



Universität Stuttgart

Mitmachlabor

zur Ausstellung
VERTIGO. OP ART UND
EINE GESCHICHTE DES
SCHWINDELS 1520-1970

23.11.2019 bis 19.4.2020
Kunstmuseum Stuttgart

Spiel^{der}Kräfte

2

Inhalt

Grundlagenforschung zum Anfassen 3

Experimentierstationen

Harmonograph 4

Lichtmischer 6

RGB-Bildschirm 8

Druckerfarben 10

Farbfilter 12

Moiré 14

Lasermalerei 16

Farbtemperatur 18

Anamorphosen 21

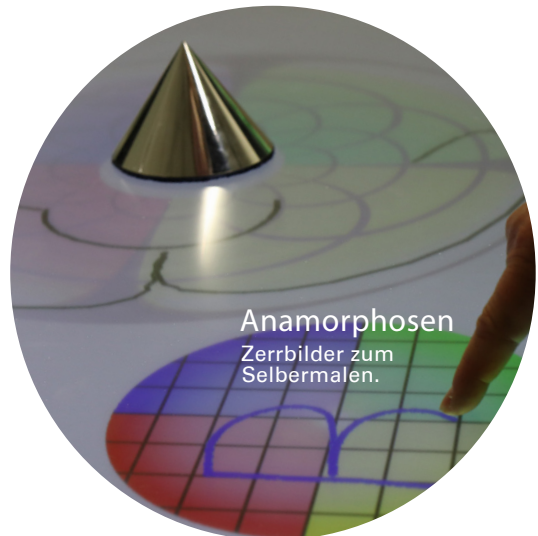
Spiegelwelten 23

Für Zuhause - Figuren im Sand 25

Für Zuhause - Lasermalerei zum Selbermachen 26

Fundgrube Physik 27

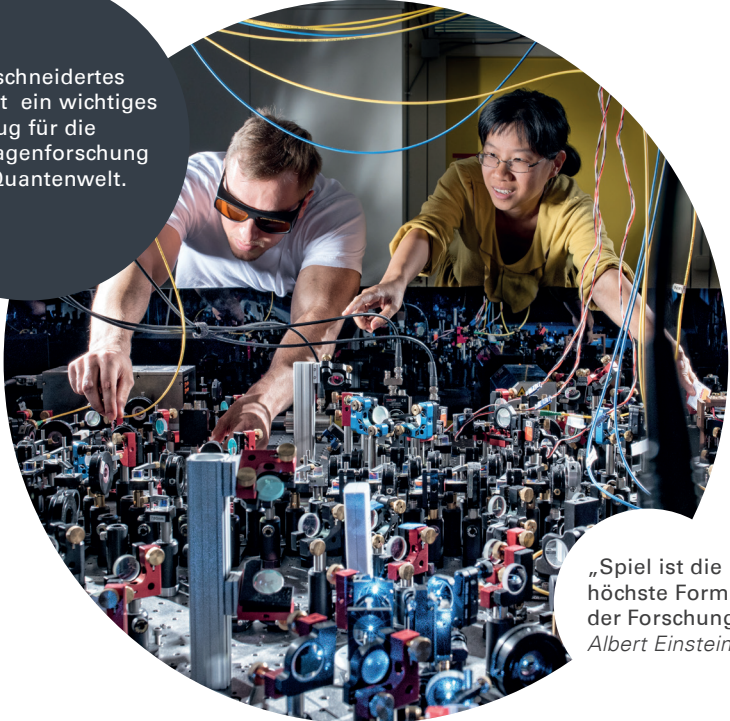
Hintergrundinformationen 28



3

Grundlagenforschung zum Anfassen

Maßgeschneidertes Licht ist ein wichtiges Werkzeug für die Grundlagenforschung in der Quantenwelt.



„Spiel ist die höchste Form der Forschung“
Albert Einstein

„SPIEL DER KRÄFTE“
AUSSTELLUNG UND
SCHÜLERLABOR

Seit 2003 entwickeln wir Experimentierstationen zu physikalischen Phänomenen, die auch für die Grundlagenforschung in unseren Labs relevant sind. Schüler*innen und interessierte Besucher*innen sind eingeladen, selber zu experimentieren, mit Wissenschaftler*innen ins Gespräch zu kommen und Forschung hautnah zu erleben.

PHYSIK UND IHRE
DIDAKTIK

Seit 2016 sind die neu gegründete Abteilung Physik und ihre Didaktik und das Schülerlabor in das MINT-Cluster des Verbundprojekts „Lehrerbildung PLUS“ der lehrerbildenden Hochschulen in der Region Stuttgart eingebunden und bieten zukünftigen Lehrer*innen eine einzigartige Lern- und Lehrplattform. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert PLUS im Rahmen der „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“

Harmonograph

Setze die Pendel in Bewegung und der Stift zeichnet Dir schöne Muster.



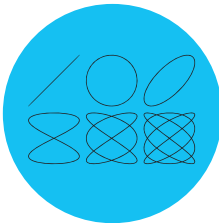
Die interessantesten Bilder entstehen, wenn du die Pendel kreisförmig auslenkst.
Foto: Frank Eppler

Wie funktioniert's

Die Platte und der Stift sind an Pendeln befestigt, die sich unabhängig voneinander in Schwingung versetzen lassen. Lenkt man die Pendel aus und lässt sie los, schwingt jedes von ihnen entlang einer Linie oder Kreisbahn. Jedes Pendel schwingt mit leicht unterschiedlichen Frequenzen. Die Bewegungen überlagern sich und der Stift überträgt das Ergebnis auf das Papier. Der Stift malt Muster, die an Lissajous-Figuren erinnern, benannt nach dem französischen Physiker Jules Antoine Lissajous (1822-1880).

Die Reibung zwischen Stift und Papier dämpft die Bewegung ein klein wenig, die vom Stift gezeichnete Figur wird mit der Zeit immer kleiner.

Lissajous-Figuren lassen sich nicht nur mit Stift und Papier, sondern auch mit einem Laser und rotierenden Spiegeln erzeugen. Wie das geht, kannst du beim Experiment „Lasermalerei“ ausprobieren.

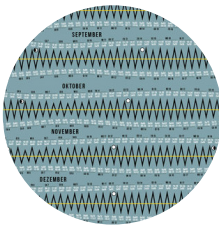


Lissajous-Figuren sind das Ergebnis von zwei rechtwinklig aufeinander treffenden Sinuskurven.

Im Alltag

Einige der Muster, die du mit dem Harmonograph erstellt hast, könnten auch auf einem Oszilloskop erscheinen. Ein Oszilloskop ist ein Laborgerät, das elektrische Signale grafisch darstellt. Die Position eines Punkts auf dem Display wird durch zwei Signale bestimmt. Eines führt zu einer vertikalen Bewegung, das andere zu einer horizontalen Bewegung. Das Oszilloskop macht die Beziehung zwischen zwei Wellenformen sichtbar. Wenn die beiden Frequenzen gleich sind, entstehen Kreise, Ellipsen oder Linien. Erst wenn die Frequenzen sich leicht unterscheiden, entstehen komplexe Muster wie beim Harmonograph oder auch bei der Station „Lasermalerei“.

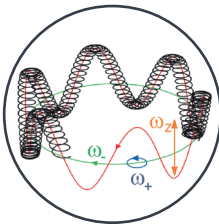
Überlagerte Schwingungen in der Natur und in der Forschung.



Der Tidenkalender St. Peter Ording für 2019 zeigt Ebbe- und Flutstände im Jahresverlauf. Über den Monat ändern sich die Ausschläge. Quelle: www.les-marees.fr

Die Gezeiten

Der Harmonograph kombiniert die Schwingungen des Stiftes und die des Zeichenbretts. Derartige Überlagerungen von Schwingungen sind in vielfältiger Form in der Natur und im Alltag zu finden. Ein Beispiel sind die Gezeiten im Meer. Die Wassermassen folgen dabei den Gravitations- und Fliehkräften, die auf der Erdoberfläche durch den Mond und die Sonne hervorgerufen werden. Diese beiden haben leicht unterschiedliche Periodendauern: Bei der Sonne ist es genau ein halber Erdentag (12 Stunden) und beim Mond sind es 12 Stunden und 25 Minuten. Das gleichzeitige Einwirken dieser beiden Kräfte mit der leicht unterschiedlichen Frequenz sorgt für die unterschiedlich starken Gezeiten im Laufe eines Monats mit Spring- und Nipptiden. Obendrein spielt hier noch eine dritte Periodendauer eine Rolle, nämlich das Jahr, in dessen Verlauf Sonne und Mond unterschiedlich hoch stehen.



Die Abbildung zeigt die Bahnkurve eines gefangenen Elektrons in einer Penning-Falle. Quelle: www.researchgate.net/publication/48908229, Sarah Naimi

In der Forschung

Schwingungen spielen in der Forschung eine wichtige Rolle, da sich Schwingungen besonders gut vermessen lassen. In vielen Experimenten hat man es mit der Überlagerung vieler Schwingungen zu tun. Ein Beispiel ist die Bewegung eines Elektrons in einer sogenannten Penning-Falle. Die Teilchen werden mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern auf einer komplizierten Bahn festgehalten. Vermisst man das Herumwirbeln der Elektronen sehr genau, so erhält man Aufschluss über die magnetischen Eigenschaften eines Elektrons. Die Genauigkeit des Experiments übertrifft dabei bei weitem die Vorhersagen von theoretischen Berechnungen. Es bietet damit eine der besten Möglichkeiten, die Grenzen des Standardmodells zu testen, mit dem alle bekannten Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen (außer der Schwerkraft) beschrieben werden können.

Welche weiteren Farben kannst du mit Rot, Grün und Blau erzeugen?



Additive Farbmischung:
Verschiedene farbige Lichtquellen werden übereinander gestrahlt.

Wie funktioniert's

Farben mischen mit Licht funktioniert anders als mit Malfarben. Es genügen drei Farben z. B. Rot, Grün und Blau (abgekürzt RGB), um weißes Licht zu erzeugen. Mit den drei Reglern kannst du die Helligkeit der farbigen Lichtquellen steuern. Wird die Lichtintensität der jeweiligen Farben verändert, ergeben sich unendlich viele Mischfarben. Die Mischfarben sind immer heller als die Ausgangsfarben, da sich die Lichtintensität der Lampen addiert. Man spricht deshalb auch von additiver Farbmischung. Vergleiche deine Beobachtungen mit dem Experiment „RGB-Bildschirm“. Hier werden die Farben nach dem selben Prinzip „gemischt“.

Farbige Schatten

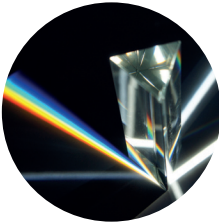
Wenn du dich zwischen die Scheinwerfer und die Wand stellst, erlebst du ein farbiges Wunder. Dein Schatten erscheint auf einmal bunt statt schwarz.



Nur der Kernschatten ist schwarz. Die bunten Halbschatten entstehen, wenn mindestens zwei Scheinwerfer an sind.

Jede farbige Lampe für sich erzeugt einen schwarzen Schatten, wenn ein Gegenstand in den Lichtstrahl gestellt wird. Leuchtet mehr als eine Lampe, bilden sich ein schwarzer Kernschattenbereich und farbige Halbschattenbereiche. Die Halbschatten liegen nicht übereinander, weil das Licht aus verschiedenen Winkeln auf den Gegenstand und die Wand strahlt. Deshalb siehst du auch mehr als einen Schatten, wenn mehr als ein Scheinwerfer leuchtet. Je nach dem, welche Lichtfarbe auf die Wand trifft oder sich mit anderen überlagert, erscheinen die Schatten in der jeweiligen Farbe oder Mischfarbe. Schwarz sind sie an den Stellen, auf die kein Licht fällt.

Welche Rolle spielt Licht in der Quantenphysik?



Ein Prisma zerlegt weißes Licht in seine Farbbestandteile. Foto: Wikimedia

Die Zerlegung von Licht in seine einzelne Farbkomponenten nennt man in der Wissenschaft Spektroskopie. Bereits 1676 gelang es dem englischen Physiker Isaac Newton (1643-1727) einen durch ein Loch fallenden engen Lichtstrahl durch ein Prisma zu leiten und die im weißen Licht enthaltenen Spektralfarben getrennt sichtbar zu machen.

Die Farben des Lichts, das ein Atom aussendet, ist ganz charakteristisch für jedes Element. Die Elemente haben sozusagen einen farbigen Fingerabdruck. Feuerwerker benutzen diese Eigenschaft und füllen die Feuerwerksraketen mit salzigen, metallischen Zusätzen, die für das Farbspektrum des Himmels sorgen. Bekannt ist vielleicht das kräftige gelborange Leuchten von Natrium, das man erhält, wenn man Kochsalz (NaCl) in eine Flamme streut. Strontium oder Lithium sorgen für dunkel- oder karminrote Färbung, Kupfer leuchtet smaragdgrün, Arsen oder Blei bläulich.



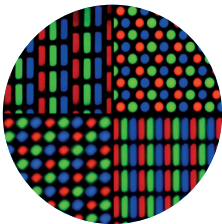
Feuerwerkskörper sind mit einer Mischung aus Salzen und Metallpulver gefüllt, die für das Farbenspiel am Himmel sorgen.
Foto: Wikimedia/Jon Sullivan

In der Forschung ist es inzwischen möglich ultrakalte Atome in komplizierten Fallen einzufangen und deren spektralen Fingerabdruck sehr genau zu vermessen, weil sich Atome nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt ($-273,15\text{ °C}$) so gut wie nicht mehr bewegen. Wenn man die Farbe kennt (Wellenlänge) lässt sich die Schwingungsdauer des elektromagnetischen Feldes sehr genau bestimmen. Diese Schwingung entspricht der Pendelbewegung in einer Uhr. Daraus lassen sich sehr präzise Uhren – sogenannte Atomuhren – bauen. Rekordhalter ist aktuell die Strontium-Uhr. Sie geht in 13,8 Milliarden Jahren (Alter des Universums) um nicht mal eine Sekunde falsch. Auch die Gravitation beeinflusst aufgrund der Allgemeinen Relativitätstheorie die Geschwindigkeit der Schwingung. Steht die Uhr 10 cm höher, ist die Schwerkraft etwas geringer und die Uhr läuft messbar schneller. Wer es genau wissen will, fragt also nicht nur nach der Uhrzeit sondern fragt auch wo die Uhr steht.

Siehst du mit Hilfe der Lupe, welche Farbe die einzelnen Pixel haben?



Mit der Lupe kannst du die einzelnen farbigen Lichtpunkte erkennen, die für den jeweiligen Farbeindruck sorgen.



Weißte Stellen unter der Lupe. Die Farbpunkte sind je nach Bildschirm etwas anders angeordnet.

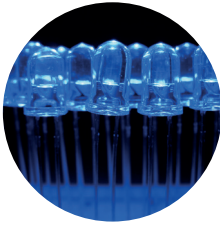
Foto: Wikimedia, Peter Halasz

Wie funktioniert's

RGB steht für die Farben Rot, Grün und Blau. Durch die Lupe kannst Du sehen, dass die Farbstreifen, die aus der Entfernung auf dem Monitor einfarbig erscheinen, in Wirklichkeit aus dicht beieinander liegenden Farbpunkten zusammen gesetzt sind. Vergleiche den roten, grünen und blauen Farbstreifen mit dem gelben, magenta- und cyanfarbenen Streifen. Bei dem roten Streifen siehst Du durch die Lupe schwarze und rote Punkte. Schwarz bedeutet hier „Licht aus“, also kein Licht. Vergleiche Deine Beobachtung mit den anderen Streifen. Der gelbe Streifen leuchtet gelb. Aber wird hier wirklich gelbes Licht ausgesendet? Beim Blick durch die Lupe siehst Du, dass er nicht aus gelben, sondern aus roten und grünen Lichtpunkten zusammen gesetzt ist. Blau wird für diesen Gelbton nicht gebraucht und bleibt daher dunkel. Beim weißen Streifen siehst Du wie links im Bild rote, grüne und blaue Punkte leuchten.

Das funktioniert, weil auch unser Auge einen ganz speziellen Aufbau hat. Das menschliche Auge nimmt Farben mit Hilfe von Farbrezeptoren, den sogenannten Zapfen wahr. Wir haben drei Arten von Zapfen, die jeweils auf grünes, rotes oder blaues Licht reagieren. Je nach dem wie stark die jeweiligen Zapfen angeregt werden, setzt unser Gehirn einen Farbeindruck zusammen. Da die Farbpunkte auf dem Monitor sehr dicht beieinander liegen, kann unser Auge sie nicht mehr einzeln erkennen. Wie beim Experiment „Lichtmischer“ nehmen wir die Mischfarbe wahr. Also z.B. gelb, wenn die grünen und roten Zapfen angeregt werden. Das wird an das Gehirn weitergeleitet und wir schließen daraus: „aha, das ist gelb“. Genau das gleiche passiert, wenn gelbes Licht unser Auge trifft. Dann werden unsere roten und grünen Zapfen genau gleich angeregt und die Rezeptoren melden ans Gehirn wieder „gelb“.

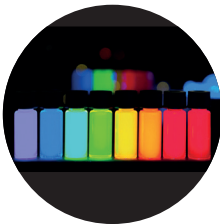
Was bringt Bildschirme in Zukunft zum Leuchten?



Japanische Forscher entwickelten in den 90er-Jahren die ersten leistungsfähigen blauen Leuchtdioden und damit die Grundlage für das effiziente weiße LED-Licht. 2014 gab es dafür den Nobelpreis für Physik.

Bild: Wikimedia/Gussisaurio

LEDs, OLEDs oder Q-LEDs? LEDs (Light Emitting Diodes) oder zu Deutsch Leuchtdioden haben das letzte Jahrzehnt in der Beleuchtungstechnik dominiert. Sie sind über die Jahre heller und effizienter geworden und die Farbqualität hat sich stark verbessert. Auf dem Markt der Bildschirme sind auch noch LCDs und Plasmabildschirme zu finden. In LCDs (Liquid Crystal Displays) sind Flüssigkristalle verbaut, die die Helligkeit regeln, aber selbst keine Lichtquelle sind. Die länglichen Flüssigkristalle lassen je nach Orientierung mehr oder weniger Licht hindurch. Dafür werden sie mit elektrischen Feldern ausgerichtet. Die einfachste Form steckt im Taschenrechner. Plasma-Bildschirme, die vor allem für sehr große Flächen verwendet werden, sind zwar sehr hell verbrauchen aber auch sehr viel Energie. Sie erzeugen verschiedenfarbiges Licht mit Hilfe von Leuchtstoffen, die durch das von Gasentladungen erzeugte Plasma angeregt werden.



Q-LEDs lassen sich in allen Regenbogenfarben herstellen.

Foto: Wikimedia, plasma-chem.com

Wie sieht die Zukunft in der Beleuchtungstechnik aus? LEDs bestehen aus teils seltenen Halbleitermaterialien, die sorgfältig in Kristallform gebracht werden müssen. OLEDs dagegen werden aus einfacheren organischen Materialien hergestellt und müssen dabei keine Kristallstruktur haben. Ihr Nachteil ist, dass sie eine geringere Lebensdauer als herkömmliche LEDs bieten.

Die neueste Entwicklung sind Q-LEDs. Das „Q“ steht hier für Quantenpunkt. Dies sind nanometer-kleine Halbleiterkristalle, die ähnlich wie Atome Licht nur mit bestimmten, sehr klaren Farben abstrahlen. Die entsprechende Farbe lässt sich dabei durch die Größe der Quantenpunkte und ihre Materialzusammensetzung bestimmen.

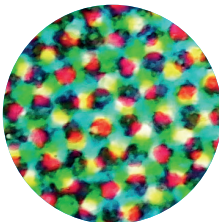
Mit welchen Farben werden bunte Bilder gedruckt?



Beim Drucken sind die Grundfarben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz.



Subtraktive Farbmischung mit den Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb oder abgekürzt CMYK.



Farbdruck unter dem Mikroskop. Sowohl die subtraktive als auch die additive Farbmischung spielen für den Farbeindruck eine Rolle.
Foto: Wikimedia

Wie funktioniert's

Lege die Fischerbootbilder mit der Aufschrift Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz in einem Stapel auf den Leuchttisch. Was siehst du? Verändere die Reihenfolge der übereinander gelegten Bilder. Hat sich etwas verändert? Vergleiche deinen Stapel mit den vier Einzelfolien mit dem Farbausdruck des Fischerboots. Untersuche die mit einem schwarzen Kreis markierten Stellen mit der Lupe genauer. Welche Farbe haben die einzelnen Farbpunkte?

Zur Herstellung von Farbpigmenten oder Farbstoffen benötigst du Cyan, Magenta und Gelb als Grundfarben. Es sind genau die Farben, die du bei der Station „Lichtmischer“ mit jeweils zwei der drei Grundlichtfarben Rot, Grün und Blau mischen kannst, die sogenannten Sekundärfarben des Lichts. Wenn du mit dem Pinsel Farbe auf weißes Papier aufträgst denkst du vielleicht, dass du Farbe hinzufügst. Tatsächlich nimmst du Licht weg. Daher kommt auch der Begriff subtraktive Farbmischung. Die Pigmente deiner Farbe schlucken (absorbieren) einige Farben und streuen oder reflektieren andere. Trägst du blaue Farbe auf, werden alle Farben außer blau absorbiert. Grüne Farbe absorbiert jede Farbe außer grün. Cyan dagegen schluckt das rot-gelbe Licht und lässt nur den blauen bis grünen Teil des Spektrums durch. Gelb lässt rotes bis grünes Licht durch. Wenn wir also eine Schicht Cyan und eine Schicht Gelb übereinander drucken, ist die einzige Farbe, die von keinem der Pigmente absorbiert wird, grün. Durch die Verwendung anderer Pigmentpaare kannst du auch Rot und Blau herstellen. Keine Farbe kommt durch alle drei hindurch und wir erhalten Schwarz. In der Praxis ist es aber nur ein dunkles Braun, weshalb beim Drucken „CMY“ nicht ausreicht und man obendrein noch eine Lage Schwarz „K“ druckt, deshalb „CMYK“.

Warum Schwarz keine Farbe ist.

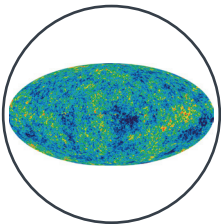


Forscher am MIT stellten im September 2019 einen neuen Weltrekord für das schwärzeste Schwarz auf. 99,995 % des sichtbaren Lichts werden von der Oberfläche verschluckt. Rekordhalter in der Natur ist ein Schmetterling, Papilio Ulysses, mit 99,6 %. Foto: Willem van Aken, CSIRO

Schwarz

Schwarz ist eigentlich keine Farbe. Die Farben, die wir sehen, entsprechen Lichtwellen mit einer bestimmten Wellenlänge bzw. einer bestimmten Frequenz. Trifft Licht auf einen Gegenstand, der nicht selbst leuchtet, sehen wir diesen nur, wenn Licht von ihm reflektiert oder gestreut wird. In unser Auge gelangt das Licht, das nicht absorbiert wurde, und wir sehen den Gegenstand in dieser Farbe. Schwarz erscheint ein Material dann, wenn es Licht weder durchlässt, reflektiert noch abstrahlt. Ein Super-Schwarz, das alles Licht schluckt und nur den Umriss aber keine inneren Konturen erkennen lässt, danach suchen Forscher*innen weltweit und überbieten sich mit immer neuen Rekorden. In der Natur gibt es Vorbilder. Die schwarzen Bereiche der Flügel des Schmetterlings Papilio Ulysses reflektieren stellenweise sehr wenig Licht, was an den besonderen Mikro- und Nanostrukturen auf deren Oberfläche liegt.

Schwarze Körper sind doch nicht so schwarz



Die Temperatur der Hintergrundstrahlung aus dem All ist nicht aus allen Richtungen gleich. Sie schwankt um wenige Tausendstel Grad Celsius. Diese Schwankungen erzählen von der Frühphase unseres Universums. Foto: NASA/WMAP Science Team

Ein „schwarzer Körper“ ist in der Physik ein Körper, der kein Licht reflektiert. Das bedeutet aber nicht, dass er nicht leuchten kann. Tatsächlich kann das Leuchten der Sonne oder einer Glühlampe als Strahlung eines schwarzen Körpers beschrieben werden. Die Sonne - ein fast idealer schwarzer Körper - ist etwa 5.500 °C heiß. Das Licht, das sie aussendet, ist im sichtbaren Bereich am stärksten. Je heißer ein Körper ist, desto kurzwelliger wird seine Wärmestrahlung. Die Verschiebung von Wellenlängen mit der Temperatur sieht man auch, wenn Metalle heiß werden und ihr Glühen von rot über gelb zu weiß wechselt. Die Farbe eines Sterns lässt damit Rückschlüsse auf seine Temperatur zu. Auch das Universum als Ganzes ist ein Schwarzkörper. Seit dem Urknall ist es auf -270 °C abgekühlt und die Strahlung findet sich vorrangig im nicht sichtbaren Mikrowellenbereich - die sogenannte kosmische Hintergrundstrahlung.

Welche Farbe haben die Kraniche? Hebe die Klappen. Stimmt deine Vermutung?



Nur der rote Kranich behält seine Farbe beim Blick durch den roten Filter.
Foto: Konrad Groß

Wie funktioniert's

Da die Kraniche nicht von sich aus leuchten, können wir sie nur sehen, wenn Licht auf sie fällt und Teile des Lichts von der Oberfläche wieder in unser Auge gelangen.

Weißes Licht lässt sich zum Beispiel mit Hilfe eines Prismas in seine sogenannten Spektralfarben zerlegen, die du auch vom Regenbogen her kennst: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett. Welche Farbe die Papierkraniche haben, hängt davon ab, welche Anteile des Lichts sie aufnehmen (absorbieren) und welche Anteile von der Oberfläche zurückgeworfen (gestreut) werden und in unser Auge gelangen. Die bunte Welt wie wir sie wahrnehmen ist also farbiges Licht, das von der Oberfläche eines Gegenstands gestreut wird. Alle gestreuten Farbanteile zusammen gemischt ergeben den Farbeindruck, die sogenannte Körperfarbe. Der gelbe Kranich erscheint uns beispielsweise gelb, weil er alle Farben außer Blau streut.

Wie verändern nun die Farbfilter den Farbeindruck? Halten wir eine Farbfolie vor weißes Licht, sehen wir nur die Farbe, die der Filter durch lässt. So lässt der grüne Farbfilter nur grünes Licht, der rote nur rotes und der blaue nur blaues Licht durch. Ein weißer Gegenstand sieht also durch den grünen Filter betrachtet grün aus.

Im Alltag

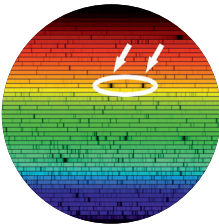
Filter sind auch im Alltag nützlich. So schirmen uns die getönten Gläser einer Sonnenbrille gegen die gefährlichen UV-Strahlen des Sonnenlichts ab. Die für unser Auge unsichtbaren UV-Strahlen werden absorbiert, der sichtbare Teil des Lichts kommt aber teilweise durch.

Farbfilter in der Forschung.

Reinraum des Instituts für Großflächige Mikroelektronik an der Universität Stuttgart. Gelbes Licht verhindert, dass UV-Licht auf die Photolacke fällt, mit denen kleinste Strukturen realisiert werden können. Foto: IGM

Gelbe Filter in Reinräumen

Reinräume mit besonders gefilterter und klimatisierter Luft werden überall dort gebraucht, wo schon kleinste Staubpartikel in der Luft stören würden. Das ist beispielsweise in der Halbleiterfertigung oder in der Optik- und Lasertechnologie der Fall. Oft sind diese Räume in gelbes Licht getaucht statt der üblichen weißen Arbeitsbeleuchtung. Gelbe Filter blocken den ultravioletten (UV) Spektralbereich bis ins sichtbare Blau, weil z.B. Lacke, die in der Halbleitertechnik für Lithographieverfahren verwendet werden oder auch Mikroorganismen UV-empfindlich sind.

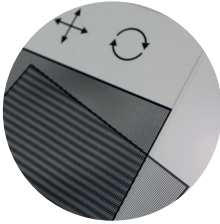
Atomare Filter

Sonnenspektrum von der Erde aus betrachtet. An den schwarzen Stellen absorbieren Atome in der Sonnenatmosphäre ganz bestimmte Wellenlängen. Quelle: N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

Bei genauer Betrachtung des Spektrums von Sonnenlicht im linken Bild fallen schwarze Flecken ins Auge. Im orangenen Bereich absorbiert z. B. das chemische Element Natrium an zwei Stellen das Sonnenlicht, bekannt als Natrium-Doppel-D-Linie (weiß umkringelt). Dieses Orange kommt auf der Erde nicht an. Wenn wir nur auf dieser Wellenlänge sehen könnten, stünden wir selbst bei Sonnenlicht im Dunkeln.

In der Forschung wird diese Eigenschaft von atomaren Dämpfen für extrem genaue Filter benutzt. Das LIDAR-System (Light Detection And Ranging) sendet beispielsweise Laserpulse in die Atmosphäre und detektiert das zurückgestreute Licht. Je nach Wellenlänge streuen andere Atome und Moleküle Licht zurück. Die atomaren Filter sorgen dafür, dass störendes Streulicht (z.B. von der Sonne) heraus gefiltert wird. Über die Lichtlaufzeit lässt sich die exakte Verteilung von Partikeln in der Atmosphäre bestimmen. Deshalb wissen wir sehr genau, was in unserer Atmosphäre herumfliegt. Auch das Licht, das von weit entfernten Planeten zu uns kommt, gibt uns Informationen über die dort vorkommende Zusammensetzung der Atmosphäre.

Lege zwei Muster übereinander. Was passiert beim Verschieben oder Drehen?



Moiré-Muster werden immer dann sichtbar, wenn sich geometrische periodische Muster überlagern. Im Bild sind es ein Linien- und ein Gitterraster, die übereinander liegen.

Foto: Konrad Groß

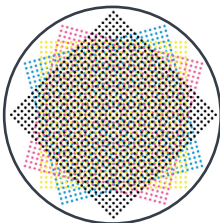
Wie funktioniert's

Beobachte, wie sich die Muster verändern, wenn du sie gegeneinander verschiebst oder verdrehst. Versuche verschiedene Muster zu kombinieren. Wann bekommst du einen großen Effekt? Achte dabei auf die Orientierung der Linien zueinander.

Legst du sich wiederholende Muster wie Linien, Kreise oder Gitter übereinander, entstehen beim Verschieben oder Drehen neue Muster, die auf dem einzelnen nicht zu sehen sind. Eine leichte Bewegung bewirkt schon große Veränderungen. Dieser sogenannte Moiré-Effekt kann dem Auge Schattungen, Kräuselungen, Tiefen und Bewegungen vorgaukeln. Wie kommt es dazu? Überdeckt eine schwarze Linie des oberen Musters weiße Bereiche auf dem unteren Muster, erscheint dieser Bereich dunkel, zwei weiße Stellen übereinander erscheinen dementsprechend hell. Manchmal wirkt das Verschieben wie ein Vergrößerungsglas. Verschiebst du beispielsweise die Raster mit den parallelen Linien wandern die entstehenden Moiré-Streifen, die dicker sind als die Linien auf jedem einzelnen Raster. Die Überlagerungsmuster erinnern an die Interferenz von Wellen in der Physik.

Im Alltag

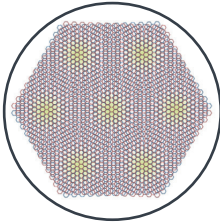
In der Drucktechnologie werden mit Hilfe von Rastern verschiedene Helligkeitsstufen zwischen Schwarz und Weiß erreicht. Dazu werden die Grundfarben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz in verschiedenen Rasterwinkeln übereinander gedruckt. Schaut man die Farbdrucke stark vergrößert an, sieht man die Rosetten, die durch den Moiré-Effekt entstehen. Im Alltag kannst du Moiré-Muster überall da beobachten, wo zwei etwa gleiche Gitter übereinander fallen, z.B. Lattenzäune oder Geländer, die parallel hintereinander stehen, Gardinen mit feiner Struktur die übereinander fallen.



Graue Flächen im Offsetverfahren zeigen ein typisches Moirémuster. Um den Effekt zu mildern, werden die Raster für jede Druckfarbe verdreht. Hier z. B. Cyan 15°, Magenta 75°, Gelb 0°, Schwarz 45°.

Quelle: druckportal.de

Wo Moiré-Effekte in der Forschung eine Rolle spielen



Zwei Lagen Graphen leicht verschoben ergeben schöne Muster und völlig neue Materialeigenschaften: Yuan Cao et al, Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices, Nature 556, 43-50, 2018.
Abb.: Pablo Jarillo-Herrero et al./MIT

Neuartige Materialien

Das „Wundermaterial“ Graphen wird derzeit weltweit von zahlreichen Forschungsgruppen untersucht. Es besteht aus einer einzigen Schicht von Kohlenstoffatomen, die wabenförmig angeordnet sind. In gestapelter Form kennen wir es vom Graphit im Bleistift. 2004 war es Andre Geim und Kostya Novoselov erstmals gelungen, aus einzelnen derartigen Kohlenstoff-Atomlagen Transistoren zu bauen. Deren besondere Eigenschaften beruhen auf der bienenwabartigen Anordnung der Atome in Graphen. 2010 erhielten Geim und Novoselov hierfür den Nobelpreis.

Im April 2018 veröffentlichten Forscher des Massachusetts Institute of Technology M.I.T. in der Fachzeitschrift „Nature“ eine völlig neue Entdeckung mit Graphen. Sie legten zwei Einzellagen gezielt so übereinander, dass ihre Wabengitter um einen sehr kleinen Winkel von exakt $1,1^\circ$ gegeneinander verdreht sind. Dadurch schufen sie ein besonderes Moiré-Muster aus Atomen: Dieses „magic angle twisted bilayer graphene“ wird bei tiefen Temperaturen supraleitend, d.h. es leitet elektrischen Strom völlig ohne Widerstand. Ein großes Ziel der Forscher*innen weltweit ist es, einen Supraleiter zu finden, der sogar bei Raumtemperatur supraleitende Eigenschaften besitzt. Der Rekord lag zuletzt bei -23°C (Drozdov et al, Nature 569, 528-531 (2019)).

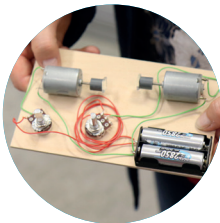
Aus supraleitenden Materialien werden die starken Elektromagneten von Kernspintomographen in Krankenhäusern ebenso gebaut wie Bauelemente für Quantencomputer. Die Materialeigenschaften konventioneller Supraleiter lassen sich nur sehr schwer modifizieren, ganz im Gegensatz zum Graphen-Moiré.

Wie viel unterschiedliche Lichtfiguren kannst du erzeugen?



Mit drei Spiegeln unterschiedlicher Drehgeschwindigkeiten und einem Laserstrahl lassen sich interessante Figuren an die Wand „malen“.

Foto: Konrad Groß



Lasermalerei für zu Hause.

Eine Bauanleitung gibt es unter www.sdk.physik.uni-stuttgart.de

Foto: Konrad Groß

Wie funktioniert's

Mit den Kurbeln kannst du die Drehgeschwindigkeit für jeden Spiegel einzeln steuern. Unterschiedliche Figuren entstehen je nach Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten der Spiegel zueinander, da sich die Kreisbewegungen überlagern.

Der Laserstrahl wird über drei Spiegel an die Wand geworfen, ist aber durch die Spiegeldrehung ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr als einzelner Lichtpunkt sichtbar. Er verschmilzt zu den sogenannten Lissajous-Figuren. Sie sind nach dem französischen Physiker Jules Antoine Lissajous (1822-1880) benannt. Er hat 1855 ein Verfahren entwickelt, mit dem er Schwingungen sichtbar machen konnte. Die Startfigur, wenn keiner der beiden Spiegel bewegt wird, ist immer ein einfacher Punkt. Ist nur ein Spiegel in Bewegung sehen wir einen geschlossenen Kreis. Unser Auge braucht ungefähr $1/15$ Sekunde, um einen neuen Lichtreiz vom vorherigen zu unterscheiden. Ihr kennt das vielleicht vom Daumenkino. Schon eine schnelle Bildfolge mit 15 Einzelbildern pro Sekunde nehmen wir als fortlaufende Bewegung wahr. Statt einzelner Laserpunkte, die nacheinander auf einer Kreisbahn aufleuchten, nehmen wir einen geschlossenen Kreis wahr.

Je nach Veränderung der Drehgeschwindigkeiten (Frequenz) der einzelnen Spiegel im Verhältnis zueinander entstehen kompliziertere Figuren. Wie musst du die Kurbeln drehen, damit du ein stehendes Muster erhältst? Achte auf das Verhältnis der Kurbelgeschwindigkeiten zueinander.

Schau dir auch die Lissajous-Figuren an der Experimentierstation „Harmonograph“ an. Hier sorgen Pendelschwingungen für interessante Muster.

Laser sind aus Alltag und Wissenschaft nicht mehr weg zu denken.



Replik des Laserreflektors von Apollo 11, der 1969 auf der Mondoberfläche installiert wurde.

Foto: Wikimedia

Laser - das besondere Licht

Laserlicht ist eine Lichtquelle, die so in der Natur nicht vorkommt. Die Lichtteilchen - die sogenannten Photonen - die ein Laser aussendet, haben im Gegensatz zu natürlichen Lichtstrahlen alle dieselbe Wellenlänge, die Lichtwellen schwingen exakt im Takt (Kohärenz) und der Lichtstrahl ist fast perfekt gebündelt (kollimiert). Ein Laserstrahl bleibt jedoch nicht unendlich weit kollimiert. Schickt man einen Laserstrahl von der Erde auf den Mond, erreicht der Laserpunkt am Ziel einen Durchmesser von sieben Kilometern. Tatsächlich werden täglich Laserstrahlen auf den Mond geschickt. Bei den Apollo-Missionen wurden mehrere Spiegel auf dem Mond platziert, die diesen Laserstrahl auf die Erde zurück reflektieren wo er detektiert wird. Kennst du die Zeit, die das Licht benötigt, um wieder auf die Erde zu treffen, kannst du mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit (299.792,458 km/s) den Abstand von der Erde zum Mond sehr genau messen. Der schwankt wegen der elliptischen Umlaufbahn des Mondes um die Erde zwischen 356.410 und 406.740 Kilometern.

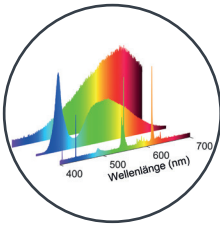


Laser am Paranal-Observatorium mit dem in 90 km Höhe in der Mesosphäre der Erde ein künstlicher Stern erzeugt wurde. Foto: ESO/Yuri Beletsky

Künstliche Leitsterne

Eine andere Anwendung von Lasern, die man ins All schießt, ist der „Guide Star“ (Leitstern). Ein starker gelber Laserstrahl erzeugt in der oberen Atmosphäre in ca. 90 Kilometern Höhe einen Lichtpunkt, quasi einen künstlichen Stern. In dieser Schicht befinden sich Natrium-Atome, die durch das gelbe Licht zum Leuchten angeregt werden. Das Licht, das von den Natrium-Atomen zurück auf die Erde gestreut wird, ist auf dem Weg durch die Atmosphäre allerlei Störungen und Turbulenzen ausgesetzt. Durch die scheinbare Bewegung des künstlichen Sterns erhält man Informationen über die Turbulenzen und kann damit die Optiken von Teleskopen korrigieren für schärfere Bilder aus dem Weltraum.

Vergleiche die Farbkartons im Licht der unterschiedlichen LEDs.



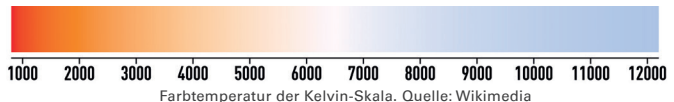
Spektren von verschiedenen Leuchtmitteln im Vergleich. Von hinten nach vorne: Glühlampe, Weißlicht-LED, Neonröhre.
Abbildung: Laurenz Kruty

Wie funktioniert's

Wir sehen die Farbkartons in der Farbe, die von ihrer Oberfläche reflektiert werden und in unser Auge gelangen. Alle reflektierten Farbanteile zusammen gemischt ergeben den Farbeindruck, die sogenannte Körperfarbe. Fehlen allerdings im Spektrum der Lichtquelle bestimmte Farben, z.B. Gelb oder überwiegen bestimmte Farbanteile wie Blau, ist die Mischfarbe, die in unser Auge gelangt verschieden, obwohl es ein und derselbe Karton ist, der unterschiedlichen Lichtquellen ausgesetzt ist.

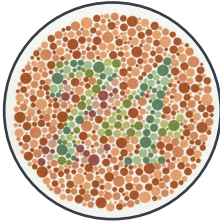
In den Boxen an der Wand sind weiße LEDs mit unterschiedlicher Farbtemperatur verbaut. Wenn du an der Lasche ziehst, kannst du die Lichtspektren vergleichen. Die LEDs haben alle einen hohen Blauanteil unterscheiden sich aber in der spektralen Verteilung der übrigen Farben.

Die Farbtemperatur (in der Einheit Kelvin gemessen) ist nach einem Experiment benannt. Schwarze Körper - beispielsweise die Sonne - glühen in unterschiedlichen Farben (Wellenlängen). Jede Farbtemperatur hat ein anderes Lichtspektrum. Paradoxerweise wirkt Licht umso kühler desto höher die Temperatur ist. Das Licht der Sonne hat etwa 5.500 Kelvin. Eine Kerze strahlt mit 1500 Kelvin warmes Licht aus.



Wundere dich also nicht, wenn Kleidungsstücke bei Tageslicht betrachtet farblich anders erscheinen als im Laden bei künstlichem Licht. In Kaufhäusern sind die Lampen mit Leuchtstoffröhren oder LED-Strahlern bestückt, deren Spektrum nicht exakt mit dem des Tageslichts überein stimmt.

Jedes Auge sieht die Welt ein bisschen anders.



Ishihara-Farbtafel 7: Normal-sichtige lesen hier eine 74, Rot-Grün-Sehschwache eine 21, Monochromaten erkennen keine Zahl.
Bild: wellcomeimages.org

Das menschliche Auge verfügt in der Netzhaut der Augen über drei verschiedene Zapfentypen, die für das Farbsehen zuständig sind. Damit sind wir in der Lage, Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung des Lichts wahrzunehmen. Für kurze Wellenlängen sind es die S-Zapfen (short wavelength) auch Blaurezeptor genannt, deren Absorptionsmaximum bei etwa 455 nm (blauviolett) liegt. Die M-Zapfen (medium wavelength) decken einen Bereich zwischen blauem und orangem Licht ab und haben ihr Absorptionsmaximum bei ungefähr 534 nm (smaragdgrün). Daher auch der Name Grünrezeptor. Die L-Zapfen (long wavelength) werden als Rotrezeptoren bezeichnet, obwohl ihr Absorptionsmaximum bei ungefähr 563 nm (gelbgrün) liegt. Sie übernehmen aber die Hauptleistung bei der Wahrnehmung von rotem Licht. Unser Auge ist bei 555 Nanometern (grüngelb) am empfindlichsten. Das ist gerade der Bereich in dem auch das Sonnenlicht am hellsten strahlt. Werden alle Zapfentypen gleich gereizt, ergibt sich der Farbeindruck weiß. Weißes Sonnenlicht wird also von allen drei Farbzapfen in unserem Auge detektiert und erst unser Nervensystem interpretiert den dreifachen Reiz als weiß. Ändert sich das Reizverhältnis, können unserem Gehirn alle Farbtöne gemeldet werden, wie du sie auch am Experiment „Lichtmischer“ zusammen stellen kannst.



Vögel können Licht ultravioletter Wellenlängen wahrnehmen, die für uns unsichtbar sind.

Foto: Wikimedia, Kathy Büscher

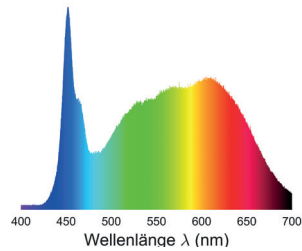
Vögel, Reptilien, Fische und einige Insekten haben noch einen vierten Zapfentyp, der im für uns unsichtbaren Ultraviolett oder Violett sein Absorptionsmaximum hat. Sie können daher mehr Farben unterscheiden als wir Menschen. Von Vorteil ist das bei der Nahrungssuche, da die Oberfläche vieler Früchte Ultraviolett reflektiert. UV-Licht spielt aber auch bei der Partnerwahl mit. So wählen beispielsweise Blaumeisenweibchen das Männchen, das am stärksten im Ultraviolett-Bereich leuchtet.

20

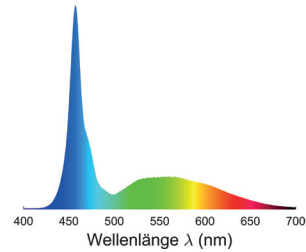
Farbtemperatur

Das Spektrum und die Farbtemperatur der Weißlicht-LEDs in den Boxen.

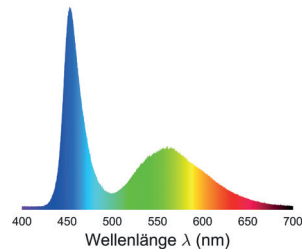
LED 1:
2.700 Kelvin



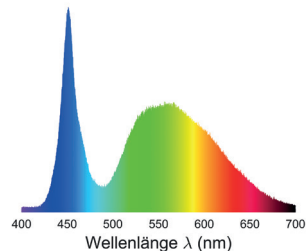
LED 2:
5.000 Kelvin



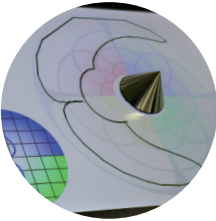
LED 3:
6.500 Kelvin



LED 4:
10.000 Kelvin



Kannst du die Bilder entschlüsseln und eigene Anamorphosen malen?



Errätst du, welchen Buchstaben du beim Blick auf den Spiegelkegel siehst? Das unverzerrte Karoraster dient als Hilfestellung für eigene Anamorphosen.
Foto: Konrad Groß

Wie funktioniert's

Setze den Spiegelzylinder oder den Spiegelkegel an die markierte Stelle. Je nach Spiegelkörper bekommst du ein Raster eingeblendet, das dir die verzerrte Darstellung zeigt. Erst der Blick seitlich auf den Zylinder oder mit einem Auge von oben auf den Kegel zeigt dir die richtige Ansicht eines Bildes oder deiner Zeichnung. Finde heraus, wo bei jeder Form oben und unten oder rechts und links ist. Das unverzerrte Linienraster hilft dir dabei. Wie musst du deinen Namen schreiben, damit du ihn im Spiegelzylinder lesen kannst? Wo ist im Spiegelkegel innen und außen?

Ein solches verzerrtes Bild nennt man Anamorphose (aus dem griechischen anamorphosis = die Umformung). Als Anamorphose bezeichnet man Zeichnungen oder Bilder, die so verzerrt sind, dass du sie nur unter einem bestimmten Blickwinkel oder mit Hilfe eines speziellen Spiegels erkennen kannst.



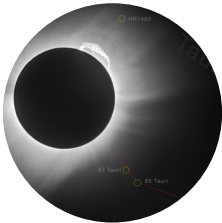
Das Fahrrad bei Radwegmarkierungen sieht aus der Nähe betrachtet gestreckt aus. Erst aus der Ferne sehen die Räder wieder rund aus.
Foto: H. Joachim Schlichting

Du siehst: Bei jeder Darstellung ist es wichtig, sich im Voraus Gedanken über den Blickwinkel der Betrachter zu machen. Im Alltag kannst Du an vielen Orten Anamorphosen finden, manche liegen sogar einfach auf der Straße. Fahrbahnmarkierungen sind beispielsweise Anamorphosen. Sie sind, aus der Nähe besehen, leicht verzerrt gezeichnet. Aber bei einem flachen Blickwinkel aus der Ferne betrachtet sehen sie unverzerrt aus. Das ist praktisch, da Verkehrsteilnehmer*innen im Straßenverkehr idealerweise ihren Blick nach vorne richten und die Dinge in einiger Entfernung vor ihnen wahr nehmen. Auch bei der Fußballbandenwerbung sind Anamorphosen im Spiel. Das Bild ist sehr stark in die Länge gezerrt. Die Bande liegt flach am Boden, wirkt aber aus einem bestimmten Kamerawinkel für die Fernsehschaauer zu Hause als stünde sie senkrecht am Spielfeldrand.

Was verraten uns verzerrte Bilder aus dem Weltraum über ferne Galaxien?



Das Weltraumteleskop Hubble hat 2018 ein „Smiley“ aufgenommen. Die Augen in dem Gesicht sind zwei Galaxien. Der Mund ist eine Galaxie, deren Licht auf dem Weg zur Erde mit dem so genannten Gravitationslinseneffekt verzerrt und gestreckt wurde. Foto: ESA/Hubble & NASA; Judy Schmidt

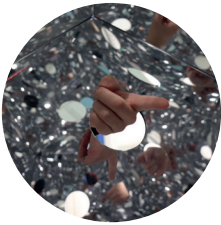


Das Bild der Sonnenfinsternis von 1919 zeigt Details der Sonnenkorona, eine riesige Protuberanz am oberen Rand der Sonne und Sterne des Sternbilds Taurus unten rechts, die zur Überprüfung der ART benutzt wurden. Quelle: ESO/Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl/F. W. Dyson, A. S. Eddington, & C. Davidson

Es gibt aber auch Situationen wo die Verzerrung selbst das interessante physikalische Phänomen ist. Galaxienhaufen - riesige Materieansammlungen im Universum - können durch ihre enorme Anziehungskraft Licht ablenken und wirken wie eine gigantische Linse, die den Weg des Lichts dahinter liegender Objekte verbiegen kann. Dieser Linseneffekt beruht auf der Gravitation. Deshalb spricht man von Gravitationslinsen. Die Lichtbögen wie der Mund im „Smiley“ links zeigen das Licht junger Galaxien, die Milliarden von Lichtjahren hinter den punktförmigen Galaxienhaufen liegen. Sie wären ohne den Gravitationslinseneffekt gar nicht sichtbar. Mit Hilfe großer Teleskope können Forscher anhand der Spektren die Entfernung zwischen einer Galaxie und dahinterliegenden Objekten bestimmen, die durch den Gravitationslinseneffekt als Lichtbogen sichtbar sind.

Bei einem schwarzen Loch, dem wahrscheinlich extremsten Ort im Universum, bewirkt die verzerrte Raumzeit einen besonders starken Gravitationslinseneffekt. Gravitationslinsen sind auch ein Beweis, dass Albert Einstein mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie richtig lag und die Sonne das Licht entfernter Sterne ablenken kann. Die drei Astronomen F. W. Dyson, A.S. Eddington und C. Davidson nutzten die Sonnenfinsternis im Jahr 1919, um Einsteins damals noch neue Allgemeine Relativitätstheorie (ART) experimentell zu testen und brachen mit zwei Teams in die Karibik auf, um dort die Sonnenfinsternis zu beobachten. Mit bahnbrechendem Erfolg, denn sie konnten die scheinbare Verschiebung der Position eines Sternes nahe der Sonnenscheibe messen, da hier der Effekt am stärksten sein sollte. „Lichter am Himmel alle schief“: So überschrieb die New York Times am 10. November 1919 ihren Beitrag über die Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Albert Einstein und seine Theorie wurden über Nacht berühmt.

Findest du dein Spiegelbild, wenn du in den Spiegelwürfel blickst?



Wie oft siehst du deine Hand im Spiegel? Oder gehört sie gar nicht zu dir?



Licht breitet sich geradlinig aus. Manchmal wird der Lichtweg sichtbar, z.B. wenn Sonnenstrahlen auf Nebeltröpfchen treffen.
Foto: pixnio.com

Wie funktioniert's

Spiegelbilder sind eigentlich nur Scheinbilder. Wenn du vor einem Spiegel stehst, werden die Lichtstrahlen, die von dir ausgehen, am Spiegel zurück geworfen und fallen in dein Auge. Es wirkt so, als stündest du hinter dem Spiegel, wobei du vom Spiegel genau so weit entfernt bist wie dein Spiegelbild.

Dieser Spiegelwürfel hat die Form eines sogenannten Dodekaeders, also eines regelmäßigen Körpers, der aus zwölf Fünfecken zusammengesetzt ist. Schaust du durch eines der Gucklöcher, musst du dein Spiegelbild erst suchen. Jedes der Fünfecke hat ein parallel gegenüber liegendes Fünfeck. Wenn du nun durch eines der Gucklöcher schaust, fällt der Blick genau auf das Loch in der parallel gegenüber liegenden Seite und nicht auf einen Spiegel, von dem das Licht zu dir zurück reflektiert wird. Deine Freunde, die gleichzeitig durch die anderen Gucklöcher ins Spiegelwürfelinnere schauen, können dich jedoch sehen und zwar nicht nur einmal sondern vielfach und du sie genau so. Jeder erblickt unüberschaubar viele Abbilder von allen anderen. Aber schauen die Spiegelbilder alle gleich aus?

Ein Labyrinth aus Spiegeln für die Wissenschaft



Ein Labyrinth aus Spiegeln auf einem optischen Tisch bringt Laserstrahlen in die gewünschte Form und Farbe, die für Experimente mit Atomen benötigt wird.
Foto: Wolfram Scheible

Licht ist eine flüchtige Sache. Es lässt sich sehr schwer abbremsen, einsammeln, oder gar einsperren. Licht ist in Sachen Geschwindigkeit ungeschlagener Rekordhalter im Universum mit etwa 300.000 Kilometern pro Sekunde oder umgerechnet etwas mehr als einer Milliarde Kilometer pro Stunde. Mit Lichtgeschwindigkeit könnte ein Lichtstrahl in einer Sekunde siebenmal die Erde umrunden. Für den Weg von der Erde zu unserem benachbarten Sternsystem Alpha Centauri benötigt ein Lichtstrahl 4,37 Jahre. In Kilometern gemessen entsprechen 4,37 Lichtjahre 41,32 Millionen mal eine Millionen Kilometer oder wissenschaftlicher gesagt 41,32 Peta-Kilometer, wahrlich ein kosmischer Marathon.

Wie schwer es ist, Licht einzufangen, mussten schon die Schildbürger*innen zu ihrem Leidwesen erfahren. Beim Rathausbau vergaßen sie Fenster einzubauen. Eine Lösung musste her und die findigen Bürger*innen hatten die Idee, das Sonnenlicht draußen im Freien in Säcke und Eimer zu füllen, um sie wie Wasser ins Haus zu tragen. Wie du schon ahnst, ging der Plan leider nicht auf. Im Rathaus blieb es dunkel. Ende der Geschichte?



Seit 1967 beruht die Basis-einheit der Zeit auf einer Eigenschaft von Cäsium-Atomen. Die vier Primärurhuren der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB gehen mit einer Genauigkeit von 16 Stellen hinter dem Komma.
Foto: PTB

Nein, Physiker*innen ist das Lichteinfangen tatsächlich gelungen. Dazu werden zwei Spiegel genau gegenüber aufgestellt, so dass ein Lichtstrahl immer hin und her geworfen wird und nicht entkommen kann. Und wie lange funktioniert das? Die besten Spiegel können einen Lichtstrahl bis zu 100.000 mal reflektieren bevor das Licht verloren geht. Das bedeutet das man Licht bis nur zu einer tausendstel Sekunde einsperren kann. Den Schildbürgern hätte das auch nicht gereicht, um das Rathaus zu erhellen. Aber den präzisesten Atomuhren der Welt genügt diese kurze Zeit der Lichtspeicherung, um ihre Genauigkeit zu erreichen.

Figuren im Sand. Lass das Pendel für dich malen.

Sandpendel

Eine mit Sand gefüllte Flasche raffiniert aufgehängt und angeschubst zaubert tolle Sandmuster auf den Boden.

Du brauchst

1 x PET-Flasche
1 x Cutter oder spitze Schere
1 x Bohrer
Faden oder Schnur
feinen Sand

So wird's gemacht

Schneide mit dem Cutter vorsichtig den Boden der PET-Flasche ab. Bohre seitlich drei Löcher in die Plastikwand, so dass du den Faden durchziehen kannst. Die Flasche wird an den Fäden mit dem Deckel nach unten aufgehängt. Bohre mit einem feinen Bohrer ein Loch mit einem Durchmesser von ca. 4 mm in den Deckel, damit der Sand aus der Flasche rieseln kann. Wenn du groben Sand verwendest, dann sollte das Loch entsprechend etwas größer sein. Der Sand sollte trocken, fein und gut rieselfähig sein.

Probier's aus und beobachte

Hänge das Flaschenpendel an einem Punkt auf, so dass die Flasche nah über dem Boden schwingen kann und fülle sie mit feinem Sand. Ein Klebestreifen über dem Loch im Deckel verhindert, dass der Sand gleich aus der Flasche rieselt. Nun lässt du die Flasche gleichmäßig schwingen. Der Sand bildet eine

Spur und du kannst sehen, welchen Weg die Flasche beim Pendeln genommen hat.

Was steckt dahinter?

Je nach dem ob du die Flasche in einer Linie hin und her (linear) oder kreisförmig schwingen lässt, ergeben sich andere Muster. Da die Reibung in der Luft die Bewegung immer mehr abschwächt, wird die Spur immer enger



gezogen bis sie ganz zum Ruhen kommt. Interessante Effekte erhältst du, wenn du dein Pendel nicht nur an einem Punkt aufhängst, sondern an zwei Punkten, so dass sich ein V ergibt, an dessen Spitze die Flasche hängt. Das Pendel schwingt nun in zwei verschiedene Richtungen und mit unterschiedlichen Längen - in der einen Richtung dauert eine Schwingung hin und zurück länger als in der anderen. Die Sandfiguren, sogenannte Lissajous-Figuren, konntest du bereits beim Harmonograph beobachten.

*Lasermalerei zum Selbermachen.***Lasermalerei**

Bau dir eine Lasershow für Zuhause.

Du brauchst

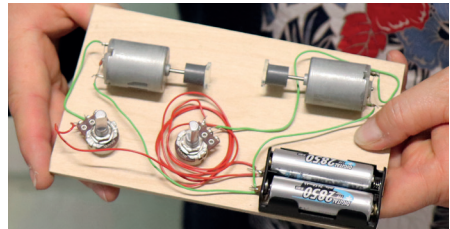
2 x Elektromotoren DC ca. 3 Volt bei ca. 5.000 Umdrehungen pro Minute
 1 x Laserpointer (< 1 mw)
 2 x Mosaikspiegelsteine
 2 x Potentiometer 500 Ohm
 1 x Batteriehalterung + 2 x AA-Batterien
 1 x Brett als Basis (ca. 10 x 15 cm)
 Klötzchen als Motorblock und Spiegelbefestigung, Heißklebepistole, Lötkolben, Lötzinn und Drahtlitze

So wird's gemacht

Klebe die beiden Motoren jeweils auf einen kleinen Standfuß (z.B. aus Holz), so dass du sie naher besser schieben und positionieren kannst. Die Spiegelsteine klebst du unter einem 2° Winkel schräg auf die Motorachse, z.B. mit Hilfe eines 2° angeschrägten Rundholzstücks.

Schneide Drahtlitze in der Länge zurecht, so dass sie wie im Bild zu sehen von den Motoren zum Potentiometer und zur Batterie reichen. Löte nun zwei Kabel an den einen Motor und verbinde eines davon mit dem Potentiometer, das andere direkt mit dem Batteriefach. Die Polung spielt dabei keine Rolle. Verbinde nun noch das Potentiometer mit dem Batteriefach. Mit dem zweiten Motor verfährt du genau so. Befestige nun den Laserpointer, so dass du ihn bequem an- und ausschalten kannst. Wenn du alle Teile

befestigt hast, kannst du die Batterien einlegen. Teste, ob sich die Spiegel drehen und ob du die Geschwindigkeiten einzeln für jeden Motor einstellen kannst. Falls du die Geschwindigkeit nicht regeln kannst, hast du vermutlich das Potentiometer an die falsche Lasche gelötet. Löte einfach einen Draht auf die leer stehende Lasche um. Dann geht es an die Justierung. Vorsicht! Stelle sicher, dass du den Laserstrahl unter Kontrolle hast und niemanden ins Auge trifft.

**Probier's aus und beobachte**

Teste, in welcher Position Laser und Spiegel zueinander stehen müssen, damit schöne Figuren an der Wand entstehen. Klebe die Motoren und den Laser an dieser Position fest.

Was steckt dahinter?

Die Laserfiguren entstehen durch die Überlagerung der Bewegung der beiden Spiegel, von denen der Laserstrahl auf die Wand projiziert wird (Details S. 16-17). Eine luxuriösere Variante findest du auf den Seiten des Exploratoriums http://www.exo.net/~donr/activities/Laser_Lissajous.pdf auf Englisch.

Anregungen und Hintergrundwissen aus dem WWW.

DEUTSCHE WEBSEITEN

Experimentideen für kleine Forscher*innen

www.haus-der-kleinen-forscher.de
www.physikforkids.de
www.meine-forscherwelt.de/werkstatt/
www.labbe.de/zzzebra/

Hintergrundwissen für kleine und große Forscher*innen

www.leifiphysik.de
www.weltderphysik.de
 Quanten-Kati, YouTube

ENGLISCHE WEBSEITEN

Experimentideen, Videos für kleine und große Forscher*innen

www.exploratorium.edu/snacks
www.arvindguptatoys.com/toys.html
www.scienceathome.org/games/
www.kvantebanditter.dk/en/quantum-kate



Testlauf für das Sandpendel auf dem Campus.

VERTIGO. OP ART UND EINE GESCHICHTE DES SCHWINDELS 1520-1970

23. November 2019 - 19. April 2020
Kunstmuseum Stuttgart

AUSSTELLUNG KURATIERT VON

Eva Badura-Triska (mumok) | Eva-Marina
Froitzheim (Kunstmuseum Stuttgart) |
Markus Wörgötter (freier Kurator) |
In Kooperation mit dem mumok –
Museum moderner Kunst Stiftung
Ludwig Wien
<https://kunstmuseum-stuttgart.de>
<https://www.mumok.at>

WISSENSCHAFTLICHES KONZEPT UND TEXTE ZUM MITMACHLABOR

Universität Stuttgart | Physikalisches Institut
Robert Löw
Karin Otter
Marc Scheffler
<https://www.f08.uni-stuttgart.de/physik>
sdk.physik.uni-stuttgart.de

DESIGN UND BAU DER EXPERIMENTIERSTATIONEN

Robert Löw und Karin Otter | Universität Stuttgart, 5. Physikalisches Institut
mit Hilfe der studentischen Mitarbeiter*innen im Team „Spiel der Kräfte“
Malte Kasten und Benjamin Renz (Anamorphosen), Sebastian Schikora (Harmo-
nograph), Simon Koppenhöfer (Lichtmischer) sowie Konrad Groß, Laurenz Kruty,
Teresa Pfau und Julian Zeller.

UNSER BESONDERER DANK GEHT AN

die Schreinerei der Universität Stuttgart | Andreas Hauke & Team, die Mechanik-
werkstatt des Physikalischen Instituts | Ralf Kamella & Team, die Abteilung Tieftemper-
atur am Physikalischen Institut | Joachim Lefèvre und Bernd Schobel sowie Ulrich
Schneider | Vorlesungsvorbereitung des Fachbereichs Physik ohne die die Realisie-
rung des Mitmachlabors nicht möglich gewesen wäre.



Die Physik
zur Kunst.
Experimente
zum Anfassen.