

## Modulare Low-Cost Experimente zur Wellen- und Quantenoptik

Nils Haverkamp, Alexander Pusch, Stefan Heusler

Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster  
nils.haverkamp@uni-muenster.de

### Kurzfassung

In der Physikunterricht der Sekundarstufe II zeichnet sich ein Mangel an Experimenten ab, die von Lernenden durchgeführt werden können. In diesem Beitrag wird günstiges modulares Experimentiermaterial zur Wellen- und Quantenoptik vorgestellt, das nach didaktischen Kriterien für den Einsatz als Schülerexperiment entwickelt wurde. Mit dem Material lassen sich das Michelson Interferometer, das Mach-Zehnder Interferometer sowie ein Modell des Quantenradierers aufbauen und weitere Experimente zu Polarisierung durchführen.

Im Beitrag werden neben den Experimenten auch Arbeitsmaterialien vorgestellt, die zu den Experimenten erstellt wurden, und erste Tests des Materials und der Arbeitsmaterialien im Schulkontext beschrieben. Außerdem werden weitere Schritte zur Verbreitung, Implementation und Beforschung skizziert.

### 1. Einleitung

Experimente nehmen eine zentrale Rolle im Physikunterricht ein. In der Sekundarstufe I können viele der zentralen Experimente von den Schülerinnen und Schülern oder zumindest in Form von Demoexperimenten von den Lehrkräften durchgeführt werden. In der Sekundarstufe II sind aber viele der Experimente zu kompliziert, zu gefährlich oder einfach zu teuer, um als Schülerexperiment durchgeführt zu werden.

Typische Experimente, die aufgrund des Preises in Form von Animation, Simulationen oder Demoexperimenten durchgeführt werden, sich aber eigentlich auch als Schülerexperiment anbieten, sind Interferometer. Besonders das Michelson Interferometer ist in den meisten Kernlehrplänen verpflichtend enthalten und lässt sich gut in verschiedenen Themenbereichen integrieren. Es kostet aber bei Lehrmittelherstellern normalerweise mehrere Tausend Euro und ist außerdem in der verfügbaren Form aufwendig zu justieren.

In diesem Beitrag wird ein modulares System vorgestellt, mit dem sich mehrere Experimente, unter anderem das Michelson Interferometer, umsetzen lassen. Das System basiert auf 3D-Druck und kann dadurch auch günstig selbst hergestellt werden.

### 2. Modulares System und Designkriterien

Als Basis für das Experimentiermaterial dient eine gedruckte Basisplatte, in der Magnetkugeln eingelassen sind. Die optischen Komponenten werden in würfelförmigen Modulen befestigt. Diese werden an der Unterseite mit Schrauben zusammengehalten, die sich auf die Magnetkugeln setzen lassen.

Bei der Entwicklung der Experimente und des Begleitmaterials wurden verschiedene Designkriterien umgesetzt, die sich aus der Multimediatheorie ableiten lassen [1].

Diese Designkriterien werden nachfolgende kurz beschrieben:

### 2.1. Signalisierungsprinzip

Zur Umsetzung des Signalisierungsprinzips wurde mit einem Farbkonzept gearbeitet, das die Funktion einzelner Bestandteile signalisiert (Abb. 1). Dazu sind die einzelnen Würfel oben in Bronze und unten in Gold gehalten. So ist direkt erkennbar, auf welcher Seite des Würfels die Schrauben sind, die auf der Grundplatte halten.

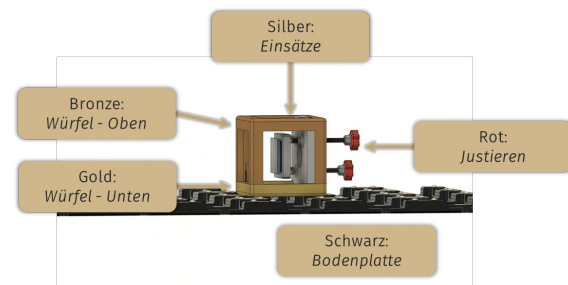


Abb.1: Farbsystem am Beispiel des Spiegelwürfels

Die individuellen Halterungen für die unterschiedlichen optischen Komponenten sind in Silber bzw. Grau gehalten und müssen für das Experimentieren nicht angefasst werden. Als Kontrast dazu sind diejenigen Komponenten, an denen justiert wird, rot markiert. Dies gilt beispielweise für die Schrauben, mit denen die Spiegel und die Laserdiode in zwei Achsen justiert werden können.

Dieses Farbsystem ist auch in den Anleitungen wiederzufinden, so dass die Abbildungen aus der Anleitung sich leicht in das Experiment übersetzen lassen.

### 2.2. Kohärenzprinzip

Zur Umsetzung des Kohärenzprinzips wurden die Komponenten beim Design soweit möglich auf die nötigen Details reduziert, um die Funktion der Bauteile in den Vordergrund zu stellen und direkt deutlich zu machen.

Außerdem wurden die Komponenten so gestaltet, dass nur eine Funktion in jedem Würfel umgesetzt ist. Dies dient neben der Umsetzung des Kohärenzprinzips auch einer stärkeren Modularität.

### 2.3. Segmentierungsprinzip

Die Umsetzung des Segmentierungsprinzips wird erst durch die Modularität des Aufbaus möglich. Das modulare System ermöglicht es, dass bei der Justage des Experiments zunächst nur einzelne Module auf das Gitter gesetzt und justiert werden. Dies wird in der Anleitung genutzt, um so bei der Justage die Einstellmöglichkeiten auf weniger Parameter zu reduzieren, die sich wesentlich leichter kontrollieren lassen.

## 3. Mögliche Experimente

Durch das modulare System lassen sich mehrere Experimente umsetzen, die für den Einsatz im Physikunterricht interessant sind. Dabei kann jeweils ein Teil der Module aus anderen Experimenten weiterverwendet werden.

Einige dieser Experimente werden nachfolgend vorgestellt:

### 3.1. Michelson Interferometer

Wie bereits in der Einleitung angedeutet, kann unter anderem ein Michelson Interferometer aufgebaut werden (Abb. 2). Verwendet werden eine Laserdiode, eine Linse, ein bedampfter Spiegel als Strahlteiler und zwei Vorderflächenspiegel. Alle optischen Komponenten sind günstig und bei deutschen Anbietern verfügbar.

Die Laserdiode wird einen separaten Batteriekasten angeschlossen, der mit einem beleuchteten Schalter deutlich zeigt, wenn die Spannungsversorgung aktiv ist. Das Interferenzmuster wird auf einem Schirm abgebildet.

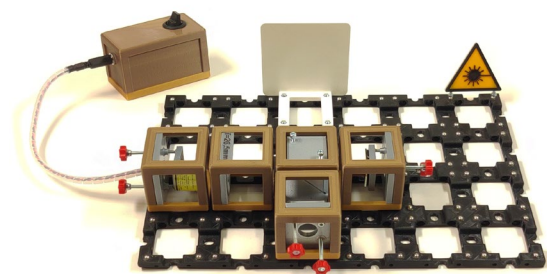


Abb.2: Michelson Interferometer

Ein beispielhaftes Interferenzmuster, das mit dem Michelson Interferometer erzeugt wurde, ist auf Abb.3 zu erkennen. Eingezeichnet ist dabei der Gangunterschied. Dieser ist jeweils ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge und unterscheidet sich für jeden Ring nach außen um genau eine Wellenlänge von dem nächstinneren Ring. Der Gangunterschied muss aber für den Fall des Michelson Interferometers - anders als beim Doppelspalt - nicht im Zentrum bei genau Null liegen.

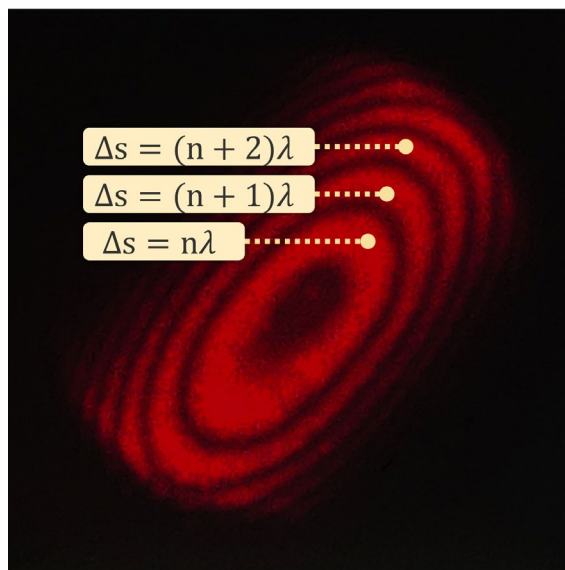


Abb.3: Interferenzmuster

### 3.2. Messen mit dem Michelson Interferometer

Es ist auch möglich mit dem Michelson Interferometer Messungen durchzuführen. Dazu wird einer der beiden Spiegel auf einem Piezoelement befestigt. Dieses dehnt sich aus oder zieht sich zusammen, wenn eine Spannung angelegt wird.

Die Bewegung des Spiegels lässt sich durch ein „Wandern“ der Ringe im Interferenzmuster nach Innen beobachten. Durch Zählen der Ringe lässt sich dann bestimmen, um welche Strecke das Piezoelement den Spiegel verschoben hat.

### 3.3. Mach-Zehnder-Interferometer

Für das Mach-Zehnder-Interferometer können die Laserdiode, die Linse, der Strahlteiler und der Schirm weiterverwendet werden. Die beiden Spiegel müssen durch Spiegel ersetzt werden, die im 45°-Winkel befestigt sind. Außerdem müssen ein zweiter Strahlteiler sowie ein zweiter Schirm ergänzt werden. Der fertige Aufbau ist auf Abbildung 4 zu sehen.

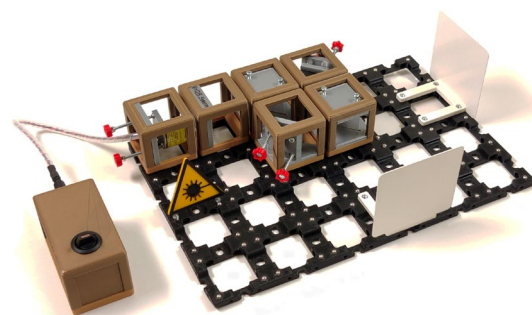


Abb.4: Mach-Zehnder-Interferometer

Im Gegensatz zum Michelson Interferometer sind beim Mach-Zehnder Interferometer beide Interferenzmuster gut sichtbar. Beim Michelson Interferometer entsteht eines der Interferenzmuster an der Position der Laserdiode und ist deshalb nicht sichtbar. Die beiden sichtbaren Interferenzmuster erlauben

einige spannende Beobachtungen, die beispielsweise in (Haverkamp et al., eingereicht) dargestellt sind.

### 3.4. Experimente zur Polarisation

Im Experimentiermaterial sind auch drehbare Polarisationsfilter enthalten. Diese ermöglichen es, verschiedene Experimente zum Thema Polarisation durchzuführen.

#### 3.4.1. Polarisation der Laserdiode

Indem ein Polarisationsfilter einfach hinter einer Laserdiode positioniert und gedreht wird, lassen sich erste qualitative Informationen über die Polarisation der Laserdiode erlangen. Die verwendeten Laserdioden haben einen starken linear polarisierten Anteil und einen leichten nicht polarisierten Anteil.

#### 3.4.2. Gesetz von Malus

Mit einer Kombination von zwei Polarisationsfiltern können Experimente zur Bestimmung des Gesetzes von Malus durchgeführt werden. Dazu wird der erste Polarisationsfilter hinter einer Lichtquelle (Laserdiode oder LED) auf eine feste Polarisation eingestellt. Der zweite Polarisationsfilter wird dahinter positioniert und langsam gedreht.

Weil aktuell noch kein Lichtsensor im Material integriert ist, lassen sich noch keine quantitativen Experimente durchführen. Ein entsprechendes Modul befindet sich zur Zeit in Entwicklung.

#### 3.4.3. Polarisation Drehen mit Polarisationsfiltern

Zwei Polarisationsfilter hintereinander, die um  $90^\circ$  gegeneinander verdreht sind, transmittieren i.A. kein Licht mehr. Wird aber ein dritter Polarisationsfilter zwischen diesen beiden Polarisationsfiltern positioniert, wird wieder ein Anteil des Lichts transmittiert, der sich aus dem Gesetz von Malus zu

$$I = I_0(\cos^2(45^\circ))^2 = 0,25I_0$$

ergibt. Die Polarisation des transmittierten Lichts ist um  $90^\circ$  gegen die Polarisation des einfallenden Lichts gedreht. Der transmittierte Anteil kann durch den Einsatz weiterer Polarisationsfilter vergrößert werden und ergibt sich allgemein für einen Gesamtdrehwinkel  $\alpha$  bei  $n$  Polfiltern, die jeweils um  $\alpha/n$  zueinander verdreht sind, zu

$$I = I_0(\cos^2(\alpha/n))^n.$$

### 3.5. Modell des Quantenradierers

Das Mach-Zehnder-Interferometer lässt sich durch Ergänzung einiger Polfilter zu einem Modell für den Quantenradierer erweitern (Abb.5).

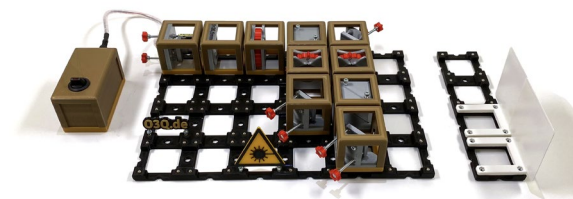


Abb.5: Modell des Quantenradierers

An dem Modell lässt sich die typische Beobachtung machen, dass kein Interferenzmuster mehr sichtbar ist, wenn in beiden Teilstrahlen Polfilter positioniert werden, die um  $90^\circ$  gegeneinander verdreht sind. Außerdem kann auch gezeigt werden, dass die Interferenzmuster wieder sichtbar werden, wenn Polfilter, die um  $45^\circ$  gegen die Filter beider Teilstrahlen gedreht sind, hinter den Ausgängen des Interferometers positioniert werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Phänomene ist beispielsweise in [2] zu finden.

### 4. Arbeitsmaterial

Das Arbeitsmaterial zu den Experimenten unterstützt bei der Justage und der Durchführung der Experimente. Kern des Arbeitsmaterials sind Abbildungen, die sich genau wie das Experimentiermaterial modular anordnen lassen, um beliebige Versuchsaufbauten zu erzeugen (Abb. 6). Auf diese Weise können Lehrende Arbeitsmaterial flexibel selbst für die eigenen Zwecke erstellen und anpassen. Beispielhafte Arbeitsblätter wurden bereits mit dem Workbookeditor Wunderbooks erstellt [3] und sind unter auf der Website des Projektes verfügbar [4].

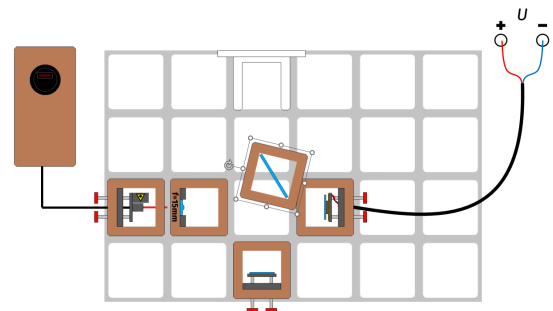


Abb.6: Modular angeordnete Abbildung.

Für die Abbildungen wurde wie in Abschnitt 2 beschrieben mit dem Signalisierungsprinzip gearbeitet.

### 5. Implementation der Materialien

Auf dem Weg zur Implementation der Materialien im Unterricht gilt es verschiedene Schritte zu bewältigen. Hierbei orientieren wir uns an dem Schema zur Implementation nach Sumfleth[5].

#### 5.1. Analyse der Ausgangslage

Die Ausgangslage charakterisiert den eigentlichen Bedarf an Innovation. In diesem Fall ergibt sich der Bedarf aus dem Mangel an didaktisch und preislich geeigneten Experimenten für den Einsatz in der Oberstufe. Ein wichtiger Rahmen ist außerdem durch die in den Bildungsstandards und den Kernlehrplänen formulierten experimentellen Kompetenzen und fachlichen Inhalte gegeben.

#### 5.2. Test im Schulkontext

Der Test im Schulkontext dient zur Verifikation, dass die Entwicklungen einen Mehrwert für die Schule haben können. Für das Michelson-Interferometer wurde ein solcher Test bereits durchgeführt. Dazu wurde in sechs Physikkursen eine jeweils 1,5-Stündige Unterrichtseinheit durchgeführt, in der die Schülerinnen

und Schüler in Kleingruppen mit dem Michelson-Interferometer experimentierten. Dabei füllten Sie das zugehörige Arbeitsmaterial aus. Anschließend wurden einige der Gruppen interviewt.

In die Auswertung wurden die ausgefüllten Arbeitsmaterialien und die Interviews einbezogen.

Bei der Auswertung ergab sich, dass alle Schülergruppen in der Lage waren, das Michelson Interferometer zu justieren und ein Interferenzmuster zu erzeugen. Ein großer Anteil der Gruppen konnten im zeitlichen Rahmen auch die Verschiebung des Interferenzmusters mit Hilfe des Piezoelements sichtbar machen. Schwierigkeiten hatten die Lernenden primär mit der zugehörigen Theorie. Die meisten SchülerInnen haben das Michelson-Interferometer erst in der Doppelstunde kennengelernt und konnten in den Arbeitsmaterialien grundlegende Aufgaben zur Funktion bearbeiten. Fehler traten dann häufiger bei den Rechnungen im Kontext der Messung mit dem Piezoelement auf. Hier liegt nahe, dass eine Sicherungsphase und ein längerer zeitlicher Rahmen für diese Schwierigkeiten verringern könnten.

### 5.3. Weitere Schritte auf dem Weg zu Implementation

Zur Implementation sind noch wichtige weitere Schritte zu gehen. Zunächst müssen auch zu den übrigen Experimenten Arbeitsmaterialien erstellt werden. Außerdem müssen die Experimente auch im Unterricht erprobt werden.

Darüber hinaus muss die Verfügbarkeit der Experimente gewährleistet werden. Theoretisch ist diese durch die Möglichkeit gegeben das Material selbst nachzubauen. Hier fehlen aber vielen Lehrkräften das Werkzeug (insb. ein 3D-Drucker) sowie die technischen Fertigkeiten (Löten, 3D-Drucker bedienen). Aus diesem Grund sind aktuell weitere Varianten in Planung. Dazu sollen einerseits Workshops angeboten werden, in denen die gedruckten Materialien bereits zu Verfügung gestellt werden und in denen die Lehrkräfte Unterstützung beim Bau erhalten. So können gleichzeitig nebenbei technische Kompetenzen erlernt werden. Außerdem wird das Material bereits in von einer Schülerfirma produziert (Link). Die jährliche Stückzahlen sind hier allerdings durch die Rahmenbedingungen stark begrenzt, so dass es sinnvoll ist sowohl die Möglichkeit zum Selbstbau als auch die Workshops zusätzlich anzubieten.

Neben der Verfügbarkeit der Experimente ist es außerdem wichtig, auch das nötige Fachwissen weiterzugeben. Aus diesem Grund ist es wichtig Infomaterialien zum Material bereitzustellen und Fortbildungen anzubieten.

### 6. Ausblick

Mit dem Experimentiermaterial, das in diesem Artikel vorgestellt wurde, lassen sich wichtige Phänomene der Wellen- und Quantenoptik veranschaulichen und gleichzeitig experimentelle Kompetenzen fördern. In einem ersten Test konnte gezeigt werden,

dass das Material für den Einsatz als Schülerexperiment geeignet ist.

Weil das modulare System sich für optische Experimente anbietet liegt es nahe, noch weitere Module zu integrieren. So wird beispielsweise ein Lichtsensor in Zukunft weitere quantitative Experimente ermöglichen.

Darüber hinaus ist eine weitere Erforschung der Implementation notwendig. Neben der Erprobung weitere Experimente im Unterrichtskontext sollen dazu auch Fortbildungen für Lehrkräfte entwickelt und beforscht werden. In diesem Kontext ist es dann auch interessant, welche technischen Kompetenzen für den Nachbau Lehrkräfte mitbringen.

### 7. Literatur

- [1] Mayer, R. E. & Fiorella, L. (2022). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (Cambridge Handbooks in Psychology) (3. Aufl.). Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] Haverkamp, Nils; Pusch, Alexander; Heusler, Stefan (angenommen): *Low-Cost Schülerexperimente zur Wellenoptik - ein modulares 3D-gedrucktes Experimentierset*. In: MNU-Journal
- [3] Heusler, Stefan: *Wunderbooks – WWU Münster*. <https://www.wunderbooks.de/> (Stand: 4/2023)
- [4] Heusler, Stefan: *Open<sup>3</sup> Quantum*. <https://o3q.de/> (Stand: 4/2023)
- [5] Sumfleth, E. (2017): *Diagnose – Intervention – Implementation im Spannungsfeld zwischen fachdidaktischer Forschung und unterrichtlicher Praxis*. In: Maurer, Christian: *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Zürich Regensburg: Universität Regensburg 2017, 827 S. - (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik; 37), S. 5-18  
Url: [http://schule.eiseler.net/richtlinie\\_gfs.pdf](http://schule.eiseler.net/richtlinie_gfs.pdf) (Stand: 4/2023)

### Hinweis auf Förderung durch das BMBF

Das Projekt Open<sup>3</sup> Quantum wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Maßnahme „Quantum aktiv – intuitive Outreachkonzepte für die Quantentechnologien“ gefördert.