

# Eine Unterrichtssequenz zur Vorbereitung eines Besuchs im PhotonLab

Auszug aus der Schriftlichen Hausarbeit im Fach Physik  
im Rahmen der zweiten Staatsprüfung  
für das Lehramt an Gymnasien

Veronika Bösl

im August 2018

---

Haben Sie Anregungen oder Verbesserungsvorschläge, so kontaktieren Sie mich bitte unter

[vrone123@hotmail.com](mailto:vrone123@hotmail.com)

Gerne sende ich Ihnen das digitale Material in editierbarer Form zu. Schicken Sie mir dazu bitte ebenfalls eine kurze E-Mail.

## Kurzübersicht:

### Zielgruppe, Dauer und Zeitpunkt:

10. Klasse Gymnasium; 3 Unterrichtsstunden; im Lehrplan nach dem Punkt „Wellen- und Teilchencharakter des Lichts“

### Notwendiges Vorwissen:

- Klasse 9: Energieaufnahme und -abgabe bei Atomen
- Klasse 10: Grundlagen der Wellenlehre (Beugung, Brechung, Interferenz am Einfach- und am Doppelspalt); Wellen- und Teilchencharakter des Lichts (insb. Photonenenergie)

### Was ist das *PhotonLab*?

Das *PhotonLab* ist ein Gemeinschaftsprojekt des „Munich Centre for Advanced Photonics“, der Fakultät für Physik der LMU München und des Max-Planck-Instituts (MPI) für Quantenoptik:

Schülerlabor *PhotonLab*, Leiterin: Frau Dr. Silke Stähler-Schöpf  
 Hans-Kopfermann-Str. 1  
 85748 Garching b. München  
 Homepage:  
<http://www.munich-photonics.de/de/nachwuchsfoerderung/schuelerlabor-photonlab/>

### Ablauf:

Stunde	Thema bzw. Ablauf der Stunden
1. Stunde	Aufbau und Funktionsweise eines Lasers
2. Stunde	Räumliche und zeitliche Kohärenz von Licht
3. Stunde	3D-Sehen: Farbanaglyphenverfahren und Polarisierung, Licht als elektromagnetische Welle
<i>Besuch des Schülerlabors</i>	

### Material/Sonstiges:

2. Stunde:

- Jede Gruppe (à 3-4 Schüler) erhält ausgeschnittene, farbige Pfeile (5-6 Farben, ca. 10-15 Pfeile pro Farbe).

3. Stunde:

- Modell aus Pappe bzw. Draht von Polarisationsfilter und Lichtwelle (vgl. Abb. 10)
- 3D-Brille (je ein Klassensatz): rot-cyan (Kostenpunkt: 0,35€/Stk.); mit linearen Polarisationsfiltern (0,90€/Stk.);  
 Bezugsquelle der 3D-Brillen: <http://www.3d-brillen.de> (Stand: 14.06.2016)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Warum das Thema „(Laser-)Licht“?</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Fachliche Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Aufbau und Funktionsweise eines Lasers . . . . .	5
2.2	Polarisation . . . . .	6
2.2.1	Lineare Polarisation . . . . .	6
2.2.2	Unpolarisierte elektromagnetische Wellen . . . . .	7
2.2.3	3D-Effekt: Farbanaglyphenverfahren und Polarisation . . . . .	7
2.3	Räumliche und zeitliche Kohärenz . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Übersicht über die Unterrichtssequenz</b>	<b>11</b>
3.1	Erste Stunde: Aufbau und Funktionsweise eines Lasers . . . . .	11
3.2	Zweite Stunde: Kohärenz als Bedingung für Interferenz . . . . .	13
3.3	Dritte Stunde: Polarisation von Licht . . . . .	16
<b>Anhang</b>		<b>19</b>
A.1	Erste Stunde: Hefteintrag, Arbeitsblätter, Präsentation . . . . .	19
A.2	Zweite Stunde: Hefteintrag, Arbeitsblatt, Plakat, Präsentation . . . . .	25
A.3	Dritte Stunde: Hefteintrag, Präsentation . . . . .	30
	<b>Literatur und Medien</b>	<b>33</b>

# 1 Warum das Thema „(Laser-)Licht“?

Sowohl aus der Industrie als auch aus unserem Alltag sind Laser nicht mehr wegzudenken. In der Schule kommt der Laser jedoch nur dann zum Einsatz, wenn einfarbiges, gebündeltes und kohärentes Licht für Versuche (z.B. Doppelspaltversuch von Young) benötigt wird. Der Laser selbst wird meist nur als „Black Box“ eingeführt und auf seinen Aufbau und seine Funktionsweise nicht näher eingegangen. Der Grund dafür ist einerseits wohl die große Komplexität, die dahintersteckt, und andererseits, dass seine Behandlung lediglich zu den fakultativen Inhalten des Lehrplans zählt.

**Entwicklungsgeschichte** Im Mai 1960 gelang es dem Team um den US-amerikanischen Physiker Theodore H. Maiman (1927-2007) erstmals, einen (Rubin-)Laser zum Leuchten zu bringen. Der erste Laser<sup>1</sup> war geboren!

Der Wissenschaftspublizist Prof. Dr. Ernst Peter Fischer konstatierte in einem 2010 erschienenen Artikel [Fis10] zum 50. Geburtstag des Lasers, dass die Zeit für seine Entdeckung reif war. Die grundlegende Voraussetzung dafür schuf Albert Einstein 1917 mit der Entdeckung der stimulierten Emission. Über den Grund, warum es dennoch über vier Jahrzehnte bis zur Entdeckung des Lasers gedauert hat, vertritt Fischer die Ansicht, dass sich die neue Theorie von Quantenübergängen, auf der das Funktionsprinzip eines Lasers fußt, erst in den Köpfen der Physiker verankern musste.

„Jetzt haben wir eine Lösung, die nach ihrem Problem sucht.“ ([Fis10, S. 220]) Mit diesen Worten wird ein Assistent Maimans zitiert, nachdem es ihnen 1960 gelungen war, einen kohärenten Lichtstrahl zu erzeugen. Dieser Satz verdeutlicht, dass den Forschern die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten dieses neuen Werkzeugs zunächst nicht klar waren. Heute - über ein halbes Jahrhundert später - ist der Laser nicht mehr wegzudenken: Während er in der Industrie Metalle und andere Werkstoffe mit höchster Präzision schneidet, ist die Korrektur einer Fehlsichtigkeit bekannte Beispiele aus der Medizin. Auch im Alltag haben Laser einen festen Platz: So bei der Datenübertragung in Glasfaserkabeln oder schlichtweg an Supermarktkassen. (vgl. [Fis10, S. 226])

**Zielsetzung und Nutzen für Schüler** Da Licht folglich „[a]ls Grundlage technischer Entwicklungen in Medizin, Arbeitswelt, (...) Kommunikation, usw. (...) maßgeblich das Leben eines jeden Einzelnen“ ([Sta]) beeinflusst, wird das Thema der Unterrichtseinheit dem Selbstverständnis des Fachs Physik gerecht.

Die Unterrichtssequenz soll den Schülern<sup>2</sup> einen Einblick in die Photonik gewähren, ihnen neben der Funktionsweise eines einfachen Lasers die wesentlichen Eigenschaften dieses Lichts vermitteln und die Polarisation von Licht behandeln. Um den Schülern geeignete Schülerversuche mit (Laser-)Licht zu ermöglichen, bildet eine Exkursion in das Schülerlabor *PhotonLab* den Abschluss der Unterrichtssequenz. Dort können Schüler in Kleingruppen selbstständig an Versuchen zur Photonik arbeiten. Ferner gewährt ihnen eine Laborführung Einblick in die dortige Forschungsarbeit.

---

<sup>1</sup>Das Wort Laser ist ein Akronym für „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ (zu Deutsch: „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung.“)

<sup>2</sup>Aus Platzgründen wird „Schüler“ statt „Schülerinnen und Schüler“ geschrieben.

## 2 Fachliche Grundlagen

Aufgrund der fachlichen Komplexität des Themas wird an dieser Stelle der Aufbau und die Funktionsweise eines einfachen Lasers näher erörtert und auf die Kohärenz und die Polarisation als Eigenschaften des (Laser-)Lichts eingegangen. Eine didaktische Reduktion ist im Unterricht dennoch unumgänglich.

### 2.1 Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

Die fachlichen Inhalte dieses Abschnitts sind [Dem10, S. 219f, 255ff, 271ff] entnommen.

*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ist die Bedeutung des Akronymes LASER und, wie der Name schon sagt, ist die stimulierte Emission eines Photons das grundlegende Prinzip eines Lasers. Im Gegensatz zum Licht herkömmlicher Lichtquellen (Glühbirne, Sonne, etc.) ist Laserlicht intensiv, gebündelt, nahezu monochromatisch<sup>3</sup> und kohärent (siehe Abschnitt 2.3).

Die drei Hauptbestandteile sind das aktive Medium (oder Lasermedium), die Energiepumpe und der Resonator (vgl. Abb. 1).

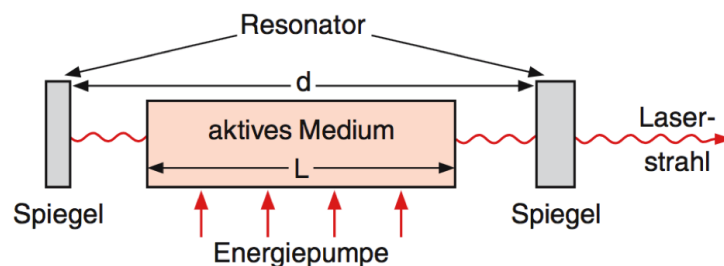


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lasers (aus [Dem10])

Im *aktiven Medium* wird das Laserlicht erzeugt. Das Lasermedium kann in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen, was die Einteilung in Festkörper-, Flüssig- und Gaslaser erklärt. Durch stimulierte Emission eines Photons entsteht dort das monochromatische Laserlicht, das gebündelt durch einen teildurchlässigen Spiegel austritt. Im Bohrschen Atommodell wird die stimulierte Emission durch Übergang von einem höherenergetischen Zustand  $E_j$  in einen niederenergetischen Zustand  $E_i$  erklärt: Trifft ein Photon, dessen Energie  $E_{Ph}$  gleich der Energiedifferenz  $\Delta E_{ji} = E_j - E_i$  ist, auf ein Atom im Energiezustand  $E_j$ , so fällt dieses in den Energiezustand  $E_i$  zurück und sendet dabei ein weiteres Photon gleicher Richtung, Energie und Phasenlage aus. Aufgrund der Vielzahl der möglichen, diskret verteilten Energiezustände eines Atoms sind daher zahlreiche Übergänge möglich. Jedoch ist nicht jeder Übergang gleich wahrscheinlich. Ob daher eine stimulierte Emission stattfindet, hängt unter anderem von der Zahl  $N_j$  der Atome im Zustand  $E_j$  und von dessen Lebensdauer  $\tau_j$  ab. Die stimulierte Emission findet im *aktiven Medium* (oder *Lasermedium*) statt. Unter der Annahme, dass im Lasermedium Besetzungsinversion vorliegt, d.h. dass sich der überwiegende Teil der Atome des Lasermediums im energetisch angeregten

<sup>3</sup>Licht, das ausschließlich aus einer Wellenlänge bzw. einer Frequenz besteht, heißt *monochromatisch*. Im sichtbaren Bereich spricht man hier auch von *einfarbigem* Licht (vgl. [Wik16b]).

Zustand befindet, ist die Wahrscheinlichkeit der stimulierten Emission groß gegenüber der der stimulierten Absorption und die Photonenzahl wächst lawinenartig an. Für den Betrieb eines Lasers gilt es nun, eine solche Besetzungsinversion herzustellen. Eine Anregung eines Atoms im Lasermedium ausschließlich durch Absorption eines Photons ist nicht praktikabel, da in diesem Fall die Photonenzahl zeitlich konstant bliebe. Aus diesem Grund muss es einen weiteren Mechanismus geben, der von außen die gewünschte Besetzungsinversion im Lasermedium herstellt. In Form von Licht, Strom, etc. führt die *Energiepumpe* dem Lasermedium Energie zu, die die darin enthaltenen Atome in den energetisch angeregten Zustand befördert.

Um die Bündelung des Laserlichts zu gewährleisten, sollen im Lasermedium nur die Photonen bestimmter Wellenlänge und Richtung verstärkt werden. Dafür sorgt der *Resonator*, dessen Länge  $d$  ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des Photons ist und an dessen Seiten zwei Spiegel angebracht sind. Dabei ist einer der Spiegel teildurchlässig und ein kleiner Teil der Strahlung verlässt den Resonator gebündelt als Laserstrahl.

## 2.2 Polarisation

Die nachfolgenden Inhalte orientieren sich an [Dem13, S. 192ff].

Im Wellenmodell kann Licht als ebene elektromagnetische Transversalwelle mit einem elektrischen und einem magnetischen Feldanteil beschrieben werden, deren Frequenz  $f$  im sichtbaren Bereich liegt und die sich mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  ausbreitet. Beide Feldanteile schwingen dabei senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Im Folgenden betrachten wir eine Lichtwelle der Wellenlänge  $\lambda := \frac{c}{f}$ . Das entsprechende elektrische und das magnetische Feld müssen die Maxwell-Gleichungen im strom- und ladungsfreien Raum erfüllen. Der Einfachheit halber wird im Folgenden eine periodische, ebene Welle betrachtet, die sich in  $z$ -Richtung ausbreitet und deren elektrischer Feldvektor  $\vec{E}$  und deren magnetischer Feldvektor  $\vec{B}$  senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung stehen. In diesem Fall schwingen der magnetische und der elektrische Feldanteil in Phase und stehen wiederum aufeinander senkrecht. Mit der Wellenzahl  $k := \frac{2\pi}{\lambda}$  und der Kreisfrequenz  $\omega := 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda}$  gilt

$$\vec{E}(t, z) = \vec{E}_0(t) \cdot \cos(kz - \omega t), \quad (2.1)$$

wobei  $\vec{E}_0(t) = (E_{0,x}(t) \ E_{0,y}(t) \ 0)^T \in \mathbb{R}^3$  für jede Zeit  $t$  ist. Je nach Eigenschaft des Vektors  $\vec{E}_0$  kann Licht entweder linear, zirkular oder elliptisch polarisiert oder sogar unpolarisiert sein. Aus Platzgründen sei für die Definitionen von zirkular und elliptisch polarisiertem Licht auf [Dem13, S. 195] verwiesen.

### 2.2.1 Lineare Polarisation

Die durch (2.1) beschriebene elektromagnetische Welle heißt *linear polarisiert*, wenn der Vektor  $\vec{E}_0 := \vec{E}_0(t)$  zeitlich konstant ist. Da dieser zudem stets senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung  $\vec{e}_z$  steht, gilt

$$\vec{E}_0 = E_{0,x}\vec{e}_x + E_{0,y}\vec{e}_y.$$

Wir sagen, dass die  $x$ - und die  $y$ -Komponente der Welle *in Phase* schwingen (vgl. Abb. 2).

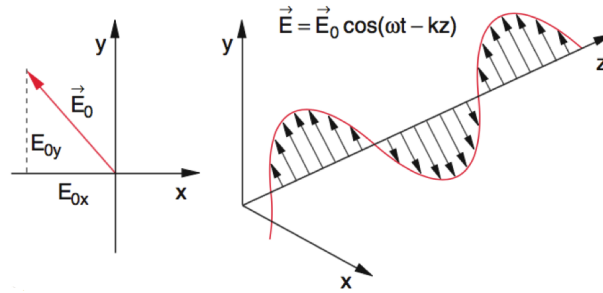
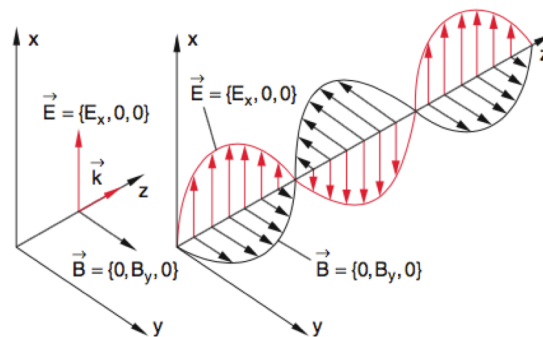


Abbildung 2: Linear polarisiertes Licht (aus [Dem13])

Für den Fall, dass die Schwingungsrichtungen mit den Koordinatenachsen zusammenfallen, sind die Anteile des elektrischen Felds  $\vec{E}$  und des magnetischen Felds  $\vec{B}$  in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3:  $\vec{E}$ - und  $\vec{B}$ -Feld bei linear polarisiertem Licht (aus [Dem13])

## 2.2.2 Unpolarisierte elektromagnetische Wellen

Schließlich heißt eine elektromagnetische Welle *unpolarisiert*, sofern für die Schwingungsrichtung Vektors  $\vec{E}_0$  keine besondere Einschränkung vorliegt.

## 2.2.3 3D-Effekt: Farbanaglyphenverfahren und Polarisation

Bedingt durch den Augenabstand nehmen die Augen des Menschen verschiedene Bilder der Umgebung wahr. Im Gehirn, das diese zu einem Bild zusammensetzt, entsteht dadurch der 3D-Effekt (vgl. Abb. 4).

Das Farbanaglyphenverfahren und die Polarisation sind zwei verschiedene Methoden, um bei Bildern bzw. Videos einen 3D-Effekt beim Betrachter zu erzeugen. Ein Farbanaglyphenbild besteht aus zwei komplementär eingefärbten, überlagerten Teilbildern (vgl. Abb. 5), die aus zwei verschiedenen Positionen aufgenommen wurden, deren Abstand gleich dem Augenabstand ist. Da bei diesem Verfahren die Farben zur Trennung der Bilder verwendet werden, ist die Farbwiedergabe schlecht. Sie wird heute kaum mehr verwendet (vgl. [Unba]).

Mittels Polarisation können Farben hingegen exakt wiedergegeben werden. Bei diesem Verfahren werden von Projektoren zwei linear polarisierte Bilder, deren Polarisationsrichtungen senkrecht

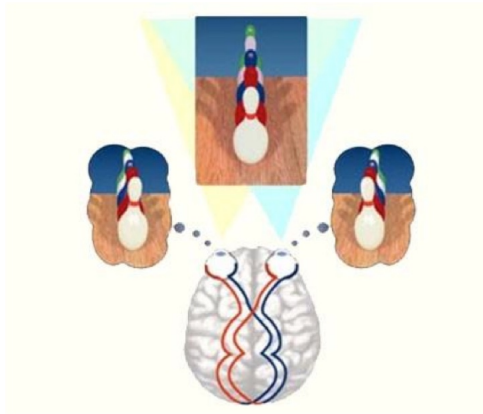


Abbildung 4: Funktionsweise des 3D-Sehens (aus [Unba])



Abbildung 5: Farbanaglyphenbild (rot/cyan, roter Filter rechts) (aus [Wik17])

aufeinander stehen, auf eine metallisch beschichtete Leinwand geschickt. Durch eine Polarisationsbrille, die aus zwei linearen, ebenfalls senkrecht aufeinander stehenden Polarisationsfiltern besteht, wird gewährleistet, dass jedes Auge das richtige Bild erhält. Dreht hingegen der Betrachter seinen Kopf auch nur leicht zur Seite, so ist die Bildtrennung nicht mehr gegeben und der 3D-Effekt verschwindet (vgl. [Wik16a]).

Ein anderes 3D-Verfahren, bei dem der Kopf gedreht werden darf und mit dem auch Farben exakt wiedergegeben werden, benötigt zirkular polarisiertes Licht. Das bekannte RealD-3D-System, das in vielen deutschen Kinos zum Einsatz kommt, basiert auf dieser Funktionsweise (vgl. [Wik16c]).

## 2.3 Räumliche und zeitliche Kohärenz

Schickt man Laserlicht auf einen Doppelspalt, so erscheint am Schirm ein zeitlich stabiles Interferenzmuster (vgl. [Wil99, S. 301]). Bisher wurde im Unterricht diese Interferenzfähigkeit des Laserlichts als gegeben angesehen und nicht weiter hinterfragt. Im Folgenden soll nun diese Eigenschaft des Laserlichts, die *Kohärenz*, von fachlicher Seite geklärt werden, wobei die folgenden Inhalte, sofern nicht anders gekennzeichnet, [Hec09, S. 510ff, 627ff, 635ff] entnommen sind. Eine Erläuterung zur didaktischen Reduktion und Umsetzung im Unterricht ist in Abschnitt 3.2 zu finden.

In Büchern findet man verschiedenste und z.T. auch fehlerhafte Erklärungen und Beschreibungen



der Kohärenz. Zwei dieser von Friedrich Herrmann in [Her] angeführten Beispiele sind:

„Zwei Erreger, die ein gleich bleibendes Interferenzmuster erzeugen, heißen kohärent. Dazu müssen sie mit gleicher Frequenz und fester Phasendifferenz schwingen.“

oder

„Da das spontan emittierte Licht eines heißen Körpers von einzelnen, voneinander unabhängigen Atomen ausgestrahlt wird, ist es ausgeschlossen, dass zwei verschiedene Lichtquellen zufällig die gleiche Schwingung ausführen, also kohärente Wellenzüge ausstrahlen.“

Während die erste Aussage die Kohärenz als eine Eigenschaft der Lichtquelle definiert, besagt die zweite Aussage, dass die Kohärenz eine Eigenschaft der Lichtwelle sei. Aufgrund dieser vielen unklaren und teilweise falschen Definitionen ist es nicht verwunderlich, dass die Kohärenz ein Teilgebiet der Physik ist, das oftmals wenig verstanden wird (vgl. [Her]).

Wegen der Linearität der Wellengleichung können sich in einem Raumpunkt zwei oder mehrere Wellen zu einer Welle überlagern (*Superpositionsprinzip*). Dabei kann die Intensität der resultierenden Welle höher (konstruktive Interferenz) oder niedriger (destruktive Interferenz) sein. Um eine zeitlich stabiles und deutlich erkennbares Interferenzmuster zu erhalten, müssen die Frequenzen bzw. Wellenlängen und die Amplituden der Teilwellen nahezu gleich sein. Im Folgenden wird an einem Punkt  $P$  die Überlagerung  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$  zweier linear polarisierter Wellen gleicher Frequenz  $\omega$  betrachtet, die von zwei Punktlichtquellen  $S_1$  und  $S_2$  ausgehen:

$$\vec{E}_1(t, \vec{r}) = \vec{E}_{01} \cdot \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \epsilon_1) \quad (2.2)$$

und

$$\vec{E}_2(t, \vec{r}) = \vec{E}_{02} \cdot \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \epsilon_2) \quad (2.3)$$

(vgl. Abb. 6). Dabei sei der Abstand  $a$  der Punktlichtquellen groß gegenüber der Wellenlänge  $\lambda$ .  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  bezeichne die Phasenverschiebung.

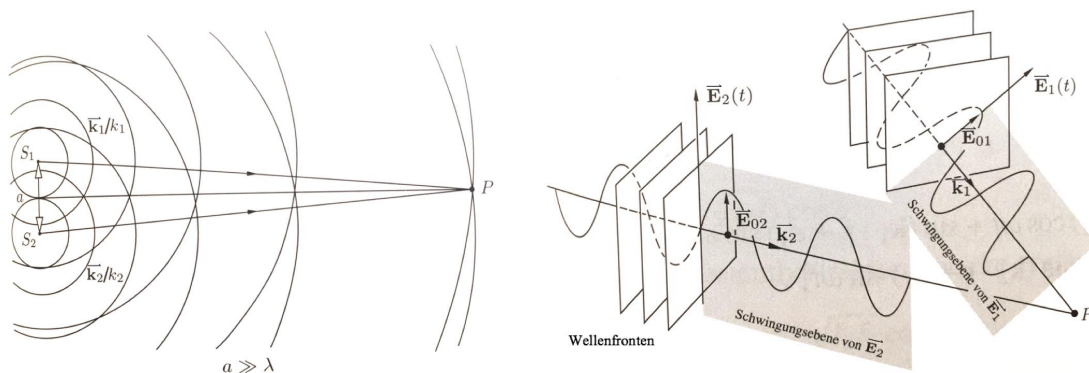


Abbildung 6: Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen im Punkt  $P$  (links: 2D-Ansicht, rechts: 3D-Ansicht) (aus [Hec09])

Die Intensität  $I$  am Punkt  $P$  ist als zeitlicher Mittelwert des Quadrats des elektrischen Feldes definiert und kann zu

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$$

vereinfacht werden, wobei  $\delta = \vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \epsilon_1 - \epsilon_2$  als *Phasendifferenz* bezeichnet wird. Um ein zeitlich stabiles Interferenzmuster zu erhalten, ist es nicht notwendig, dass die Lichtquellen phasengleich emittieren. Lediglich die Phasendifferenz muss konstant sein. Offensichtlich erfüllen zwei perfekt monochromatische Lichtquellen diese Bedingung stets. Da jedoch die Dauer  $\Delta t$  eines elektronischen Übergangs begrenzt ist, sind folglich auch die Lichtwellenzüge endlich. Wegen der Unschärferelation

$$\Delta f \cdot \Delta t \approx 1 \quad (2.4)$$

ist die Frequenzbandbreite  $\Delta f$  (vgl. Abb. 7) ebenfalls größer 0. Folglich besteht reales Licht stets aus einer Vielzahl von endlichen Wellenzügen, deren Frequenzen um einen Mittelwert gestreut sind. Die Zeitdauer, die sich aus (2.4) ergibt, heißt *Kohärenzdauer*  $t_c$ . Je größer  $t_c$ ,

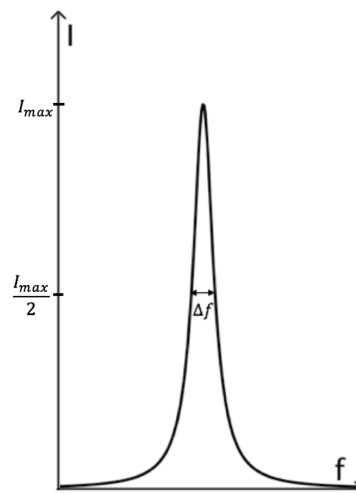


Abbildung 7: Frequenzbandbreite eines spektralen Übergangs

desto kohärenter ist das Licht. Die Kohärenzdauer ist also ein Maß für die **zeitliche Kohärenz**. Über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  kann ferner die *Kohärenzlänge*  $l_c := c \cdot t_c$  definiert werden. Diese gibt die maximale Distanz an, um die sich die Länge der Lichtwege der beiden Teilwellen unterscheiden dürfen, so dass am Punkt  $P$  noch Interferenz beobachtet werden kann. So beträgt die Kohärenzlänge für Tageslicht ca.  $0,3\text{mm}$ , wohingegen ein stabilisierter He-Ne-Laser bis zu  $400\text{m}$  erreichen kann. Diese kann experimentell z.B. mit einem Michelson-Interferometer bestimmt werden. Die Kohärenzdauer und -länge sind Maße für die zeitliche Kohärenz.

Thomas Young gelang es hingegen 1802 in seinem historischen Doppelspaltversuch lange vor der Entdeckung des Lasers nur mit Hilfe von Sonnenlicht, Interferenzerscheinungen am Doppelspalt zu beobachten. Dazu wird zunächst das zeitlich inkohärente Sonnenlicht durch einen Einfachspalt gebündelt und auf einen Doppelspalt geschickt. Die beiden entstandenen Teilwellen sind zeitlich immer noch inkohärent. Da jedoch beide derselben Primärquelle entstammen, ist deren Phasenbeziehung konstant und Interferenzeffekte konnten beobachtet werden. Diese zweite Art der Kohärenz wird als **räumliche Kohärenz** bezeichnet. Bei realen, ausgedehnten Lichtquellen ist die Phasenbeziehung zweier Lichtwellen, die von unterschiedlichen Orten der Lichtquelle ausgehen, in der Regel nicht konstant. Die räumliche Kohärenz ist nun umso größer, je geringer der Durchmesser der Lichtquelle ist. Punktlichtquellen sind maximal räumlich kohärent (vgl. [ZZ13, S. 176]).

# 3 Übersicht über die Unterrichtssequenz

## 3.1 Erste Stunde: Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

### Lernziele

Die Schüler

1. können die vier Eigenschaften des Laserlichts (einfarbig, intensiv, gebündelt, kohärent) nennen.
2. können das Prinzip der Lichtverstärkung beim Laser erklären.
3. können die wesentlichen Bestandteile eines Lasers nennen.

### Methodisch-didaktische Überlegungen

Lasers sind im Alltag der Schüler allgegenwärtig. Das Thema der Unterrichtsstunde kristallisiert sich schon aus wenigen Bildern (Lasershow, Metallbearbeitung, Augenlaser) heraus (vgl. Präsentation P1, Abschnitt A.1). Nach einer kurzen Vorstellung der Sequenz soll in der ersten Stunde nun anhand der Eigenschaften des Laserlichts die Funktionsweise eines einfachen Lasers erarbeitet werden.

Die Schüler betrachten zunächst das Laserlicht als Punkt auf einem Schirm. Im Anschluss daran werden sie aufgefordert, dies mit dem Sonnenlicht zu vergleichen und Eigenschaften des Laserlichts zu formulieren. Sie erkennen, dass das Licht gebündelt, intensiv und einfarbig (monochrom) ist. Die nicht erkennbare Kohärenz wird ihnen an dieser Stelle als vierte Eigenschaft mitgeteilt.

Mit Hilfe der Lichteigenschaften soll nun das Funktionsprinzip erarbeitet werden. Dazu bilden die Schüler Hypothesen, wie es zur Entstehung des einfarbigen Lichts im Innern des Lasers kommt, und vermuten, dass das Licht durch einen Energieübergang eines Atoms entstanden ist. Um das Vorwissen aus der 9. Jahrgangsstufe zu aktivieren, werden die Schüler nun aufgefordert, Begriffe, die ihnen dazu noch im Gedächtnis sind, in ein vorbereitetes Mindmap an der Nebentafel einzutragen. Nach einer kurzen Besprechung werden diese Inhalte in einem Arbeitsblatt (vgl. Arbeitsblatt AB1, Abschnitt A.1) gemeinsam zusammengetragen. Abschließend überlegen die Schüler zusammen mit ihrem Banknachbarn, welcher Prozess den Betrieb eines Lasers ermöglicht und welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit dieser Prozess vermehrt ablaufen kann. Im Plenum werden Antworten gesammelt und an der Tafel wird das Prinzip der Lichtverstärkung notiert. Nachdem nun das fundamentale Prinzip, auf dem die Funktionsweise eines Lasers basiert, geklärt ist, können die Schüler nun in eigenen Worten beschreiben, was ein Laser „tut“: *Lichterzeugung durch stimulierte Emission*. Das ist gerade die Bedeutung des Akronyms LASER.

Ausgehend vom Funktionsprinzip des Lasers wird im Lehrer-Schüler-Gespräch an der Tafel der Aufbau des Lasers beginnend beim Resonator erarbeitet. Zur Sicherung erklären sich die Schüler gegenseitig das Prinzip der Lichtverstärkung und beschreiben anschließend die Funktionsweise des Lasers anhand der Skizze. Der Partner soll dabei auf die Verwendung der Fachsprache, Korrektheit und Vollständigkeit achten. Zur Wiederholung und zur Festigung der Funktionsweise des Lasers

sollen die Schüler als Hausaufgabe anhand von Textbausteinen diese in ihr Heft notieren (vgl. Arbeitsblatt AB2, Abschnitt A.1).

Unterrichtsgeschehen	Organisation
<p><b>Motivation:</b> Den Schülern werden bildhaft Anwendungsbeispiele von Lasern gezeigt, um ihnen die große Bedeutung des Sequenzthemas bewusst zu machen.</p>	<p>UG, P1 TA</p>
<p><b>Überblick und geschichtlicher Hintergrund:</b> Nach einer kurzen Vorstellung des Sequenzverlaufs geht der Lehrer kurz auf die Entwicklungsgeschichte des Lasers ein.</p>	<p>LV, P1, TA</p>
<p><b>Hinführung zum neuen Lerninhalt:</b> Anhand des Laserstrahls werden die Eigenschaften des Laserlichts erarbeitet und an der Tafel festgehalten. Anschließend bilden die Schüler Hypothesen, wie es zu der Entstehung des Laserlichts kommt.</p>	<p>UG, Laser, TA</p>
<p><b>Aktivierung des Vorwissens:</b> Nach einer Begriffssammlung zum Thema „Absorption bzw. Emission eines Photons“ werden diese Inhalte in einem Arbeitsblatt festgehalten.</p>	<p>UG, AB1</p>
<p><b>Erarbeitung 1:</b> In Partnerarbeit bearbeiten die Schüler die Aufträge des Arbeitsblattes. Anschließend werden an der Tafel das Prinzip der Lichtverstärkung und die Bedeutung des Akronyms LASER notiert.</p>	<p>PA, UG, AB1 TA</p>
<p><b>Erarbeitung 2 und Sicherung 2:</b> Nun wird der Aufbau des Lasers beginnend beim Resonator erarbeitet. Die Schüler erklären sich gegenseitig das Prinzip der Lichtverstärkung und beschreiben anschließend die Funktionsweise des Lasers anhand der Skizze.</p>	<p>UG, TA PA</p>
<p><b>Stellung der Hausaufgabe:</b> Als Hausaufgabe sollen die Schüler anhand von Textbausteinen die Funktionsweise des Lasers ins Heft notieren. (<i>Lösungswort: PHOTONLAB</i>)</p>	<p>LV, AB2</p>

## 3.2 Zweite Stunde: Kohärenz als Bedingung für Interferenz

### Lernziele

Die Schüler

1. können die Kohärenz als die Lichteigenschaft definieren, die zur Erzeugung eines zeitlich stabilen Interferenzmusters benötigt wird.
2. können die beiden Kohärenzarten nennen und voneinander abgrenzen.
3. können aus der Halbwertsbreite eines Emissionsspektrums die zugehörige Kohärenzlänge berechnen.

### Methodisch-didaktische Überlegungen

Im Zentrum dieser Unterrichtsstunde steht die vierte Eigenschaft des Laserlichts, die *Kohärenz*. Wie in Abschnitt 2.3 erläutert wurde, ist zur fachlich korrekten Behandlung der Kohärenz die Phasendifferenz zwischen Teilwellen notwendig. Da dies jedoch die Anforderungen des Lehrplans bei Weitem übersteigt, ist eine geeignete Reduktion zwingend erforderlich.

Dabei habe ich mich für das von Friedrich Herrmann in [Her] präsentierte Pfeilkonzept entschieden. Um den Begriff der Phasendifferenz zu vermeiden, wird darin **zeitlich kohärentes Licht** mit spektral reinem Licht gleichgesetzt. Meines Erachtens ist diese Vereinfachung sinnvoll, da die zeitliche Kohärenz des Lichts umso größer ist, je kleiner die Frequenzbandbreite  $\Delta f$  ist. Bei monochromatischem Licht besteht diese lediglich aus einem Punkt. Zur Veranschaulichung werden hier die verschiedenen Wellenlängen durch verschiedenfarbige Pfeile visualisiert. **Räumlich kohärentes Licht** hingegen wird durch Lichtwellen gleicher Ausbreitungsrichtung dargestellt. In Abschnitt 2.3 wurde dargelegt, dass die räumliche Kohärenz umso größer ist, je geringer der Durchmesser der (ausgedehnten) Lichtquelle ist. Um die fachliche Bedeutung mit der didaktischen Reduktion in Einklang zu bringen, werden zwei Teilwellen betrachtet, die an einem Raumpunkt  $P$  interferieren und ihren Ursprung an zwei Stellen der ausgedehnten Lichtquelle haben. Je geringer nun der Durchmesser der Lichtquelle und je räumlich kohärenter damit das Licht ist, desto ähnlicher ist deren Ausbreitungsrichtung. Im Falle einer Punktlichtquelle sind die beiden Teilwellen parallel und das Licht ist am Punkt  $P$  maximal räumlich kohärent.

Am Anfang der Unterrichtsstunde steht eine kurze Rechenschaftsablage, bei der anhand eines Bildes Fragen zum Aufbau des Lasers und zur Funktion der Bestandteile gestellt werden (vgl. Präsentation P2, Abschnitt A.2). Dabei wird noch nicht erwartet, dass der Schüler dessen Funktionsweise exakt wiedergeben kann. Nach einer Verbesserung der Hausaufgabe wird das Beugungsbild eines Doppelspalts gezeigt (vgl. Präsentation P2, Abschnitt A.2). Anschließend wird wiederholt, welche Informationen (z.B. Wellenlänge  $\lambda$ , Spaltmittenabstand  $d$ ) aus einem Beugungsbild gewonnen werden können und die entsprechende Formel rekapituliert.

In einem ersten Experiment demonstriert die Lehrkraft, dass kein Beugungsbild sichtbar ist, wenn weißes Licht auf den Doppelspalt fällt. An dieser Stelle formuliert die Lehrkraft das Ziel der heutigen Stunde: Die Schüler sollen die Kohärenz als Eigenschaft des Lichts kennenlernen, die das Auftreten eines zeitlich stabilen Interferenzmusters garantiert. Ausgehend davon sollen die

Schüler nun Vermutungen anstellen, welche Bedingungen dazu erfüllt sein müssen. Hier wird die Einfarbigkeit des Lichts, jedoch noch nicht dessen Parallelität, als Antwort erwartet. Der Lehrer demonstriert via Geogebra (vgl. Abbildung 8), dass die Intensität, die aus der Überlagerung zweier Teilwellen resultiert, maximal ist, wenn diese dieselbe Wellenlänge besitzen. Doch auch weißes Licht kann unter gewissen Bedingungen Interferenz erzeugen, wie T. Young in seinem historischen Doppelspaltversuch nachwies (vgl. [Hec09, S. 640]). An einem weiteren Experiment (siehe [Wil99, S. 301f]) erkennen die Schüler, dass auch spektral unreines, aber paralleles Licht zeitlich stabile Interferenzeffekte erzeugen kann, sofern der Schirm weit genug vom Doppelspalt entfernt ist.

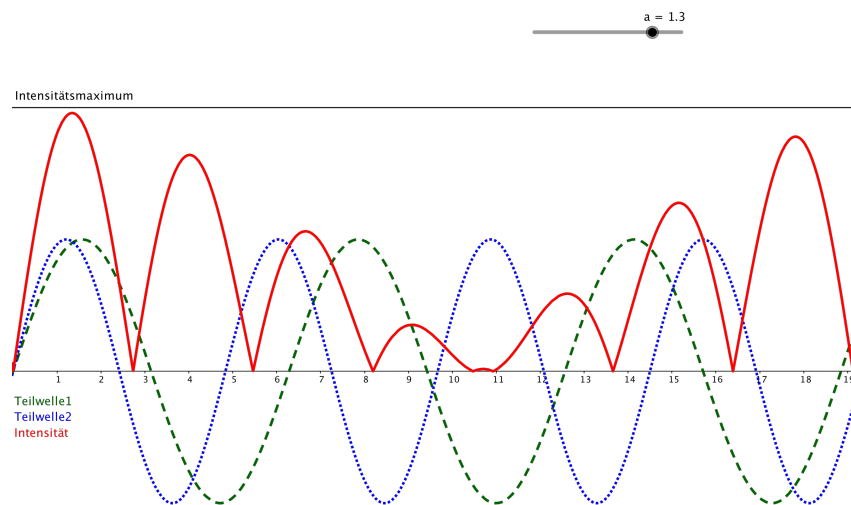


Abbildung 8: :  
Überlagerung zweier Teilwellen (Visualisierung mit Geogebra)

Nachdem die für Interferenz notwendige Bedingung, nämlich kohärentes Licht, festgehalten wurde, soll den Schülern die Gelegenheit gegeben werden, die Bedeutung der neuen Begriffe in Gruppen (7-10 min) einzuüben (vgl. Abbildung 9). Dazu bekommt jede Gruppe ein Plakat sowie verschieden farbige, bereits ausgeschnittene Pfeile (vgl. Abschnitt A.2; 5-6 Farben, ca. 10-15 Pfeile pro Farbe). Diese Darstellungsmöglichkeit soll den Schülern einen bildhaften Zugang zum Kohärenzbegriff gewähren, der ihnen anschaulich den Unterschied zwischen den Kohärenzarten aufzeigt.

Wegen der Unschärferelation existieren in der Realität keine perfekt monochromatischen Lichtquellen. Die spektrale Breite  $\Delta f$ , in der die Frequenzen des emittierten Lichts liegen, ist, auch bei Lasern, stets größer 0. Der Lehrer skizziert ein knappes Frequenzspektrum an die Tafel und erklärt damit den Begriff der spektralen Breite. Je niedriger diese ist, desto höher ist der Grad der Kohärenz und umso größer Kohärenzlänge. Um die Beobachtung der beiden Experimente zu erklären, berechnen die Schüler nun die Kohärenzlänge für das Licht eines Lasers und für weißes Licht. Damit wurde die Beobachtung vom Stundenanfang rechnerisch nachgewiesen: Aufgrund der sehr kurzen Kohärenzlänge können mit einer ausgedehnten, weißen Lichtquelle keine Interferenzeffekte beobachtet werden.

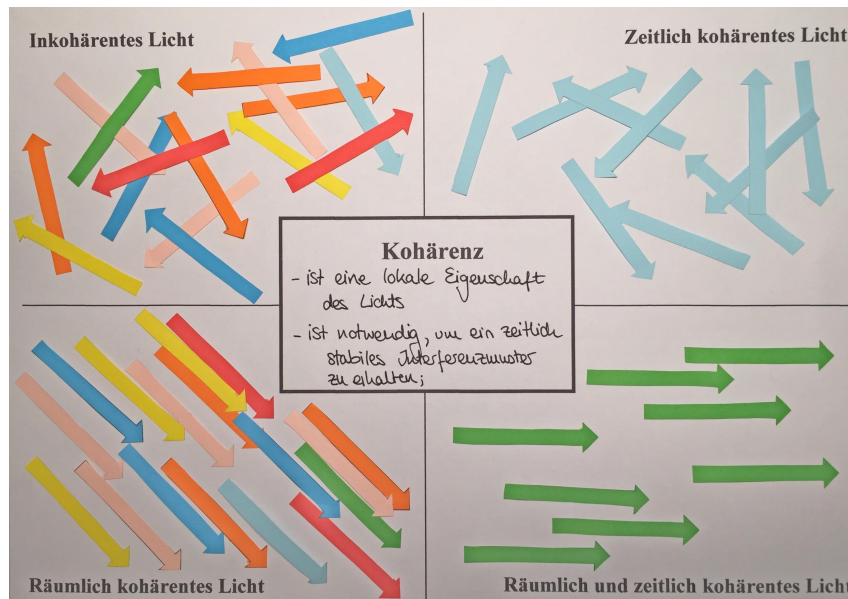


Abbildung 9: Visualisierung des Kohärenzbegriffs nach F. Herrmann

Unterrichtsgeschehen	Organisation
<p><b>Rechenschaftsablage und Verbesserung der Hausaufgabe:</b> Die Stunde beginnt mit einer Rechenschaftsablage zu den Eigenschaften des Laserlichts. Danach wird die Hausaufgabe verbessert.</p>	RA, P2 UG
<p><b>Erarbeitung:</b> In einem Experiment demonstriert die Lehrkraft, dass kein Beugungsbild sichtbar ist, wenn weißes Licht auf den Doppelspalt fällt. Eine Visualisierung mit Geogebra zeigt, dass Licht dazu einfarbig sein müsste. Durch ein weiteres Experiment erkennen die Schüler, dass auch spektral unreines, aber paralleles Licht zeitlich stabile Interferenzeffekte erzeugen kann.</p>	LE, UG, GGB
<p><b>Sicherung 1:</b> Nach einer Wiederholung wird kohärentes Licht als notwendige Bedingung für ein zeitlich stabiles Interferenzmuster festgehalten.</p>	UG, TA
<p><b>Erarbeitung und Sicherung 2:</b> In Gruppen vertiefen die Schüler ihr neu erworbenes Wissen. Dazu lesen sie zunächst AB3 und visualisieren diese dann durch bunte Pfeile auf dem Plakat. Im Anschluss daran stellen zwei Gruppen ihre Ergebnisse vor und die Kohärenzarten werden an der Tafel notiert.</p>	GA, AB3, Plakat, Pfeile, SP, TA
<p><b>Vertiefung:</b> Abschließend wird geklärt, warum es keine perfekt monochromatischen Lichtquellen gibt und die Schüler berechnen die Kohärenzlänge für das Licht eines Lasers und für weißes Licht.</p>	LV, TA, P2

### 3.3 Dritte Stunde: Polarisation von Licht

#### Lernziele

Die Schüler

1. können knapp beschreiben, wie der Eindruck des räumlichen Sehens im Gehirn entsteht.
2. können zwei Verfahren nennen, mit Hilfe derer räumliches Sehen realisierbar ist.
3. können erklären, warum durch zwei senkrecht aufeinander stehende Polarisationsfilter kein Licht durchgelassen wird.

#### Methodisch-didaktische Überlegungen

In dieser Stunde werden ein Klassensatz an 3D-Brillen mit Rot-Cyan-Filtern und ein Klassensatz an 3D-Brillen mit linearen Polfiltern benötigt. Ferner wurde im Vorfeld zur anschaulichen Erklärung der Polarisation ein Modell eines Polarisationsfilters aus Karton und einer Lichtwelle aus Draht gefertigt (vgl. Abbildung 10).

Am Anfang der Stunde steht eine kurze Rechenschaftsablage zur Kohärenz. Der Schüler soll zunächst erklären, welches Licht, Laserlicht oder das Licht einer Glühlampe, zur Bestimmung des Spaltmittenabstands eines Doppelspalts geeignet ist. Dann wird auf die beiden Kohärenzarten eingegangen und die Bedeutung der Kohärenzlänge geklärt.

In dieser Stunde wird die Polarisation als weitere Eigenschaft des Lichts behandelt. Diese wurde deshalb ausgewählt, da sie zum einen für die Durchführung und das Verständnis einiger Experimente (Polarimeter, Zuckerkonzentration in Cola, Quantenradierer, Quantenkryptographie, Musikübertragung mit dem Faraday-Effekt) im *PhotonLab* erforderlich ist und zum anderen die Funktionsweise vieler Dingen (Monitore, 3D-Technik bei Filmen, etc.) aus der Lebenswelt der Schüler darauf basiert.

Anhand eines Freihandexperiments (vgl. [SS16]) wird zum 3D-Sehen übergeleitet. Dazu strecken die Schüler ihren Daumen aus und schließen abwechselnd ein Auge. Durch das Hin- und Herspringen des Daumens erkennen die Schüler, dass die Bilder, die vom linken und vom rechten Auge wahrgenommen werden, verschieden sind. Das Gehirn setzt diese zu einem Bild zusammen und der räumliche Eindruck entsteht (vgl. Abschnitt 2.2.3). Um auch mittels Bilder oder Filmen den 3D-Effekt zu vermitteln, muss gewährleistet werden, dass beide Augen ein geeignetes Bild erhalten. Nach einer kurzen Abfrage des Vorwissens der Schüler über die gängige 3D-Technik, stellt der Lehrer zwei einfache Methoden vor, die auch im *PhotonLab* nachvollzogen werden können: das Farbanaglyphenverfahren und die Polarisation (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Nachdem die Schüler anhand eines Farbanaglyphenbilds die schlechte Farbwiedergabe erkannt haben, erklärt der Lehrer, dass ein besseres Verfahren existiert, das auf der Polarisation, einer weiteren Eigenschaft des Lichts, basiert. Zusammen mit ihrem Banknachbarn führen die Schüler mit der Polarisationsbrille kurze Freihandexperimente durch. Zuerst sollen die Schüler diese nur aufsetzen und ihre Beobachtung beschreiben. In einem zweiten Experiment sollen sie die Brille ihres Banknachbarn vor ein Auge halten und das andere Auge schließen. Anschließend soll die Brille langsam um die eigene Achse gedreht werden. Während beim ersten Experiment



eine Verdunklung der Umgebung beobachtet werden konnte, konnten im zweiten Experiment die Polarisationsfilter so angeordnet werden, dass kein Licht mehr ins Auge gelangt.

Die Schüler erkennen somit, dass die Polarisationsfilter das Licht 'ausrichten'. An dieser Stelle muss den Schülern mitgeteilt werden, dass Licht aus zwei überlagerten Wellen besteht: einer elektrischen und einer magnetischen Welle, die stets senkrecht zueinanderstehen. Mit Hilfe eines selbstgebauten Polarisationsfilters aus Karton und einem gebogenen Draht als Lichtwelle kann nun die Verdunklung der Umgebung durch den Polfilter erklärt werden. Der Polarisationsfilter lässt nur die Lichtanteile passieren, deren magnetisches Feld parallel zum Polarisationsfilter ausgerichtet ist (vgl. Abb. 10)

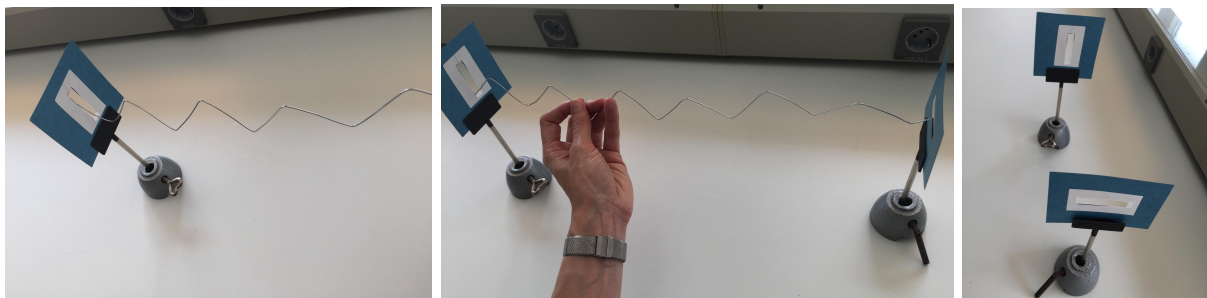


Abbildung 10: Visualisierung des magnetischen Feldanteils nach Durchgang durch einen Polfilter (links) bzw. durch zwei senkrecht zueinanderstehende Polfilter (Mitte, rechts)

Die Ergebnisse werden anschließend ins Heft übernommen. Den Hefteintrag ergänzen die Schüler mit einer Grafik, die den magnetischen Anteil zeigt und die ihnen aus Zeitgründen ausgeteilt wird.

Um auf das anfängliche Freihandexperiment zurückzukommen, sollen die Schüler nun versuchen, mit ihrem Wissen über Polarisation zu erklären, warum bei geeigneter Anordnung der Polarisationsfilter kein Licht durchkam. Zum Schluss der Stunde erklärt die Lehrkraft, dass die lineare Polarisation des Lichts und geeignete Filter nun dazu genutzt werden können, um 3D-Sehen zu ermöglichen. Dabei erhält jedes Auge ein geeignetes Bild. Da aber auch bei dieser Methode der Kopf nicht gedreht werden darf, wird heutzutage das bessere RealD-Verfahren, das auf zirkular polarisiertem Licht basiert, verwendet.

Unterrichtsgeschehen	Organisation
<p><b>Rechenschaftsablage:</b> Am Anfang der Stunde steht eine Rechenschaftsablage zur Kohärenz.</p>	RA, P3
<p><b>Motivation:</b> Anhand eines Freihandexperiments erkennen die Schüler, wie räumliches Sehen zustande kommt.</p>	SE, P3
<p><b>Erarbeitung:</b> Zur Visualisierung des 3D-Effekts durch das Farbanaglyphenverfahren betrachten die Schüler durch 3D-Brillen mit den Farbfiltern rot und cyan ein geeignetes Bild.</p>	P3, 3D-Brillen rot/cyan
<p><b>Überleitung und Motivation:</b> An dieser Stelle nennt der Lehrer das Polarisationsverfahren als weitere Methode, mit der die Farben exakt wiedergegeben werden können. Anhand zweier Freihandexperimente lernen die Schüler die Polarisation kennen</p>	P3, LV SE, 3D-Brillen (Polfilter)
<p><b>Sicherung:</b> Nun wird Licht als elektromagnetische Welle, die aus einem elektrischen und einem magnetischen Anteil besteht, definiert.</p>	LV, TA
<p><b>Erklärung des Freihandexperiments:</b> Anhand eines selbstgebauten Modells wird die Wirkungsweise eines Polarisationsfilters visualisiert und geklärt, bei welcher Ausrichtung der Polfilter kein Licht durchkommt. Die Ergebnisse werden im Heft festgehalten.</p>	UG, TA, Modell: Polfilter (Karton), Lichtwelle (Draht)
<p><b>Rückbezug zum 3D-Sehen:</b> Zum Schluss erklärt die Lehrkraft, dass linear polarisiertes Licht zum 3D-Sehen genutzt werden kann, und geht kurz auf das aktuelle Verfahren ein.</p>	LV

# Anhang

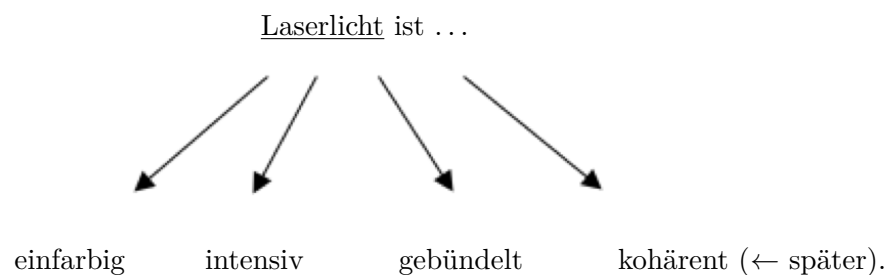
## A.1 Erste Stunde: Hefteintrag, Arbeitsblätter, Präsentation

### Hefteintrag zur ersten Stunde

#### Profilbereich: Laser und Licht

Historisches: A. Einstein (1914): Prinzip der Lichtverstärkung

Th. Maiman (1960): Erster funktionierender (Rubin-)Laser

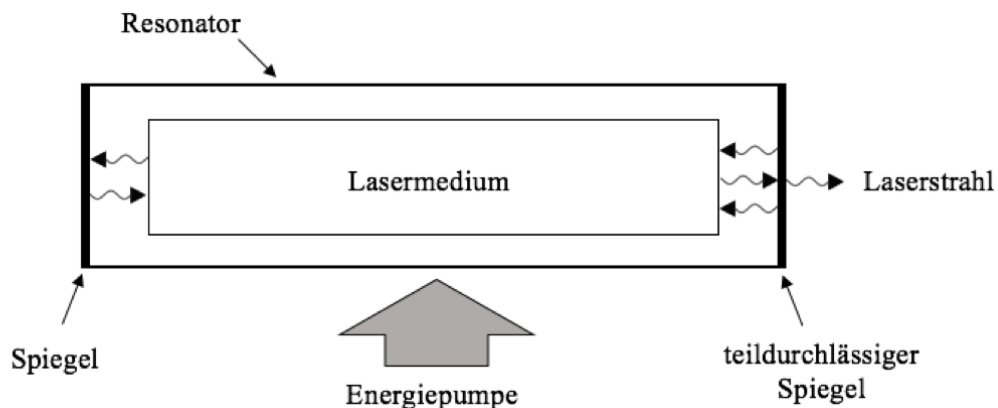


#### Prinzip der Lichtverstärkung:

Indem nur wenige Photonen auf eine Vielzahl von energetisch angeregten Atomen trifft, kann Licht durch stimulierte Emission verstärkt werden.  $\Rightarrow$  Lawinenartige Vergrößerung der Photonenzahl

$\Rightarrow$  LASER ist ein Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

#### a) Aufbau eines Lasers:



#### b) Funktionsweise eines Lasers:

Von außen wird dem Lasermedium Energie zugeführt (Laserpumpen). Dadurch werden Atome im Lasermedium angeregt. Bei der stimulierten Emission wird durch ein Photon die Aussendung eines weiteren Photons mit den gleichen Eigenschaften (Richtung, Wellenlänge, Phase) angeregt. ( $\Rightarrow$  Lichtverstärkung) Der Resonator sorgt dafür, dass die Verstärkung nur in einer bevorzugten Richtung erfolgt. Das garantiert die Bündelung des Laserlichts. Ein Teil des Lichts gelangt durch den teildurchlässigen Spiegel. ( $\Rightarrow$  Laserlicht)

## Arbeitsblatt 1: Energieaustausch zwischen Licht und Materie

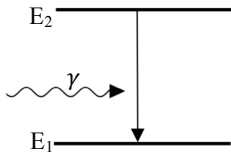
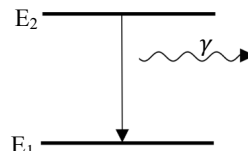
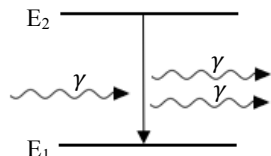
Profilbereich: Laserphysik

AB 1

### Wdh.: Energieaustausch zwischen Licht und Materie

Ein Atom kann \_\_\_\_\_ einnehmen und folglich Energie in Form von Licht nur \_\_\_\_\_ aufnehmen bzw. abgeben.

Wir unterscheiden drei Vorgänge:

<p><b>Absorption:</b></p> 	<p>Durch die _____ erhöht sich die Energie eines Atoms.</p>
<p><b>Spontane Emission:</b></p> 	<p>Ein Atom fällt spontan von einem _____ energetischen Zustand <math>E_2</math> in einen _____ energetischen Zustand <math>E_1</math> und sendet dabei ein Photon aus.</p>
<p><b>Stimulierte Emission:</b></p> 	<p>Die Absorption eines geeigneten Photons <math>\gamma</math> der Energie <math>E_{ph} = \underline{\hspace{2cm}}</math> kann zu einem Übergang des Atoms in einen _____ energetischen Zustand führen. Dabei werden _____ Photonen gleicher Art (_____, _____ und _____) ausgesandt. (<b>kohärente Photonen</b>)</p>

Für alle beteiligten Photonen gilt:

$$E_{ph} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Zurück zum Laser:

Auftrag: (Partnerarbeit)

- Überlegen und begründen Sie, welcher dieser Prozesse den Betrieb eines Lasers ermöglicht!  
*Tipp:* Denken Sie an die Eigenschaften von Laserlicht!
- Welcher Prozess sollte daher „vermehrt“ ablaufen? Und welche Voraussetzung muss dafür erfüllt sein?

## Arbeitsblatt 1: Energieaustausch zwischen Licht und Materie (Lösung)

Profilbereich: Laserphysik

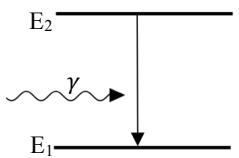
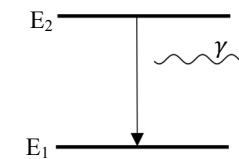
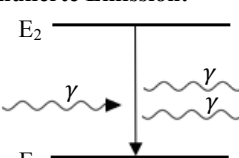
AB 1

### Lösung:

### Wdh.: Energieaustausch zwischen Licht und Materie

Ein Atom kann verschiedene diskrete Energiezustände einnehmen und folglich Energie in Form von Licht nur stufenartig aufnehmen bzw. abgeben.

Wir unterscheiden drei Vorgänge:

<p><b>Absorption:</b></p> 	<p>Durch die <u>Absorption eines Photons</u> erhöht sich die Energie eines Atoms.</p>
<p><b>Spontane Emission:</b></p> 	<p>Ein Atom fällt spontan von einem <u>höher</u> energetischen Zustand <math>E_2</math> in einen <u>nieder</u> energetischen Zustand <math>E_1</math> und sendet dabei ein Photon aus.</p>
<p><b>Stimulierte Emission:</b></p> 	<p>Die Absorption eines geeigneten Photons <math>\gamma</math> kann zu einem Übergang des Atoms in einen <u>höher</u> energetischen Zustand führen. Dabei werden <u>zwei</u> Photonen gleicher Art (<u>Richtung</u>, <u>Energie</u> und <u>Phasenlage</u>) ausgesandt. (<b>kohärente Photonen</b>)</p>

Für alle beteiligten Photonen gilt:

$$E_{ph} = \Delta E = E_2 - E_1$$

Zurück zum Laser:

Auftrag: (Partnerarbeit)

- Überlegen und begründen Sie, welcher dieser Prozesse den Betrieb eines Lasers ermöglicht!  
*Tipp:* Denken Sie an die Eigenschaften von Laserlicht!
- Welcher Prozess sollte daher „vermehrt“ ablaufen? Und welche Voraussetzung muss dafür erfüllt sein?

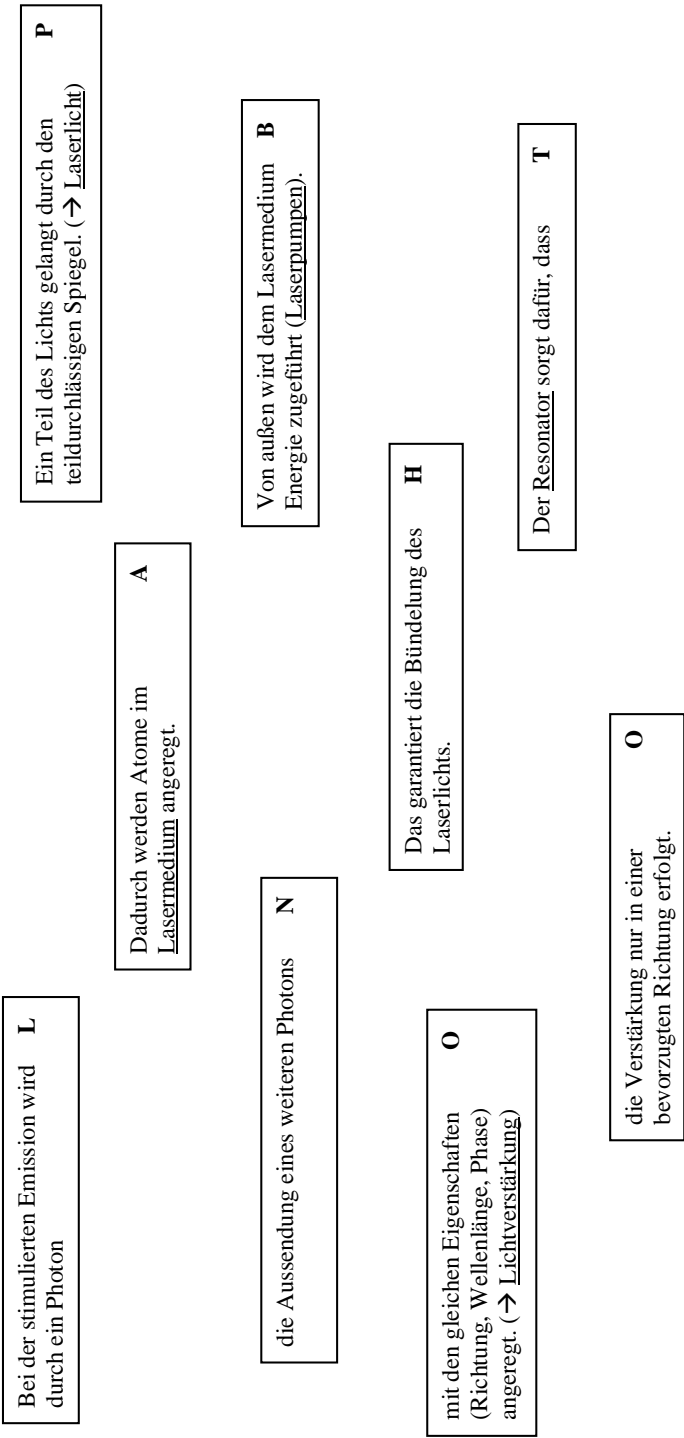
## Arbeitsblatt 2: Funktionsweise eines Lasers

AB 2

Profilbereich: Laserphysik

### Funktionsweise eines Lasers

Auftrag: Sie kennen bereits den Aufbau eines Lasers und die Eigenschaften von Laserlicht. Die genaue Funktionsweise eines Lasers werden Sie sich nun selbst erarbeiten! Bringen Sie dazu die nachfolgenden Textbausteine in die richtige Reihenfolge und übernehmen Sie den Text in Ihr Heft!  
(Zur Kontrolle: Die Buchstaben ergeben – rückwärts gelesen – ein Lösungswort.)



## Präsentation „1\_Einführung\_Laserphysik.pptx“

Folie 1:



### Laserphysik

Folie 2:

## Überblick

1. Stunde: **Aufbau und Funktionsweise eines Lasers**
2. Stunde: **Räumliche und zeitliche Kohärenz von Licht**
3. Stunde: **3D-Sehen: Farbanaglyphenverfahren und Polarisation**

----- Besuch des *PhotonsLabs* -----

Folie 3:

## Besuch des *PhotonLabs* in Garching



Quelle: <https://www.munich-photonics.de/de/technikschulbildung/schuelerlabor-photonlab/>

Quelle: <https://www.munich-photonics.de/de/technikschulbildung/schuelerlabor-photonlab/>

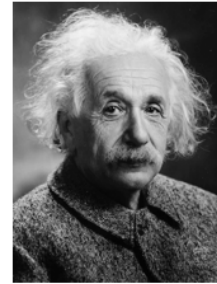
Folie 4:

## Laserphysik

### Historisches:

Albert Einstein (1916):

*Prinzip der Lichtverstärkung*



[Quelle: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Albert\\_Einstein\\_Ho4.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Albert_Einstein_Ho4.jpg)]

Folie 5:

## Laserphysik

### Historisches:

Theodore Maiman (1960):

*Erster funktionierender (Rubin-)Laser*



[Quelle: <http://www.ansark.co.uk/207996/technology/nuclear-waste-cancer-shoot-at-it-with-the-worlds-biggest-laser.html>]

Folie 6:

## Laserphysik

### Historisches:

Arthur Schawlow:

*„Der Laser ist auf der Suche nach einer  
Anwendung“*



[Quelle: <http://www.stanford.edu/news/1998/photos/schawlow200.jpg>]

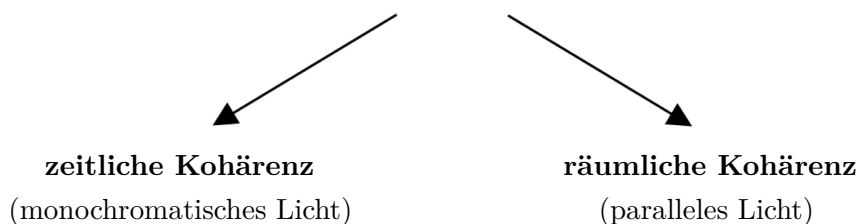


## A.2 Zweite Stunde: Hefteintrag, Arbeitsblatt, Plakat, Präsentation

### Hefteintrag zur zweiten Stunde

#### Kohärenz als notwendige Bedingung für Interferenz

**Kohärenz** als notwendige Voraussetzung, um zeitlich stabiles Interferenzmuster zu erhalten:

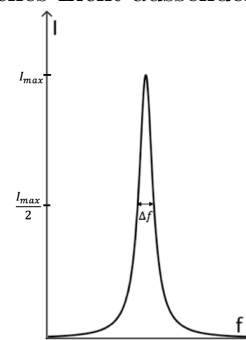


Interferenzeffekte sind umso deutlicher, je kohärenter das Licht ist.

In der Realität existieren keine Lichtquellen, die rein monochromatisches Licht aussenden.

⇒ Halbwertsbreite des Emissionsspektrums:  $\Delta f > 0$

⇒ Begrenzte Kohärenzlänge:  $\Delta l = \frac{c}{\Delta f}$



Beispiele:

- weißes Licht:  $\Delta f_W = 0,3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$   $\implies l_W = \frac{c}{\Delta f_W} = \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}} = 1 \mu\text{m}$
- Laser:  $\Delta f_L = 1,0 \cdot 10^9 \text{ Hz}$   $\implies l_L = \frac{c}{\Delta f_L} = \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,0 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 30 \text{ cm}$

## Arbeitsblatt 3: Kohärenz von Licht - Gruppenarbeit

Profilbereich: Laserphysik

AB 3

### Kohärenz von Licht - Gruppenarbeit

*Material (pro Gruppe):* 1 Bündel Pfeile, 1 vorbereitetes DIN A3 Poster

Auftrag:

1. **Lesen** Sie den nachfolgenden Text genau und versuchen Sie, die Kohärenzbegriffe **voneinander abzugrenzen**.
2. **Überlegen** Sie nun zusammen mit ihren Gruppenmitgliedern und **formulieren** Sie eine Beschreibung für die Kohärenz. **Notieren** Sie diese in die Mitte des Posters.
3. **Visualisieren** Sie anschließend mit Hilfe der farbigen Pfeile die verschiedenen Kohärenzarten in den Ecken des Posters.

„Zunächst zwei allgemeine Bemerkungen zum Kohärenzbegriff:

1. Mehr oder weniger ausgeprägte Kohärenz ist eine Eigenschaft des Lichts. Selbstverständlich verdankt das Licht seine Eigenschaften einer Lichtquelle. Das bedeutet aber nicht, dass die Kohärenz eine Eigenschaft der Quelle ist.
2. Kohärenz ist eine lokale Eigenschaft des Lichts. Das bedeutet, dass eine gegebene Lichtverteilung an einer Stelle kohärenter sein kann und im Allgemeinen auch ist, als an einer anderen. So ist das Licht, das ein Stern emittiert, unmittelbar über der Sternoberfläche räumlich maximal inkohärent, während es hier auf der Erde, also in einer großen Entfernung vom Stern, fast perfekt räumlich kohärent ist. [...]

Man kann die Kohärenz auf verschiedene Arten erklären. Sie manifestiert sich in jeder der Theorien, mit denen wir das Licht zu beschreiben pflegen, und das sind im Wesentlichen die geometrische Optik, die klassische Wellenoptik, die Thermodynamik und die Quantenelektrodynamik. [Wir wählen] die einfachste dieser Theorien: die geometrische Optik. [...]

Wir wollen das Licht in einem kleinen Raumbereich, direkt vor uns, beschreiben. Was für Lichtstrahlen durchkreuzen diesen Raumbereich? Wir betrachten vier besonders einfache Situationen.

Wir befinden uns im dichten Nebel. Unser Bereich wird von Lichtstrahlen aller Richtungen durchquert. Wir haben ein Lichtgemisch [sog. inkohärentes Licht], das Licht aller Spektralfarben enthält [...]. Als nächstes stellen wir uns vor, es sei Nacht, wieder herrsche dichter Nebel, und wir befinden uns unter einer Straßenlaterne, die spektral reines<sup>1</sup> Licht emittiert. Wieder kommt das Licht aus den verschiedensten Richtungen [...]. [Das entspricht gerade zeitlich kohärentem Licht.] Eine dritte Situation: Es sei Nacht, kein Nebel, kein Mondschein und keine Sterne. In sehr großer horizontaler Entfernung befindet sich eine Glühlampe. Alle Strahlen in unserem Raumbereich haben dieselbe Richtung, aber es ist Licht der verschiedensten Spektralfarben [...]. [Das entspricht gerade räumlich kohärentem Licht.] Schließlich dieselbe Situation wie eben, nur soll diesmal die Lampe spektral reines Licht

---

<sup>1</sup>[d.h. monochromatisches Licht]

Profilbereich: Laserphysik

AB 3

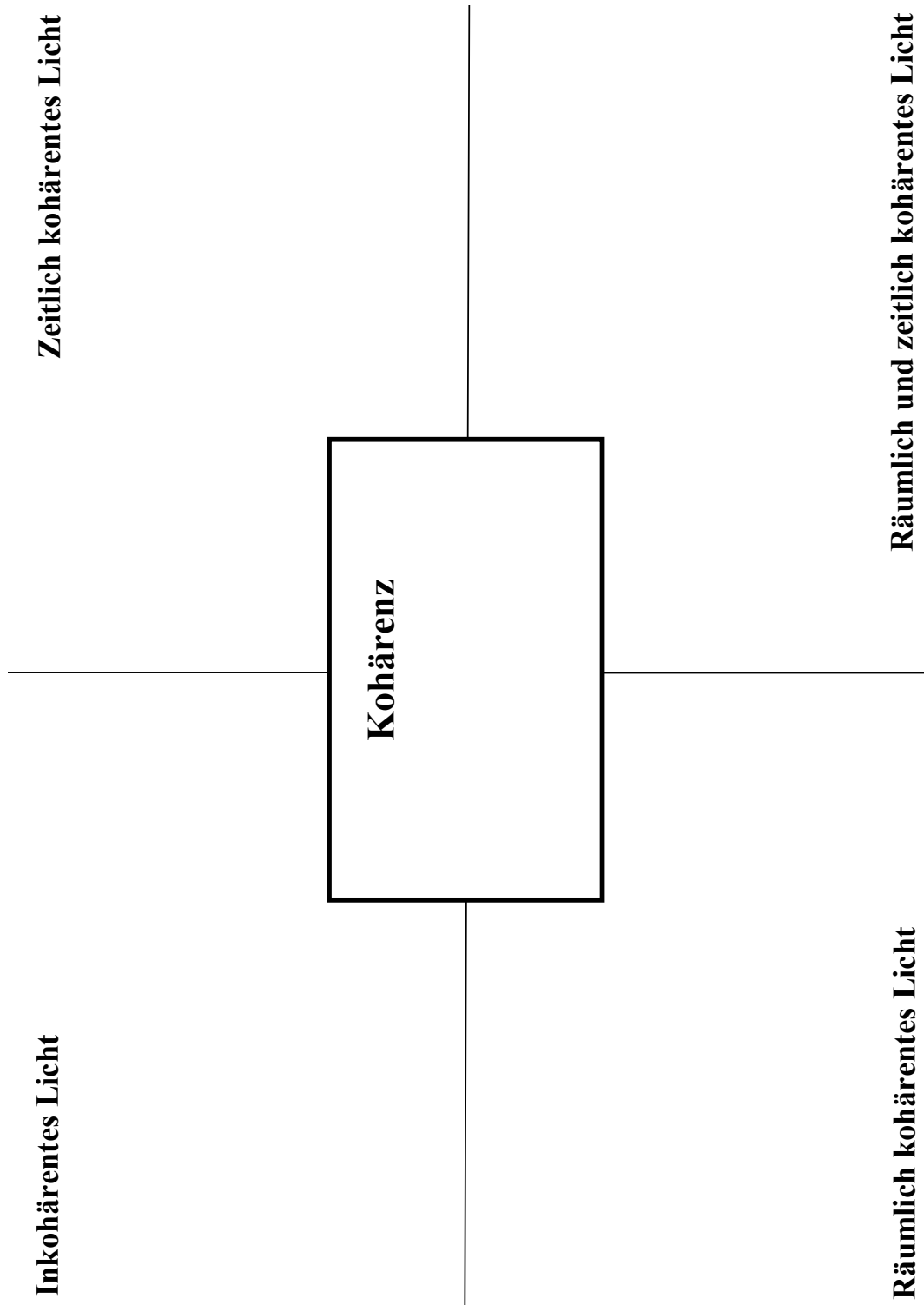
aussenden [...]. Alle Strahlen haben jetzt dieselbe Richtung, und das ganze Licht hat dieselbe reine Spektralfarbe. [Das entspricht gerade räumlich und zeitlich kohärentem Licht.]

[...] Hier noch ein Gleichnis [...]: Wir betrachten eine große Kiste mit vielen verschiedenen Äpfeln. Die Äpfel unterscheiden sich in zwei Eigenschaften: in der Größe und in der Farbe. Wir wollen die Äpfel sortieren. Wir beginnen damit, sie der Größe nach in 10 verschiedene Kartons einzuordnen, in jeden ein anderes Größenintervall. Die Äpfel sind jetzt, was das eine der beiden Ordnungskriterien betrifft, in jedem der Kartons einheitlich. Als nächstes ordnen wir die Äpfel jedes Kartons nach der Farbe, indem wir sie wieder auf je 10 verschiedene, kleinere Kartons aufteilen. Insgesamt haben wir nun 100 Kartons, und in jedem befinden sich Äpfel, die nach beiden Ordnungskriterien – Größe und Farbe – einheitlich sind.

Die Übereinstimmung zwischen Äpfeln und Licht geht noch weiter. So sieht man, dass man sich aus dem gemischten Apfelhaufen nur dadurch geordnete Apfelmengen beschaffen kann, dass man alle Äpfel, die nicht passen, aussortiert. Man kann ein Apfelmisch nicht in eine reine Apfelmenge verwandeln, genauso wie man inkohärentes Licht nicht in kohärentes verwandeln kann. [...] Man kann aber Apfelbäume züchten, die von vornherein nur eine Apfelsorte produzieren. Das Entsprechende geht beim Licht. Es gibt Lichtquellen, die von vornherein nur kohärentes Licht erzeugen, nämlich die Laser.“

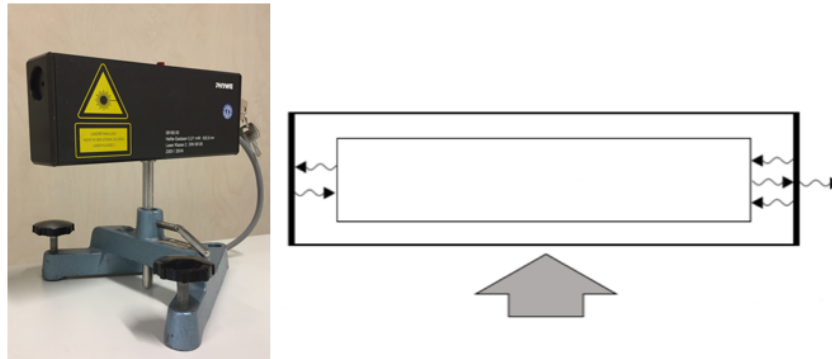
(aus: HERRMANN, F.: Altlasten der Physik (57): Die Kohärenz. – Online (Stand: 31.01.2017) auf <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/altlast/57.pdf>)

Plakat „Kohärenzarten\_Plakat.pdf“

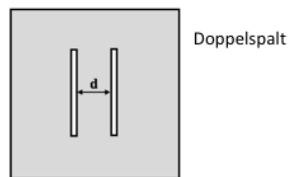


Präsentation „2\_Kohärenz.pptx“

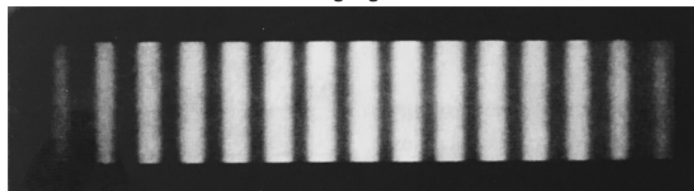
Folie 1:



Folie 2:

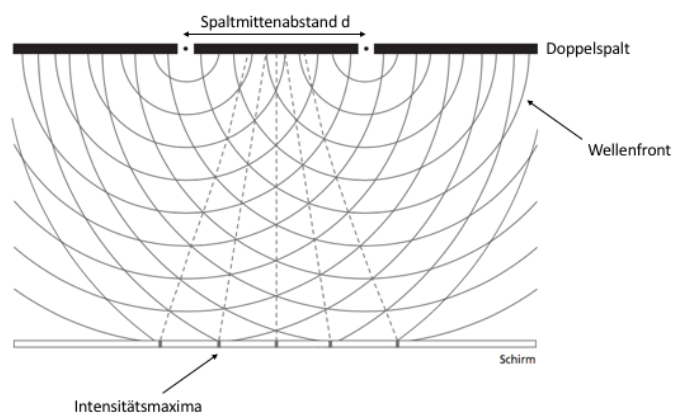


→ Beugungsbild:



(aus: HECHT, E.: *Optik*. 5. Aufl. Oldenbourg Verlag, München, 2009)

Folie 3:



(Bild aus: UNBEKANNTER VERFASSER: *Lehrmaterial "Physik 10"*, Gymnasium Bayern. DUDEN PAETEC Schulbuchverlag, Berlin; durch Beschriftungen ergänzt)

## A.3 Dritte Stunde: Hefteintrag, Präsentation

### Hefteintrag zur dritten Stunde

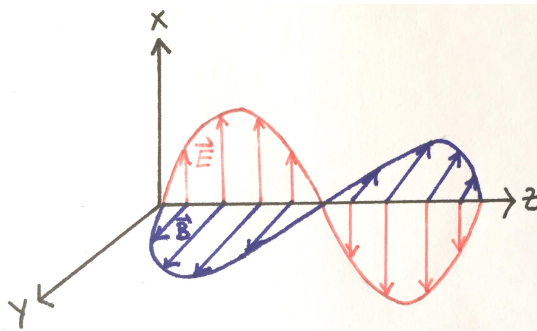
### Polarisation von Licht

Licht ist eine elektromagnetische Transversalwelle.

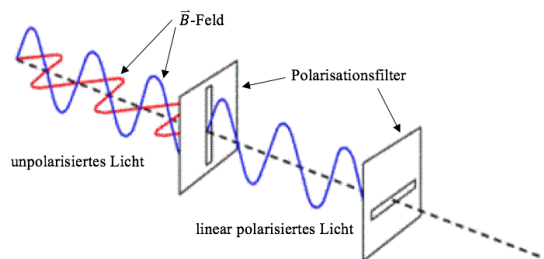
- besteht aus elektrischem Feld  $\vec{E}$  und magnetischem Feld  $\vec{B}$ ;
- $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (hier:  $z$ -Richtung).
- schwingen senkrecht zueinander;

Unterscheide:

- Unpolarisiertes Licht:  $\vec{E}$  hat keine definierte Schwingungsrichtung (Bspe. Sonnenlicht, Glühlampe).
- Linear polarisiertes Licht:  $\vec{E}$  schwingt in einer Richtung der  $x$ - $y$ -Ebene:



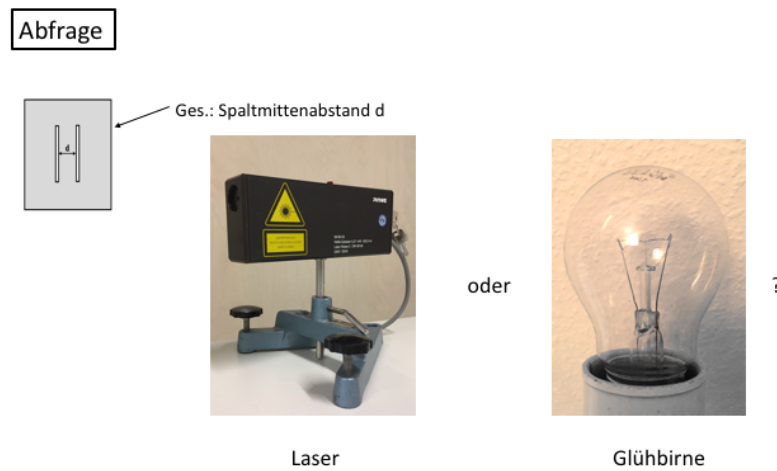
Ein Polarisationsfilter lässt nur die Lichtanteile passieren, deren magnetisches Feld parallel zur Achse des Filters schwingt. Unpolarisiertes Licht, das durch zwei senkrecht zueinander angeordnete Polarisationsfilter fällt, wird vollständig blockiert: <sup>4</sup>



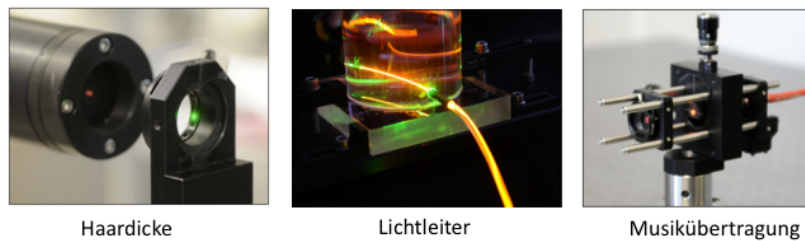
<sup>4</sup>Abbildung aus [Unbb]; durch Beschriftungen ergänzt

## Präsentation „3\_3D\_Polarisation.pptx“

Folie 1:



Folie 2:

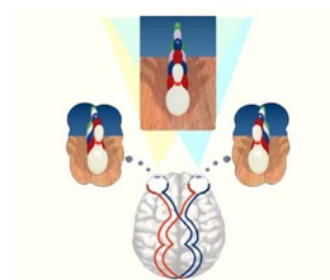
Lasereperimente im *PhotonLab*Bildquelle: STÄHLER-SCHÖPF, S.: *Anleitung im PhotonLab*.

Folie 3:

## 3D-Sehen

3D-Effekt:

Zusammensetzen des Bilds des  
linken Auges und das des rechten  
Auges zu einem Gesamtbild



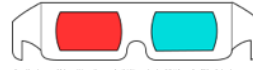
(Quelle: [http://www.fh-wildau.de/bruntha/Material/WV/Workshop\\_T12/3D-AnalogenZufunktionweise.html](http://www.fh-wildau.de/bruntha/Material/WV/Workshop_T12/3D-AnalogenZufunktionweise.html))

Folie 4:

### a) Farbanaglyphenverfahren



(Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Anaglyph\\_3D#/media/Datei:Lobencorn-3D.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D#/media/Datei:Lobencorn-3D.jpg))



Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Anaglyph\\_3D#/media/Datei:3d\\_glasses\\_red\\_cyan.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D#/media/Datei:3d_glasses_red_cyan.png)

→ Überlagerung  
komplementärfarbiger Bilder

Folie 5:

### b) Polarisation

#### Experiment:

1. Setze deine Polarisationsbrille auf und **beschreibe** deine Beobachtung!

*Führt Auftrag 2 nacheinander durch.*

2. Leih dir nun die Brille deines Banknachbarn und halte die vor deine Polarisationsbrille. Schließe nun ein Auge und drehe die Brille deines Nachbarn langsam um die eigene Achse. **Beschreibe** deine Beobachtung!



# Literatur und Medien

- [Dem10] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3*. 4. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Dem13] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2*. 6. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [Fis10] FISCHER, E. P.: Erhellende Entdeckung. Fünfzig Jahre Laser. In: *Physik in unserer Zeit* 41 (2010), Nr. 5, 220–226. <http://dx.doi.org/10.1002/piuz.201001245>. – DOI 10.1002/piuz.201001245. – ISSN 1521–3943
- [Hec09] HECHT, E.: *Optik*. 5. Aufl. Oldenbourg Verlag, 2009
- [Her] HERRMANN, F.: *Atlanten der Physik (57): Die Kohärenz*. – Online (Stand 31.01.2017) auf <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/atlant/57.pdf>
- [SS16] STÄHLER-SCHÖPF, S.: *Anleitung im PhotonLab*. 2016
- [Sta] STAATSINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND SCHULBILDUNG (HRSG.): *Lehrplan für das Gymnasium in Bayern (G8)*. – Online (Stand 06.09.2016) auf <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=1>,
- [Unba] UNBEKANNTER ERSTELLER: *3D Funktionsweise*. – Online (Stand 20.02.2017) auf [http://www.tfh-wildau.de/sbruntha/Material/VR/Websites\\_T12/3D-Anzeigen/3dfunctionsweise.html](http://www.tfh-wildau.de/sbruntha/Material/VR/Websites_T12/3D-Anzeigen/3dfunctionsweise.html)
- [Unbb] UNBEKANNTER ERSTELLER: *Wirkungsweise eines linearen Polarisationsfilters*. – Online (Stand 28.02.2017) auf [http://4.bp.blogspot.com/-81Cbr1PsAgU/VDwXFeB7SvI/AAAAAAAAACs/x\\_RKfsPyC94/s1600/polarisation.gif](http://4.bp.blogspot.com/-81Cbr1PsAgU/VDwXFeB7SvI/AAAAAAAAACs/x_RKfsPyC94/s1600/polarisation.gif)
- [Wik16a] WIKIPEDIA: *3D-Polarisationssystem* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. 2016. – Online (Stand 27.02.2017) auf <https://de.wikipedia.org/wiki/3D-Polarisationssystem>
- [Wik16b] WIKIPEDIA: *Monochromatisches Licht* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. 2016. – Online (Stand 26.01.2017) auf [https://de.wikipedia.org/wiki/Monochromatisches\\_Licht](https://de.wikipedia.org/wiki/Monochromatisches_Licht)
- [Wik16c] WIKIPEDIA: *RealD* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. 2016. – Online (Stand 27.02.2017) auf <https://de.wikipedia.org/wiki/RealD>
- [Wik17] WIKIPEDIA: *Anaglyph 3D* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. 2017. – Online (Stand 27.02.2017) auf [https://de.wikipedia.org/wiki/Anaglyph\\_3D](https://de.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D)
- [Wil99] WILKE, H.-J. (HRSG.) ET AL.: *Physikalische Schulexperimente (Band 2)*. 1. Aufl. Volk und Wissen Verlag, 1999
- [ZZ13] ZINTH, W. ; ZINTH, U.: *Optik*. 4. Aufl. Oldenbourg Verlag, 2013