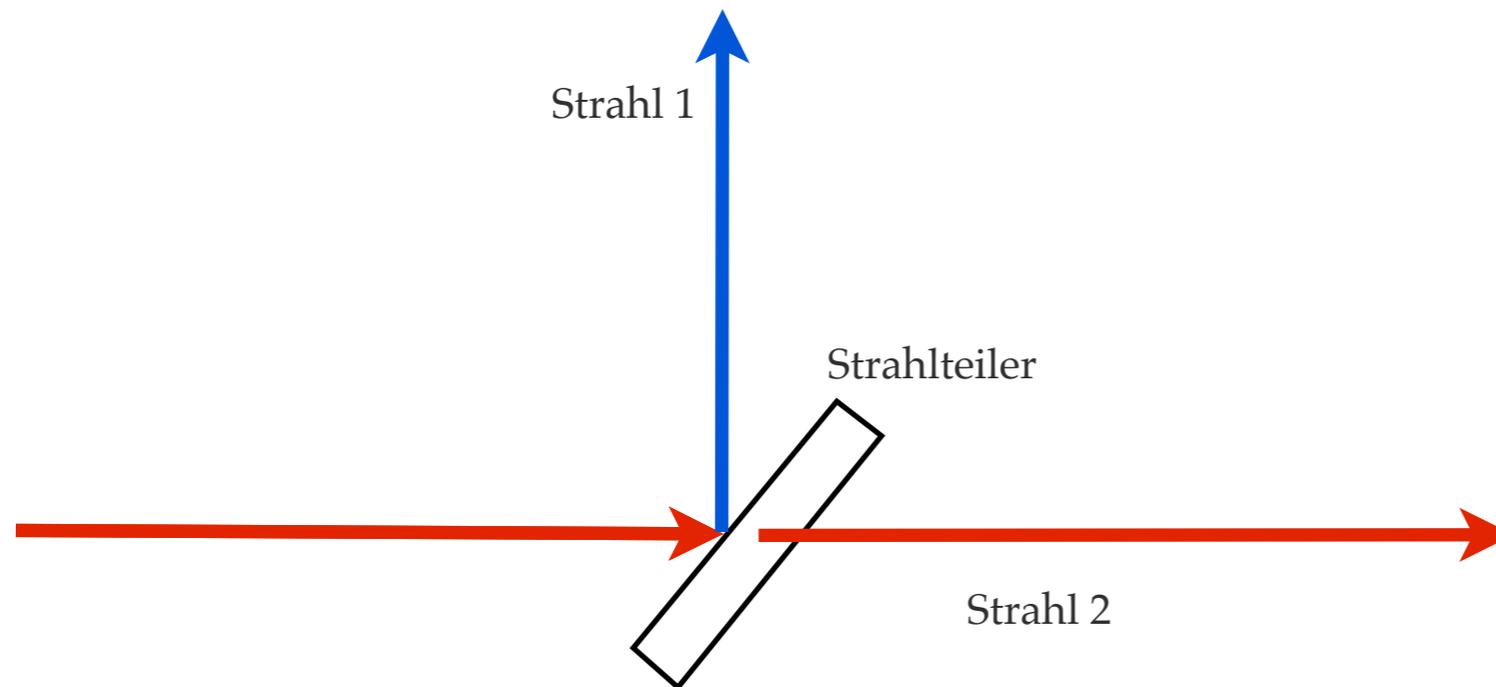
Related Glossary Terms

Lösungen Spektrometer, Spektrum 4

Index

STRAHLTEILER

Ein Strahlteiler teilt einen Laserstrahl in zwei Teilstrahlen auf. Ein häufiger Aufbau ist ein schrägsteher, teildurchlässiger Spiegel. Der Lichtstrahl wird zu einem Teil im 90° Winkel reflektiert, während der andere Teil durch den teildurchlässigen Spiegel geradeaus weiterfliegt.



Related Glossary Terms

Polarisierender Strahlteiler, Reflexion, Strahlteilerwürfel

Index

STRAHLTEILERWÜRFEL

Ein Strahlteilerwürfel teilt einen Lichtstrahl, genau wie ein Strahlteiler, in zwei Teilstrahlen auf, die dann in unterschiedlicher Richtung weiterfliegen.

Der Strahlteilerwürfel besteht aber aus zwei Prismen, die an einer Kante mit einem Harz verbunden werden. An der Grenze der Prismen, wird ein Teil des Lichts reflektiert, während der andere in das zweite Prisma eindringt.

Related Glossary Terms

Polarisierender Strahlteiler, Reflexion, Strahlteiler

Index

SUPERPOSITIONSPRINZIP

Überlagerungsprozesse sind in der (Quanten-) Physik sehr wichtig. Es gibt sogar ein Überlagerungsprinzip, auch Superpositionsprinzip genannt.

Das **Superpositionsprinzip** beschreibt das Phänomen der Interferenz, welches dir bereits aus dem Interferometerversuch bekannt ist. Durch das Interferenzmuster auf einem Schirm kann es sichtbar werden.

Im Gegensatz zur Superposition von elektromagnetischen Wellen können sich Quantenobjekte, wie beispielsweise Photonen, in Superposition (Überlagerung) von **Zuständen** befinden. Diese kann, anders als bei einem Interferenzmuster, nicht sichtbar gemacht werden.

Überlagerung von Zuständen

Quantenzustände können addiert („überlagert“) werden und das Ergebnis ist ein weiterer Quantenzustand und umgekehrt kann ein Quantenzustand als Summe von zwei oder mehr unterschiedlichen Zuständen dargestellt werden. Ein Beispiel aus dem Alltag soll dir ein genaueres Verständnis für den Begriff "Zustand" geben.

Bei einem Münzwurf gibt es die Möglichkeit für die Münze den Zustand Kopf oder Zahl einzunehmen. Dabei betrachtet man den Zustand der Münze, welcher eingenommen werden kann, als gesamtes System. Solange die Münze in der Luft rotiert, bestehen beide Zustände Kopf/Zahl gleichzeitig. Wenn die Münze fällt und wir hinschauen, welches Ergebnis nun wirklich eingetreten ist, gibt es nur noch einen Zustand.

Das ist natürlich **keine** Beschreibung für einen **Quantenzustand**. Es ist nur eine Analogie.

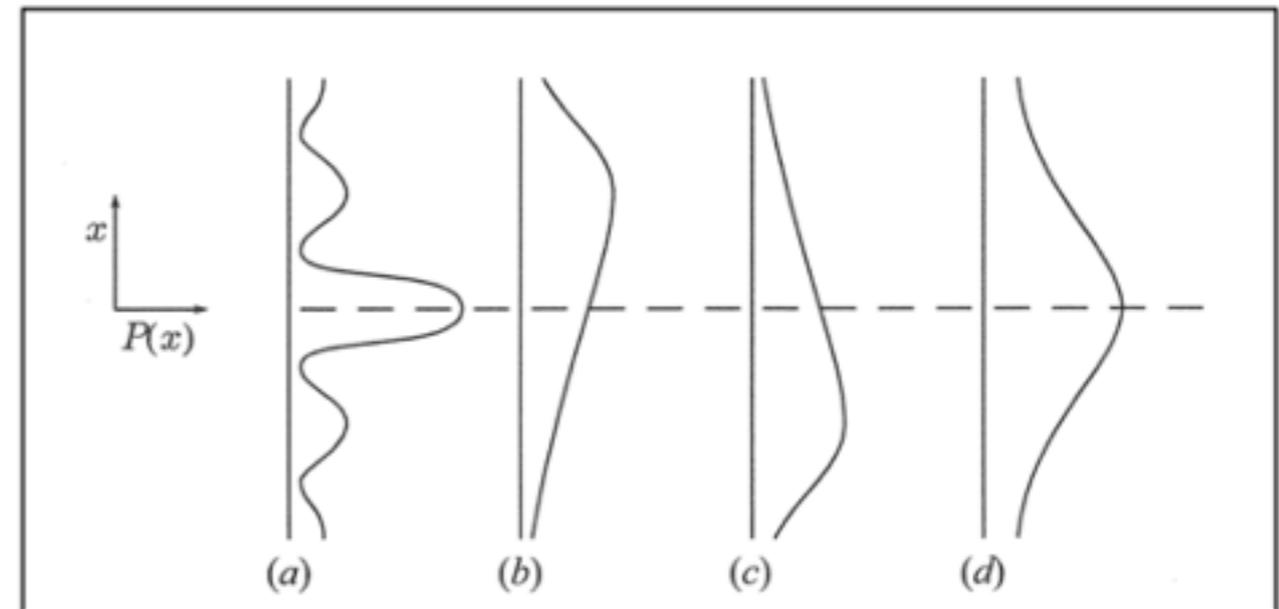
Licht in Superposition

Am Doppelspalt gibt es für ein Photon zwei mögliche Zustände: Entweder es geht durch Weg 1 oder Weg 2. Diese werden gleichzeitig eingenommen. Wenn wir also **nicht** messen befindet sich das Photon (Quantenobjekt)

Angenommen, ein Lichtstrahl wird durch ein Interferometer geleitet, sodass er in zwei Komponenten aufgespalten wird, die anschließend interferieren. Wie würde dies bei einzelnen Photonen funktionieren?

Um dies zu sehen, betrachten wir ein Experiment. Wir schießen einen Laserstrahl, dessen Intensität so gering ist, dass etwa ein Photon auf einmal auf einen Doppelspalt trifft. Nun betrachten wir die folgenden Ergebnisse des Experiments, wie in der Abbildung gezeigt. Welche Antwort ist korrekt?

- a) Beide Spaltöffnungen sind geöffnet
- b) Loch 2 ist geschlossen, so dass das Photon nur durch Loch 1 gehen kann
- c) Loch 1 ist geschlossen
- d) Summe der Verteilung, wenn Loch 1 (Ergebnis b) und 2 (Ergebnis c) offen sind.



Korrekt ist Antwort a). Wir sehen, dass sich das Muster erheblich von a) unterscheidet, bei dem beide Schlitze offen waren!

Ein einzelnes Quantenteilchen verhält sich also wie eine Welle, die beide Schlitze gleichzeitig durchläuft und mit sich selbst interferiert!

Related Glossary Terms

Polarisierender Strahlteiler, Reflexion, Strahlteiler

VON NEUMANN VERFAHREN

Man nehme eine beliebige sechstellige Dezimalzahl. Als Nächstes wird diese Zahl quadriert. Nun nimmt man die mittleren Dezimalstellen. Diese ist die erste Pseudozufallszahl. Dann wiederholt man den Vorgang immer wieder:

$$675248^2=455959861504$$

$$959861^2=921333139300$$

$$333139^2=110981593300$$

...

...

Dieses Verfahren funktioniert nicht mit jeder Anfangszahl, aber bei bestimmten Startwerten sehen die Ergebnisse wirklich sehr chaotisch aus.

Related Glossary Terms

Index

WARUM BRAUCHEN WIR DIE QUANTENMECHANIK?

Die Antwort ist ganz einfach: Sie ist die Theorie, die erklärt, wie alles funktioniert, die Natur der Teilchen, aus denen die Materie besteht, und die Kräfte, mit denen sie wechselwirken. Wenn man sich die aktuelle Forschung in fast allen Bereichen der Grundlagenforschung ansehen will, braucht man die Quantenmechanik. Die Quantenphysik ist die Grundlage dafür, wie Atome funktionieren und warum Chemie und Biologie so symbiosieren, wie sie es tun. Von der Funktionsweise von Lasern bis hin zur Verbrennung der Sonne aufgrund der Fusionsreaktionen in ihrem Kern - die Quantenmechanik ist überall von Bedeutung.

Aber warum ist sie so schwer zu verstehen? Die Schwierigkeit der Quantenmechanik liegt darin, dass die meisten Konzepte der Quantenwelt ohne Mathematik nicht zugänglich sind. Die Mathematik liefert Ergebnisse darüber, wie sich Teilchen verhalten, die im Vergleich zu dem, was wir in der realen Welt gewohnt sind, sehr seltsam erscheinen! Eine dieser seltsamen Ideen ist der Welle-Teilchen-Dualismus: Quantenobjekte können sich wie Teilchen verhalten, die sich an einem einzigen Ort befinden; oder sie können sich wie Wellen verhalten, die über den ganzen Raum oder an mehreren Orten gleichzeitig verteilt sind.

Related Glossary Terms

Index

ZWEISTUFIGE ABBILDUNGEN

Ziel: Vergrößerung des Gegenstandes.

Was ihr braucht: **Lichtquelle** (Halogenlampe), **Linse 1** ($f=35\text{mm}$) plankonvex und **Linse 2** ($f=150\text{mm}$) bikonvex (die große Linse), **Schrödinger Katze**

Wie ihr vorgeht:

Schritt 1: Hier geht es um eine **Variation** des **ersten Versuches**, nur jetzt etwas **schwieriger!** Schaut euch daher auf jeden Fall, **während** ihr diese **Anleitung** lest, das **Bild** des **Versuchsaufbaus** auf der nächsten Folie an!

Schritt 2: Stelle nun die plankonvexe Linse 1 zwischen Gegenstand und Schirm, wobei die plane Seite Richtung Gegenstand zeigt.

Tipp: Das **Zwischenbild** sollte **genau in der Mitte** des Systems **scharf** sein!

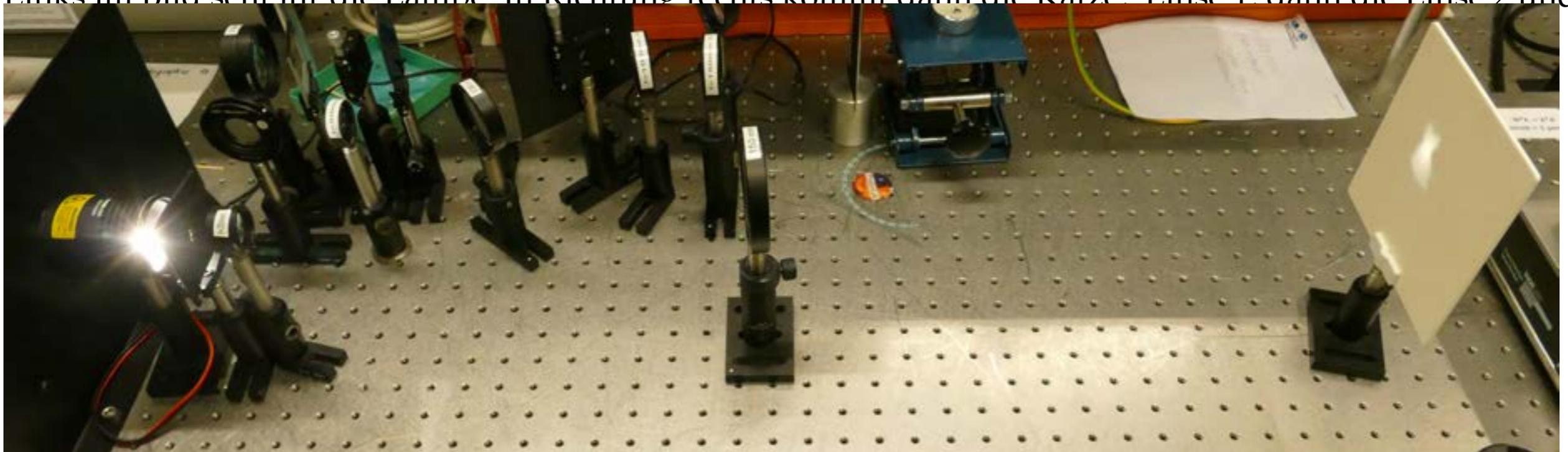
Schritt 3: Nun kommt die zweite Linse ins Spiel: Stelle die bikonvexe Linse 2 zwischen die Linse 1 ($f=35\text{mm}$, plankonvex) und den Schirm.

ZWEISTUFIGE ABBILDUNGEN

Forschungsfrage: Was könnt ihr über die Größe der Abbildung feststellen? Dieser Aufbau zeigt die Funktionsweise eines Mikroskops!

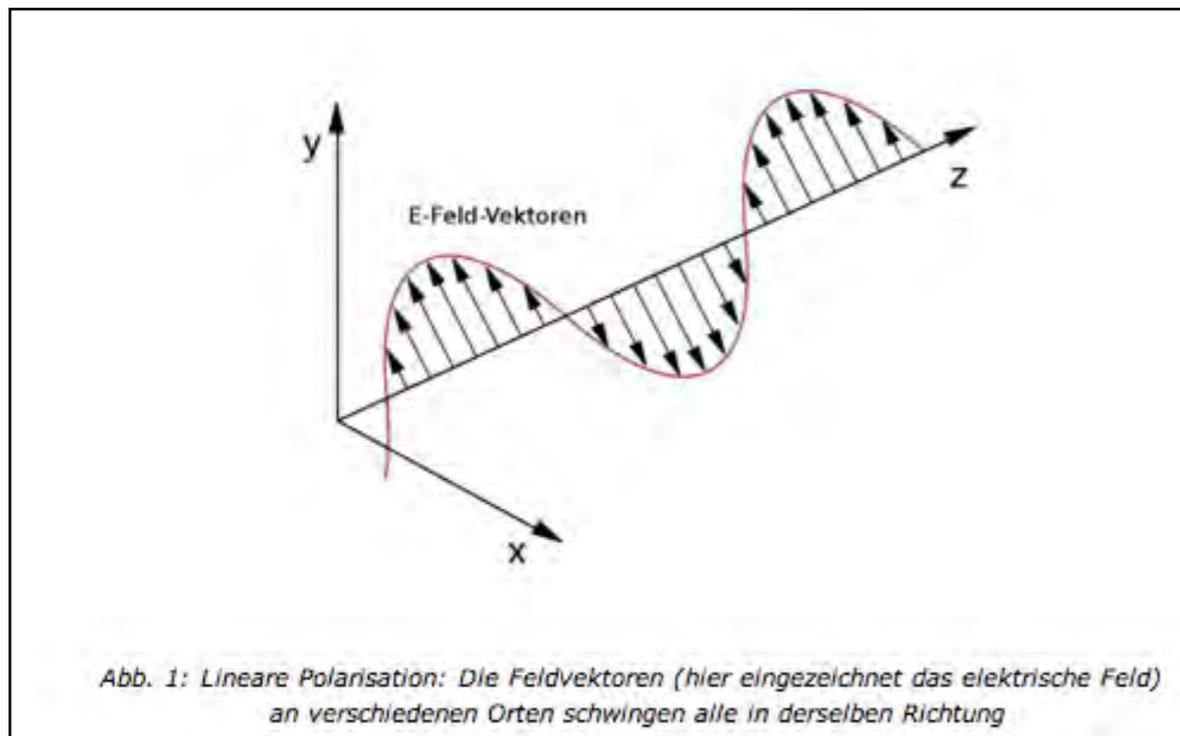
Was du hier siehst:

Links im Bild seht ihr die Lampe. In Richtung rechts kommt dann die Katze, Linse 1, dann die Linse 2 und



ZIRKULARE POLARISATION

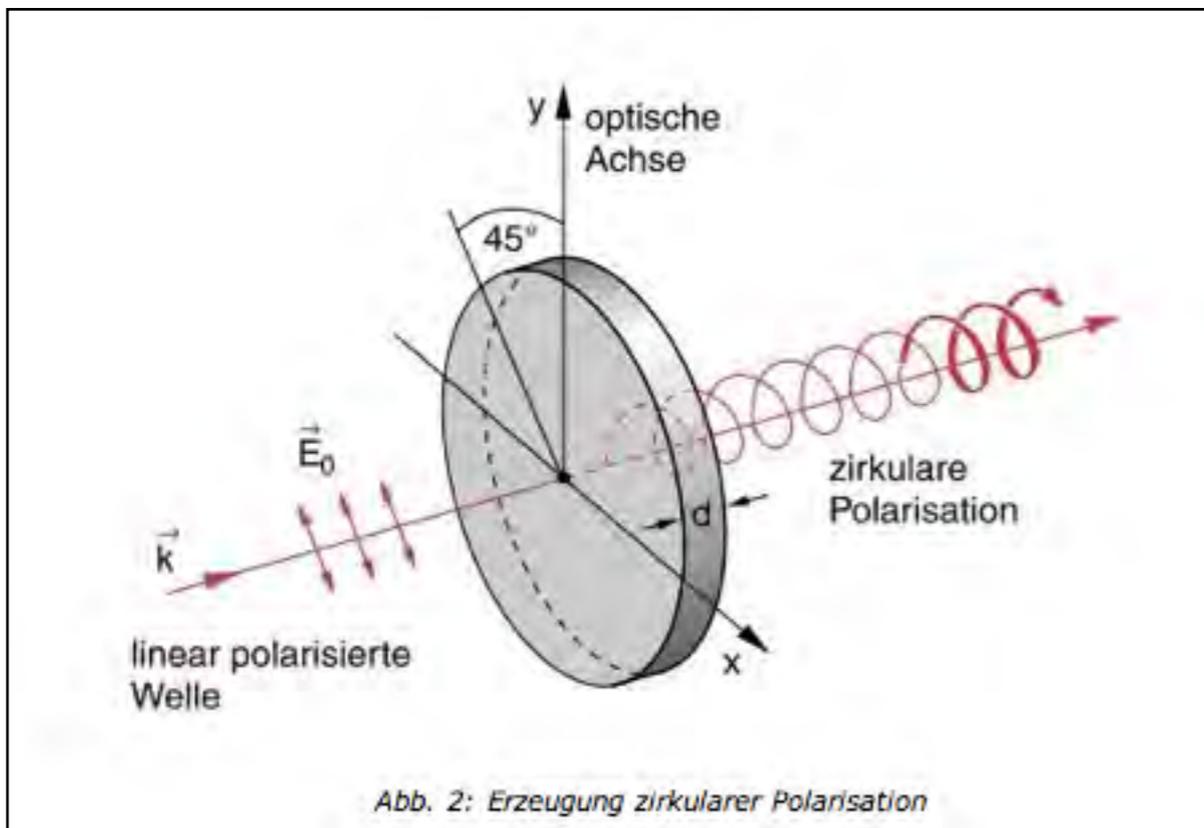
Bei der linearen Polarisation ist die Schwingungsrichtung des elektrischen (und auch des magnetischen) Feldes in einer bestimmten Ebene ausgerichtet. Die Abbildung zeigt vereinfacht den Verlauf der schwingenden Welle entlang der z-Achse. Das E-Feld wird mithilfe von Vektoren dargestellt.



Dieser Zustand kann erreicht werden, wenn man das Licht durch einen Polarisator schickt. Nur die Anteile, die in der, zum Polarisator 'passenden' Ebene schwingen, werden hindurchgelassen. Nun zur zirkularen Polarisation: Betrachtet man den Vektor des elektrischen Feldes, so dreht sich dieser mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und beschreibt entlang der z-Achse einen Kreis. Betrachtet man die Ausbreitung nach dem Durchdringen des Plättchens, entsteht eine Schraube / Spirale, die sich nach rechts oder

links drehen kann.

Zirkulare Polarisation entsteht, wenn linear polarisiertes Licht auf ein $\lambda/4$ - Plättchen (auch Verzögerungsplättchen genannt) auftrifft. Die genaue Funktionsweise des Plättchens findest du im Eintrag "Das $\lambda/4$ - Plättchen".



Für Oberstufenschüler und Profis:

Wenn du den Versuch auch mit zirkularer Polarisation durchführen möchtest, folge der Anleitung zur Polarisation (zirkular). Frage die Laborleitung nach den geeigneten Brillen und $\lambda/4$ -Plättchen, sollten diese nicht an der Versuchsstation bereitliegen.

Verwandte Glossarbegriffe

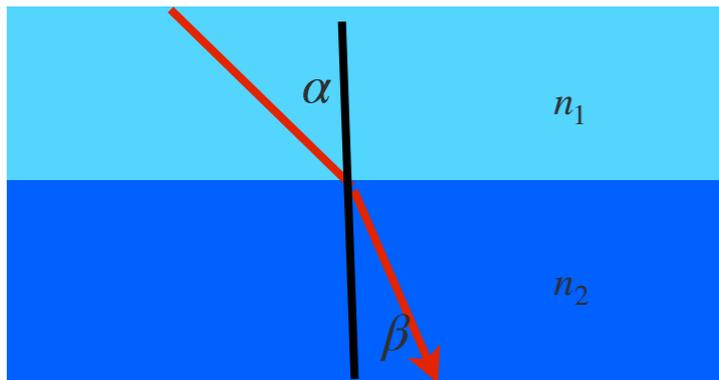
3D-Technik im Kino (RealD)

Index

LICHTBRECHUNG

Zusammenfassung:

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit verschiedenen Brechungsindices, wird er an der Grenze gebrochen, d.h. er ändert seine Richtung. Geht der Lichtstrahl von einem Medium mit geringem Brechungsindex (z.B. Luft) in eines mit höherem Brechungsindex (z.B. Wasser) über, wird der Lichtstrahl zum Lot auf der Grenze der Medien hin gebrochen - beim Eintritt in ein Medium mit geringerem Brechungsindex dagegen vom Lot weg. Dieser Löffel hat also einen Knick wegen des Phänomens der Brechung!



Material mit geringem Brechungsindex



Was ist **Brechung** also nun???

Brechung ist eine **Richtungsänderung** eines einfallenden Lichtstrahls auf ein anderes **Medium** mit **unterschiedlichem Brechungsindex**. Das passiert deswegen, weil sich Licht in verschiedenen Materialien unterschiedlich schnell ausbreitet. Wenn man das als Formel ausdrücken will, sieht das so aus:

$c(n)$ ist die Lichtgeschwindigkeit im Medium, c_0 ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und n ist der Brechungsindex.

$$c(n) = \frac{c_0}{n}$$

Genauer gibt es auf der nächsten Seite.

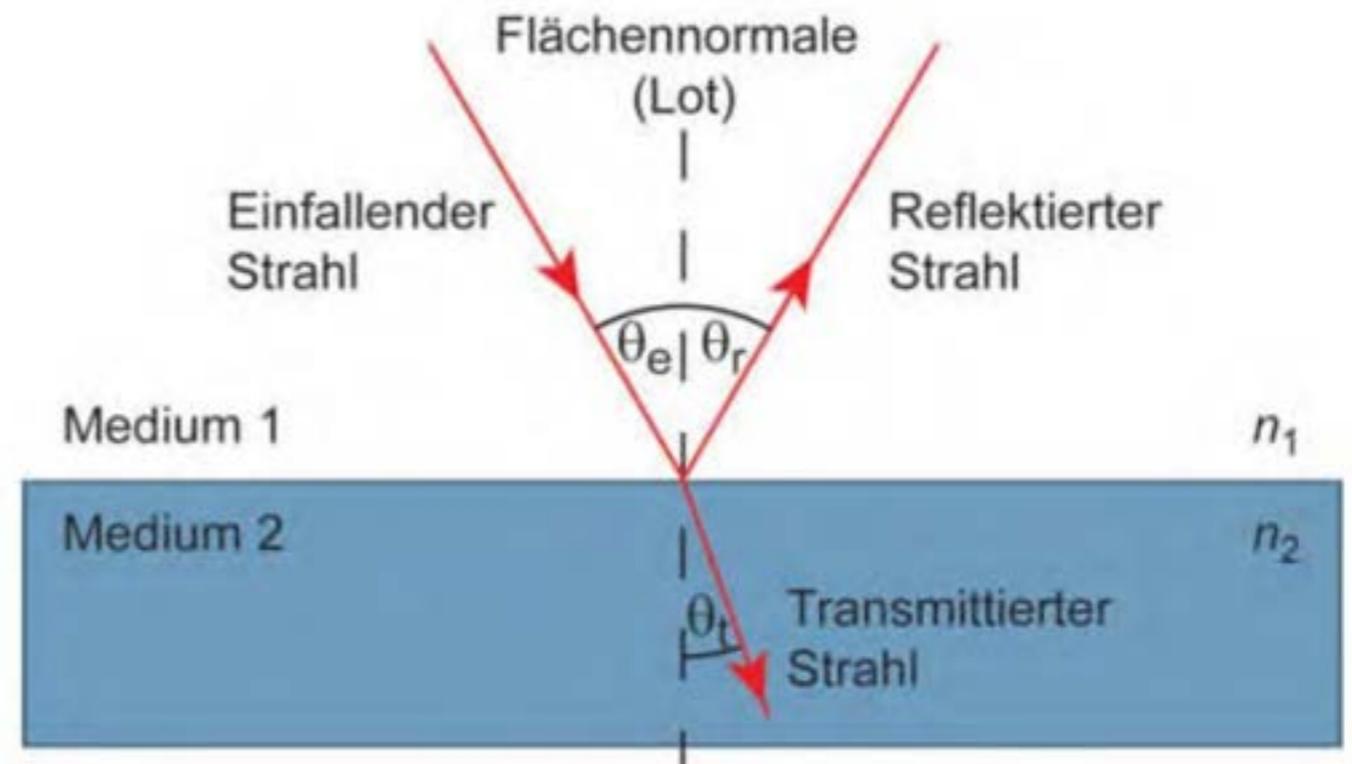
LICHTBRECHUNG

Im Bild wird die **Brechung** und **Reflexion** eines Strahls gezeigt: Ein **einfallender Strahl** aus dem **homogenen Medium 1** trifft auf die Oberfläche des **Mediums 2**. **n** ist der **Brechungsindex**, also eine einheitenlose Zahl die beschreibt, wie stark oder schwach das Licht gebrochen/reflektiert wird.

Die **Winkel** (e=**Einfallswinkel**, r=**Reflexionswinkel** und t=**Transmissionswinkel**) beschreiben hier den Verlauf der Strahlen.

Die Richtungsänderung des gebrochenen Strahles kann man durch das **Brechungsgesetz (Snelliussches Gesetz)** beschreiben:

$$n_1 \sin(\theta_e) = n_2 \sin(\theta_t)$$



LINSENGLEICHUNG

Strahlt der **abzubildende Gegenstand** Licht aus und **sammelt** sich dieses, nachdem es ein **optisches System** durchquert hat, in einem **Punkt** auf einem Schirm, so haben wir eine **Abbildung!**

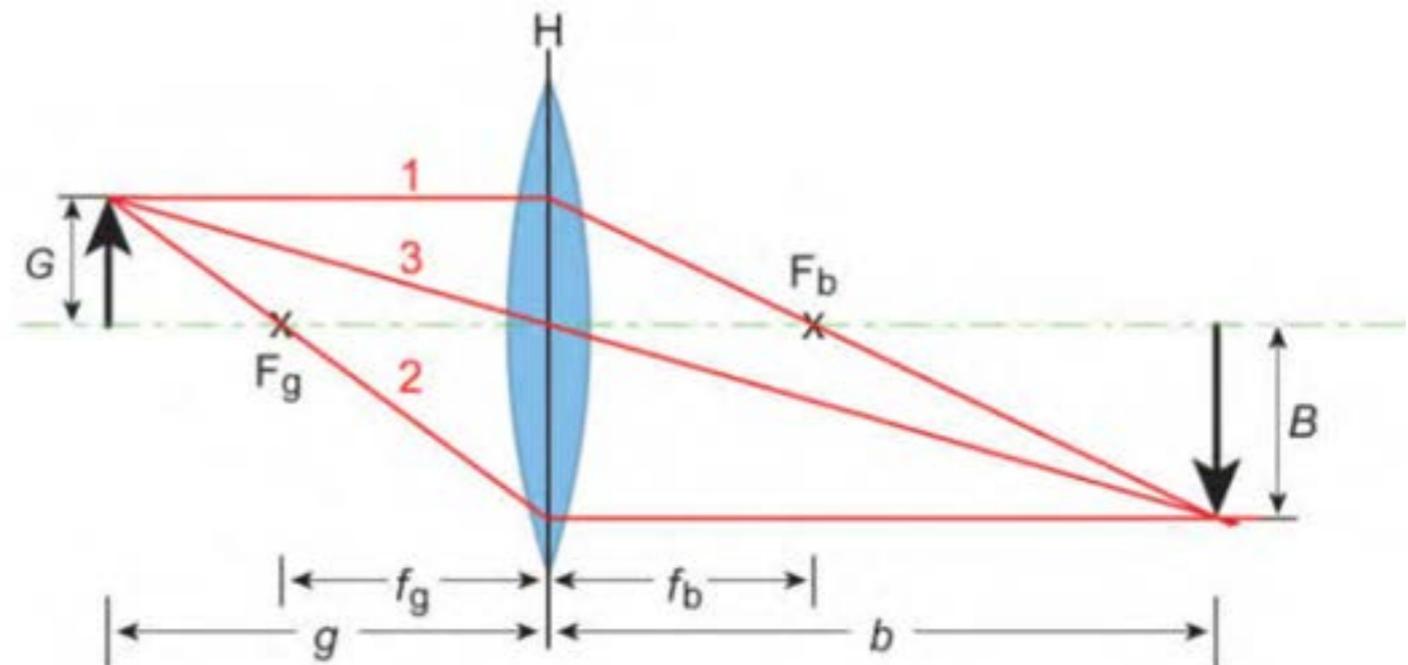
Hier gehen vom **Gegenstand** mit **Gegenstandsweite g** (Abstand von Gegenstand zu Linse) drei repräsentative Hilfsstrahlen aus. **Weg 1** verläuft erst **parallel** zur **optischen Achse** (Symmetrieachse) und dann durch den Brennpunkt F_b . **Weg 2** verläuft erst durch den Brennpunkt F_g und dann **parallel** zur Achse. **Weg 3** geht **direkt** durch den **Mittelpunkt** der Linse (Mittelpunktstrahl). Den Abstand von Linse zum Bild nennt man **Bildweite b**.

Disclaimer: In Wirklichkeit gehen natürlich sehr viel mehr Strahlen als auf dem Bild von dem Gegenstand aus.

Wichtig ist auch der **Brennpunkt F** der Linse, in dem sich achsparallel einfallende Strahlen **treffen**.

Die berühmte **Linsengleichung** oder auch **Abbildungsgleichung** beschreibt die Zusammenhänge dieser Größen:

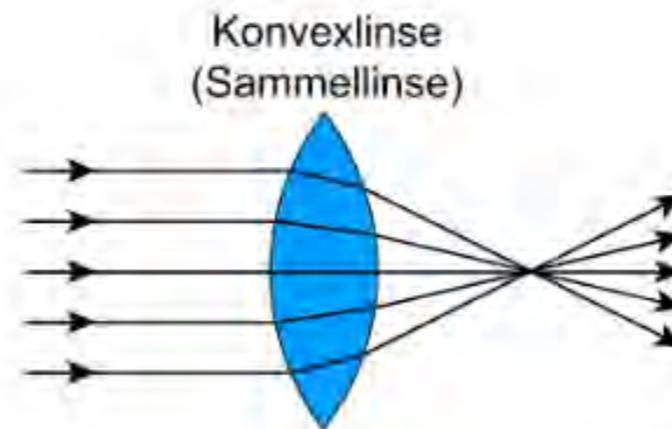
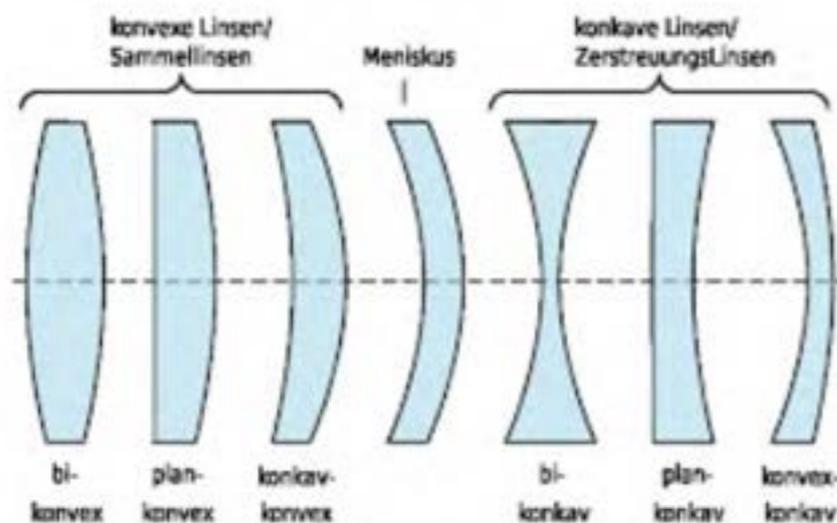
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$



LINSEN

Linsen verändern den **Strahlengang**, indem sie Licht **zerstreuen** (konkave Linsen) oder **sammeln** (konvexe Linsen). Das tun sie, indem sie die Lichtstrahlen an der **Eintritts-** sowie **Austrittsfläche** gemäß dem vorher beschriebenen **Brechungsgesetz** brechen. In der Linse selber ändern die Strahlen nicht ihre Richtung.

Eine **bikonvexe Linse** sammelt die einfallenden Lichtstrahlen, eine **bikonkave** zerstreut sie.



LÖSUNG GEOMETRISCHE OPTIK, VERSUCH 1

Fragestellung: Gibt es eine zweite Gegenstandsweite (oder Bildweite), bei der du ein scharfes Bild erhältst?

Lösung: Im Experiment ist der zweite scharfe Bildpunkt sehr schwer zu lokalisieren. Das liegt daran, dass das Bild sehr klein ist. Mathematisch ist der Fall auch etwas für Profis, weil die Gleichung aufwändig zu lösen ist. Die Gleichung ist nämlich quadratisch und kann durch Lösen mit der Mitternachtsformel zwei Lösungen ergeben.