

Grundlegende Experimente zur Natur des Lichts in einem Schülerlabor: geometrische Optik, Wellenoptik und Quantenoptik

Über die Natur des Lichts wurde historisch lange Zeit spekuliert und gestritten. Vor der Etablierung der ‚klassischen Physik‘ im 19. Jahrhundert existierten zwei Hypothesen: die Korpuskeltheorie von Newton und die Wellentheorie von Huygens, die sich anscheinend gegenseitig ausschlossen. Die Korpuskeltheorie erklärte zwanglos die ‚geometrische Optik‘, d.h. die geradlinige Ausbreitung von ‚Lichtstrahlen‘ und die optische Abbildung, während die Wellentheorie Beugungs- und Interferenzeffekte voraussagte. Diese Frage wurde im Jahr 1802 durch die Beobachtung der Interferenz im Doppelspaltexperiment von Thomas Young zugunsten der Wellentheorie entschieden. Mit der Formulierung der Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik (1861 -1864) und deren Bestätigung durch die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Heinrich Hertz 1886 schien die Natur des Lichts als elektromagnetische Welle endgültig geklärt zu sein.

Dies erwies sich allerdings als voreilig: die beobachteten Phänomene bei der Emission und Absorption von Licht ließen sich nicht im Rahmen der klassischen Physik erklären und waren der Auslöser zur Entwicklung der Quantenmechanik. Diese Entwicklung begann 1900 mit der Arbeit von Max Planck zur Erklärung der elektromagnetischen Abstrahlung eines schwarzen Körpers. Diese erforderte, dass Licht von einem schwarzen Strahler nur in einzelnen Quanten der Energie $E = h\nu$ absorbiert und emittiert wurde und damit die Einführung einer neuen Naturkonstante, des Planckschen Wirkungsquantums h . Den nächsten Schritt machte Albert Einstein, der 1905 die revolutionäre Hypothese aufstellte, dass Licht korpuskuläre Eigenschaften hat. Er postulierte, dass Licht aus Lichtquanten (Photonen) der Energie $E = h\nu$ besteht, die Energie und Impuls tragen und sich im freien Raum geradlinig ausbreiten. Dies stand im eklatanten Widerspruch zur experimentell bestens bestätigten Wellentheorie und wurde daher von seinen Zeitgenossen zuerst überwiegend abgelehnt. Die Einstein'sche Voraussage der Lichtquantenhypothese für den Photoeffekt (der Auslösung von Elektronen aus Metallen durch Licht) wurde 1915 von Andrew Millikan experimentell bestätigt. Dies wurde so interpretiert, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften hat, auch wenn wir heute wissen, dass der Photoeffekt alleine die Lichtquantenhypothese nicht beweisen kann. Für diese revolutionäre Erkenntnis bekam Albert Einstein den Nobelpreis. Der zweite Durchbruch zur Entwicklung der Quantenmechanik war die Entdeckung der Wellennatur von Materie. Der Hypothese von de Broglie folgte die experimentelle Bestätigung durch die Beobachtung der Interferenz von Elektronen. In der Schule wird die Welleneigenschaft von Materie oft mit einem Experiment demonstriert wird, bei dem Elektronen in einer vielkristallinen Graphitschicht gebeugt werden und konzentrische Interferenzringe erzeugen.

Erstaunlicherweise dauerte es sehr lange, bis die Interferenz einzelner Photonen experimentell ohne jeden Zweifel nachgewiesen werden konnte. Dies gelang erst Grangier und Aspect 1986. Seither hat die Experimentiertechnik mit Photonen aber einen grossen Aufschwung genommen und wichtige grundlegende Eigenschaften von Quantensystemen wurden mit Hilfe der Quantenoptik gemessen und grundlegende Vorhersagen der Quantenmechanik verifiziert insbesondere deren ‚Nichtlokalität‘. Photonen eignen sich hierzu viel besser als Teilchen wie z.B. Elektronen oder Atome, da sie mit der Umwelt nur sehr schwach wechselwirken und damit ihre bei der Erzeugung bestimmten Quanteneigenschaften lange behalten können. An der praktischen Anwendung und Nutzung der seltsamen Quanteneigenschaften der Photonen zur Quantenkommunikation und Quantencomputing arbeiten zur Zeit viele Forschungsgruppen.

Untersuchungen zur Natur des Lichts haben die Entwicklung der Physik also ganz entscheidend beeinflusst und auch für Anwendungen in Forschung und Technik stellt die ‚Optik‘ viele der wichtigsten Techniken zur Verfügung.

Die Beschäftigung mit den Experimenten im Schülerlabor zur Physik des Lichts von der geometrischen Optik über die Wellenoptik bis zur Quantenoptik soll den Schülern erlauben die wichtigsten grundlegenden Erkenntnisse und Weichenstellungen zur Natur des Lichts nachzuvollziehen. Wo immer möglich werden daneben auch wichtige Anwendungen demonstriert und diskutiert.

Experimente:

I Klassische Optik

1. Demonstrationsexperimente zur Geometrischen Optik:

Grundlegende Eigenschaften der geometrischen Optik und der optischen Abbildung sollten von der Schule her bekannt sein. Daher werden nur wenige Effekte in Aufbauten demonstriert, mit denen die Schüler spielen können

- Lichtstrahlennetz mit Alarm ...
- Brechung des Lichts mit Prisma (weiß → bunt → weiß)

2. Schülerexperiment: Beugungsbild und Ortsbild, Wellenoptik und die Grenzen der Auflösung

Hier werden die Schüler selbst experimentieren und grundlegende Eigenschaften der optischen Abbildung in der Wellenoptik kennen lernen

- die Gleichwertigkeit von Ortsbild und Beugungsbild und die klassische Unschärferelation
- die Grenzen der optischen Abbildung am Beispiel des Doppelspalts, Verifizierung der Abbe'schen Theorie der Auflösung
- 2-D Objekt Loch: Beugungsbild wie es auch z.B. von Sternen in Spiegelteleskopen erscheint.
- Die Manipulation des Beugungsbildes als Grundlage zur Bilderkennung und Analyse (Helligkeit, Kanten, Störungsbeseitigung (Filter), Hoch- und Tiefpass)

Dieses Experiment illustriert den Übergang von der geometrischen zur Wellenoptik und die Grenzen der Auflösung optischer Instrumente wie Mikroskop und astronomischem Teleskop.

Außerdem lässt sich danach auch die 3D Strukturanalyse durch Streuexperimente einfach diskutieren.

Schließlich hilft das Experiment auch zum besseren Verständnis der Quantenmechanik insbesondere der Heisenberg'schen Unschärferelation für Photonen.

3. Schülerexperiment Michelsoninterferometer: Präzisionsmessungen mit Interferometrie.

In diesem Experiment lernen die Schüler, wie die Wellenlänge von Licht präzise gemessen werden kann und wie bei bekannter Wellenlänge Längen präzise gemessen werden können. Mit einer kleinen Glühlampe oder schmalbandiger LED können Weißlichtinterferenzen erzeugt werden und durch Verschiebung eines Spiegels die Kohärenzlänge dieses Lichts gemessen werden (ca. 10 μm). Es erlaubt auch die Messung der Brechungsindizes von Gasen. Die Schüler beginnen den Versuch damit, den optischen Aufbau selber zu machen und zu justieren, wie er in modernen Experimenten üblich ist.

Schließlich ist dieses Experiment eine wichtige Vorstufe zum Experiment Interferenz einzelner Photonen und die Unteilbarkeit des Photons.
Die Diskussion des Michelson-Moreley Experiments bietet sich an, mit dem die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit unabhängig von einer Relativbewegung gezeigt wurde.

II Quantenoptik und Quantenmechanik

(Es ist noch nicht klar, ob dieser teil so realisiert werden kann).

4. Schülerexperiment: Interferenz einzelner Photonen mit einem Michelsoninterferometer

Nachweis der Interferenz einzelner Photonen und deren Unteilbarkeit. Der Einphotonzustand wird dabei erzeugt aus einem (verschränkten) Photonpaar durch Koinzidenz. Eine passende Zweiphotonquelle wird inzwischen kommerziell angeboten. Der Versuch wird zur Zeit für das Physikalische Anfängerpraktikum getestet. Sobald praktische eigene Erfahrungen vorliegen werden wir entscheiden, ob sich diese Experiment als Schülerversuch eignet.

5. Der Aufbau 4 erlaubt auch die Messung der Bell'schen Ungleichung und damit den Nachweis der Nichtlokalität der Quantenmechanik mit verschränkten Photonen. Dies ist weniger für das Schülerlabor interessant als für die Lehrerfortbildung.