



## Low-Cost Schülerexperimente zur Wellenoptik

### Ein modulares 3D-gedrucktes Experimentierset

NILS HAVERKAMP – ALEXANDER PUSCH – MARKUS GREGOR – STEFAN HEUSLER

In diesem Beitrag wird ein Low-Cost-Experimentierset aus dem 3D-Drucker vorgestellt, mit welchem u.a. ein Michelson-Interferometer für quantitative Messungen, ein Mach-Zehnder-Interferometer und auch weitere Experimente der Oberstufe modular als Schülerexperiment umgesetzt werden können.

#### 1 Experimentieren in der Oberstufe

In der Sekundarstufe I ist Physikunterricht oftmals dadurch geprägt, dass die Lernenden die Experimente selbst durchführen. Sie können so wichtige experimentelle Kompetenzen aufbauen, was einen wesentlichen Zugang zu physikalischer Erkenntnisgewinnung eröffnet. Die Sekundarstufe II ist zwar immer noch durch Experimente geprägt – aufgrund der komplexeren und meist auch teureren experimentellen Aufbauten werden allerdings oftmals Demonstrationsexperimente bzw. Animationen, Simulationen und Videos anstelle von Schülerexperimenten gezeigt. Für die Lernenden geht so aber ein Teil der Erfahrungen verloren, die in einem selbst durchgeführten Experiment gesammelt werden können. Das Zuschauen beschränkt die Erfahrungen auf optische und akustische Eindrücke. Haptische Rückmeldung und Eindrücke über das nötige Feingefühl während experimenteller Handlungen, etwa bei der Justage (moderner) optischer Experimente, werden so kaum vermittelt.

Im Feld der Wellenoptik sind Experimentalaufbauten in der Regel vor allem teuer und schwierig zu justieren. Ein Michelson-Interferometer z.B. ist auf Grund des hohen Preises kommerzieller Lehrmittelhersteller nicht in jeder Schule vorhanden und bei einem Anschaffungspreis von oft mehreren tausend Euro auch nicht einfach beschaffbar. Vor diesem Hintergrund

wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Ansätze entwickelt, um hier kostengünstige Alternativen anzubieten: 3D-gedruckte Aufbauten z.B. von SCHÜRMAN, 2020 oder BERNSTEIN, WILHELM & SCHMELING, 2020, Klemmbausteine z.B. von HAVERKAMP, HOLZ, UBBEN & PUSCH, 2020 oder frei stellbare Komponenten z.B. von VOLLMER & MOELLMANN, 2008.

In diesem Beitrag stellen wir das Low-Cost-Experimentierset des Projektes open3 quantum (<http://www.o3q.de>) aus dem 3D-Drucker vor, welches im Vergleich zu anderen Sets vor allem auf Modularität, Benutzbarkeit und auf die erzielbare Ergebnisqualität im Schülerversuch fokussiert.

#### 2 Das Konzept der modularen Würfel

Das Konzept des modularen Würfelsystems wurde ursprünglich am IPHT Leibniz Institut in Jena zum Aufbau von Mikroskopen entwickelt (DIEDERICH et al., 2020). Das System basiert auf Würfelgehäusen, in denen die optischen Komponenten befestigt werden. Diese Würfel lassen sich dann auf einem magnetischen Raster befestigen, das die nötige Fixierung beim Experimentieren gewährleistet und Flexibilität beim Aufbau ermöglicht, gleichzeitig aber auch Positionen für die einzelnen Module vorgibt, um die Komplexität zu verringern.

Für den Einsatz der Komponenten in der universitären und schulischen Lehre sowie auf Fortbildungen wurden die Komponenten durch uns überarbeitet, angepasst und zum Teil auch neu entwickelt (HAVERKAMP, PUSCH, HEUSLER & GREGOR, 2022). Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf eine möglichst einfache und intuitive Bedienung bei gleichzeitig möglichst guten, durch Schüler/innen reproduzierbaren experimentellen Ergebnissen gelegt. Ein weiterer Fokus war die Erweiterung auf eine Vielzahl von für die Schulpraxis relevanten Experimenten im Bereich der Wellen- und Quantenoptik.

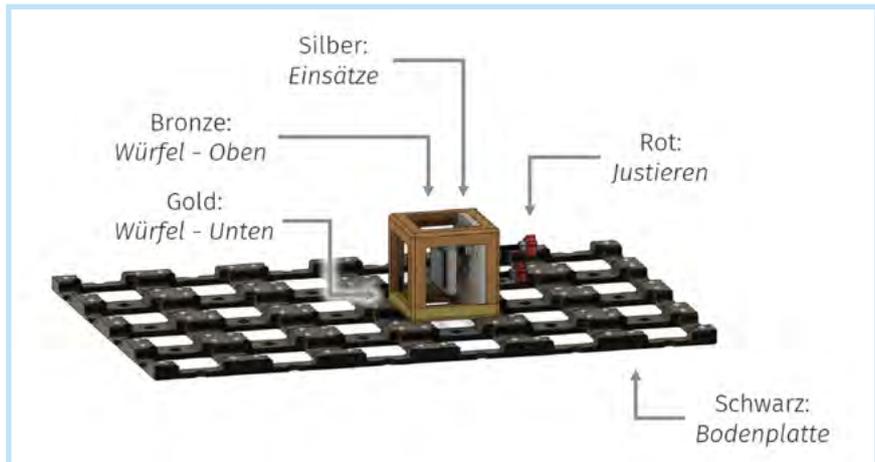


Abb. 1. Farbsystem des Experimentiersets

In Abbildung 1 ist exemplarisch eine Spiegel-Komponente aus dem Set dargestellt. Das entwickelte Farbschema der Würfel unterstützt beim Aufbau und der Durchführung der Experimente. Die Würfel werden mit der goldenen Seite nach unten auf ein magnetisches Raster (gedruckter Rahmen mit eingepressten Kugelmagneten) gesetzt und dort wackelfrei gehalten. An den bronzefarbenen Würfelgehäusen können die Komponenten angefasst und bewegt werden, die silbernen, innenliegenden Komponenten nehmen empfindliche optische Komponenten wie Linsen, Vorderflächenspiegel oder die Laserdiode auf und sollen nicht angefasst werden. An den rot markierten Schrauben können die Strahlengänge justiert werden. Durch das modulare Konzept können verschiedene Experimente durchgeführt werden, von denen einige nachfolgend beschrieben werden.

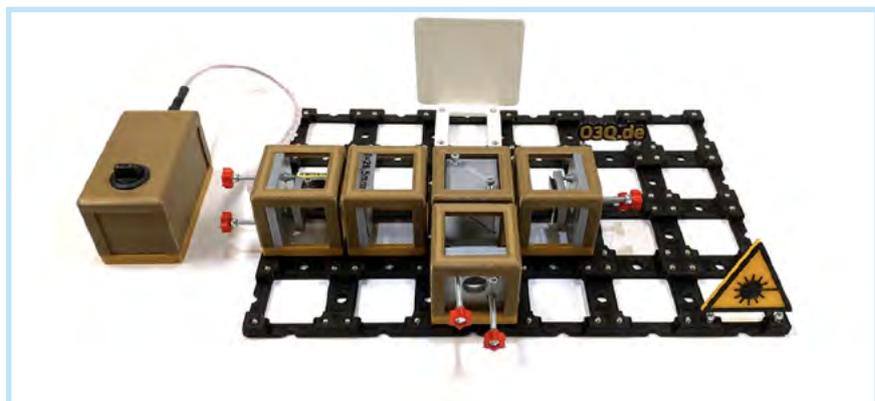


Abb. 2. Michelson-Interferometer

### 3 Michelson-Interferometer

Das Michelson-Interferometer ist eine klassische Anwendung der Interferenz von Lichtwellen. Aufgrund der hohen Relevanz für die historische und die moderne Physik ist es deutschlandweit in vielen Kernlehrplänen der Oberstufe als Teil der Themen Wellenoptik oder Relativitätstheorie enthalten (bspw. MSB NRW, 2022).

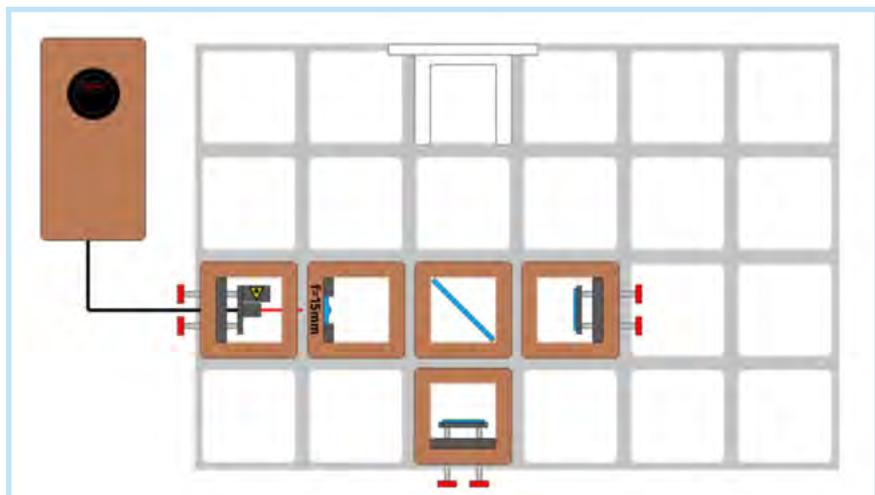


Abb. 3. Schematische Ansicht Michelson-Interferometer

#### 3.1 Theorie und Aufbau

Benötigt werden ein Laser als Lichtquelle, ein halbdurchlässiger Spiegel als Strahlteiler, zwei Vorderflächenspiegel und eine Linse (Abb. 2 und 3). Der Strahl wird durch den Strahlteiler (halbdurchlässigen Spiegel) aufgeteilt und zu den beiden Spiegeln gelenkt. Die Spiegel reflektieren den Lichtstrahl zurück auf den Strahlteiler. Ein Teil der Strahlintensität wird auf den Schirm projiziert und dort durch Justage des Lasers und

der beiden Spiegel zur Überlagerung und Interferenz gebracht. Die Linse wird im Bildungskontext in der Regel genutzt, damit sich durch die Aufweitung ein gut sichtbares Muster ergibt.

#### 3.2 Beobachtung und Erklärung

Mit dem Aufbau lassen sich zwei verschiedene Interferenzmuster erzeugen. Das hyperbolische Muster (Abb. 4, links) tritt für bestimmte, sehr symmetrische Konstellationen der Spiegel

und des Strahlteilers auf, die in dem gezeigten Aufbau durch die gleichbleibenden Rasterabstände und die präzise Ausrichtung der Würfel entstehen. Stört man diese Symmetrie, indem entweder einer der Vorderflächenspiegel etwas vom Strahlteiler entfernt wird, sodass sich die Differenz der Teilstrahlenwege ändert (z.B. durch Herausdrehen der Halteschraube um eine Umdrehung und Anpassen der beiden Stellschrauben) oder indem der Strahlteiler in einem leicht abweichenden Winkel von  $45^\circ$  montiert wird, tritt das typische Ringmuster (Abb. 4, rechts) auf. Dieses haben wir in dem Set durch den Einsatz eines entsprechenden Würfels, in dem der Strahlteiler in einem Winkel von  $44,5^\circ$  gehalten wird, realisiert.

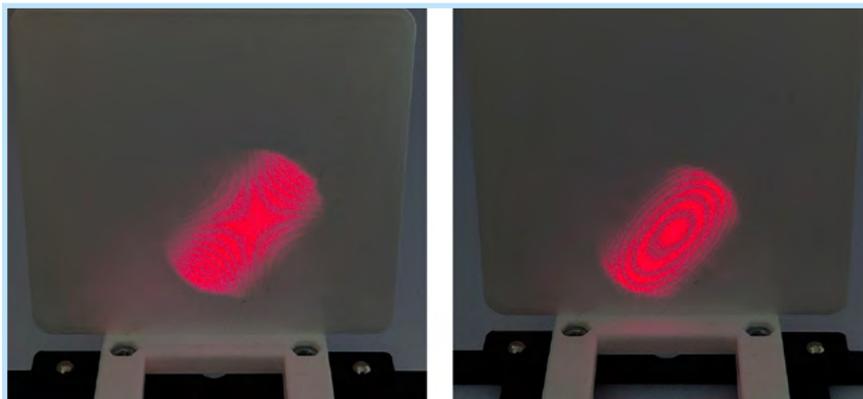


Abb. 4. Interferenzmuster mit dem Michelson-Interferometer. Links: Hyperbolisch, rechts: Elliptisches Ringmuster

### 3.3 Messungen

In der Forschung und als technische Anwendung wird das Michelson-Interferometer üblicherweise als Messgerät für Wegstreckenänderungen in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lasers eingesetzt. Eine solche Messung kann mit diesem Aufbau beispielhaft durchgeführt werden. Dazu wird ein Modul verwendet, in welchem einer der Spiegel auf einem Piezo-Element befestigt ist (Abb. 5 und Abb. 6, Würfel rechts mit Kabel zum DC-Netzgerät). Durch Anlegen einer Spannung dehnt sich dieses Piezo-Element aus und bewirkt eine Verschiebung des Spiegels, die in einer Änderung des Interferenzmusters resultiert. Auf diese Weise erhaltene Messwerte sind in Tabelle 1 dargestellt. An den Daten lässt sich ablesen, dass die Ausdehnung des Piezo-Elements bei ca.  $100 \text{ nm pro V}$  liegt. Die Ausdehnung ist typischerweise nur näherungsweise linear im Spannungsbereich bis etwa  $15 \text{ V}$ . Außerdem zeigt sich ein für Piezo-Elemente typisches Hystereseverhalten. Es macht also einen Unterschied, ob die Spannung verringert oder vergrößert wird.

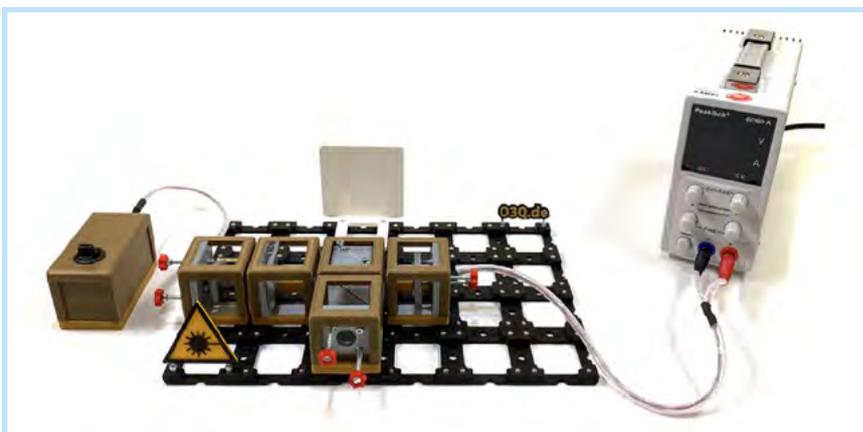


Abb. 5. Durch Ergänzung eines per Piezo-Element verschiebbaren Spiegels samt DC-Spannungsquelle (jew. rechts) lassen sich quantitative Messungen durchführen.

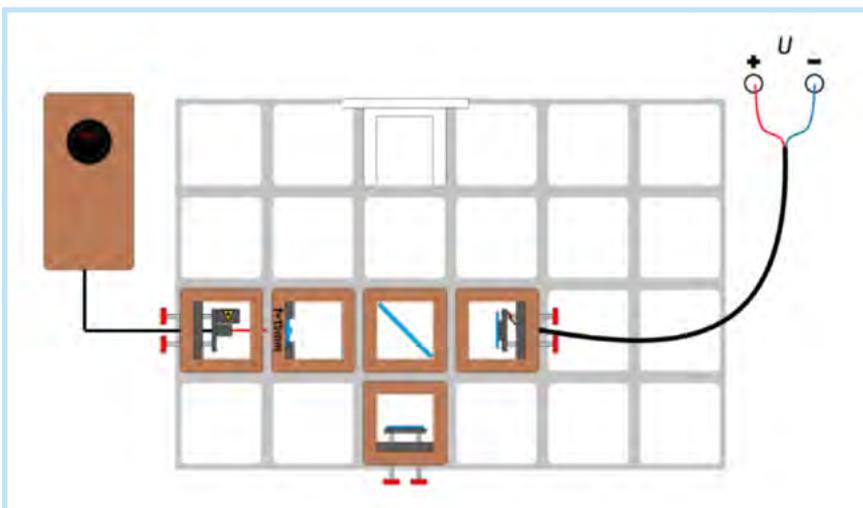


Abb. 6. Schematische Ansicht Piezo-Verschiebung

## 4 Mach-Zehnder-Interferometer

Das Mach-Zehnder-Interferometer ist eine Variation des Michelson-Interferometers und gilt historisch als Weiterentwicklung des Jamin-Interferometers. Es wird sowohl zur gezielten Phasenmodulation in einem Arm des Interferometers als auch zur Messung von Phasenverschiebungen (z.B. hervorgerufen durch unterschiedliche Brechungsindizes von Stoffen in einem der beiden Strahlengänge der Arme) eingesetzt.

### 4.1 Theorie und Aufbau

Das Michelson-Interferometer des O3Q-Sets kann durch die Ergänzung weiterer Bauteile zu einem Mach-Zehnder-Interferometer umgebaut werden. Der Aufbau ist auf Abbildung 7 dargestellt. Der Strahl wird am ersten Strahlteiler in zwei „Arme“ aufgeteilt und mit Hilfe eines weiteren Strahlteilers auf zwei Schirmen zur Überlagerung gebracht.

Durchgänge des Interferenzmusters	Spannung	Verschiebung des Spiegels
1	3,2 V	~ 325 nm
2	6,4 V	~ 650 nm
3	9,4 V	~ 975 nm
4	12,5 V	~ 1300 nm
5	15,7 V	~ 1625 nm

Tab. 1. Messungen mit dem Michelson-Aufbau aus Abbildung 5 bzw. 6

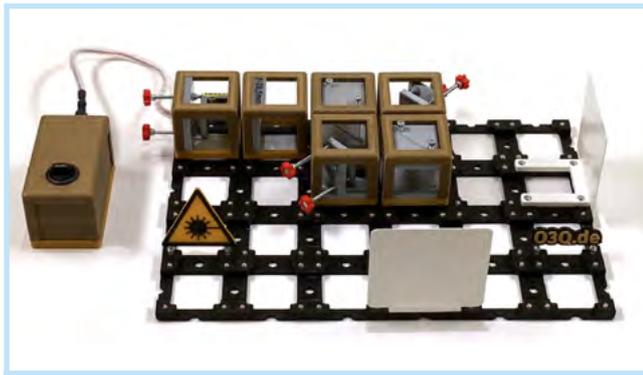


Abb. 7. Mach-Zehnder-Interferometer

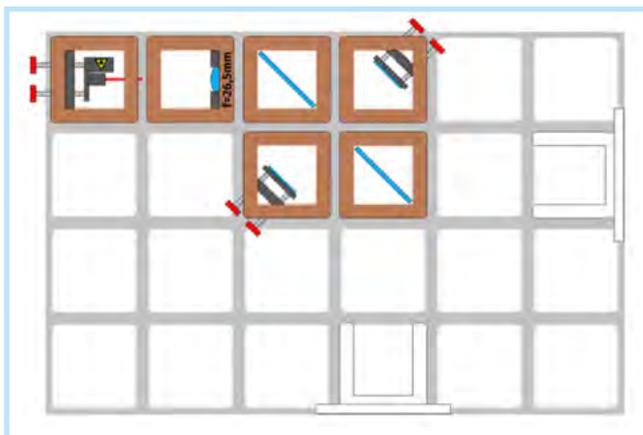


Abb. 8. Schematische Ansicht Mach-Zehnder-Interferometer

## 4.2 Beobachtung und Erklärung

Das Mach-Zehnder-Interferometer unterscheidet sich von dem Michelson-Interferometer dadurch, dass zwei Interferenzmuster beobachtet werden können, die zueinander invers sind. Beim Michelson-Interferometer entstehen zwar auch zwei Interferenzmuster, das zweite Muster befindet sich aber an der Position der Laserdiode und ist somit nicht beobachtbar. Die beiden entstehenden Interferenzmuster des Mach-Zehnder-Interferometers sind in Abbildung 9 zu sehen. Hier kann deutlich beobachtet werden, dass diese zueinander invers sind.

Ursache hierfür sind Phasensprünge an den Strahlteilern. Diese Phasensprünge treten auf, wenn Licht in einem Medium geringerer optischer Dichte an einem Medium höherer optischer Dichte reflektiert wird.

Bei Strahlteilern, die an einer Fläche beschichtet sind, ergibt sich nur dann ein Phasensprung, wenn das Licht auf der

beschichteten Seite reflektiert wird. Wird das Licht vom Inneren eines solchen Strahlteilers an der beschichteten Seite reflektiert, tritt kein Phasensprung auf. Reflexionen an Spiegeln, die an der Vorderseite reflektieren, führen immer zu Phasensprüngen.

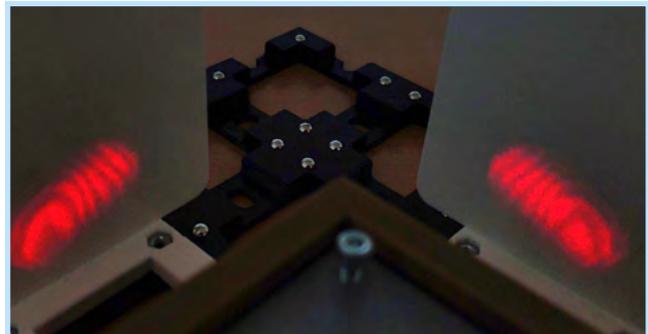


Abb. 9. Interferenzmuster mit dem Mach-Zehnder-Interferometer

Auf Abbildung 10 ist dargestellt, bei welchen Reflexionen sich dadurch für die einzelnen Teilstrahlen Phasensprünge ergeben. Auf dem Weg zu Schirm 1 (Abb. 10, oben) ergibt sich für beide Teilstrahlen jeweils eine Phasenverschiebung von  $\varphi_{tot} = 2\pi$  und folglich keine Phasendifferenz. Für Schirm 2 (Abb. 10, unten) ergibt sich für den ersten Weg (Reflektion/ Reflektion) eine Phasenverschiebung von  $\varphi_{tot} = 2\pi$ , für den zweiten Weg (Transmission/Transmission) jedoch eine Phasenverschiebung von  $\varphi_{tot} = \pi$  und damit eine Phasendifferenz von  $\Delta\varphi = \pi$ . Bei dielektrischen Materialien ergeben sich jeweils Phasensprünge von  $\pi$ . Dieser Fall ist rechnerisch am einfachsten. Für Spiegel, die wie im vorgestellten Material mit einem Metall beschichtet sind, ergeben sich rechnerisch kompliziertere Phasensprünge, die sich auf den vorgestellten Fall zurückführen lassen und bezogen auf die Phasendifferenzen zum selben Ergebnis führen.

## 4.3 Erweiterung durch Polfilter

Der Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau lässt sich durch Polarisationsfilter erweitern (Abb. 11 und 12), die sich stufenlos in verschiedene Winkel einstellen lassen. Durch diese Erweiterung kann dann demonstriert werden, dass das Auftreten von Interferenzen von der Polarisation der überlagerten elektrischen Felder abhängig ist. In Kasten 1 wird dazu erklärt, wie das Auftreten von Interferenz von der Polarisation des Lichtes abhängt. Nachfolgend werden die Beobachtungen, die am Mach-Zehnder-Interferometer gemacht werden können, anhand dieser Erklärung beschrieben. Der Aufbau ist ebenfalls ein Modellexperiment des sogenannten „Quantenradierers“ für Einzelphotonen im Quantenoptiklabor (z.B. MÜLLER, o.J.).

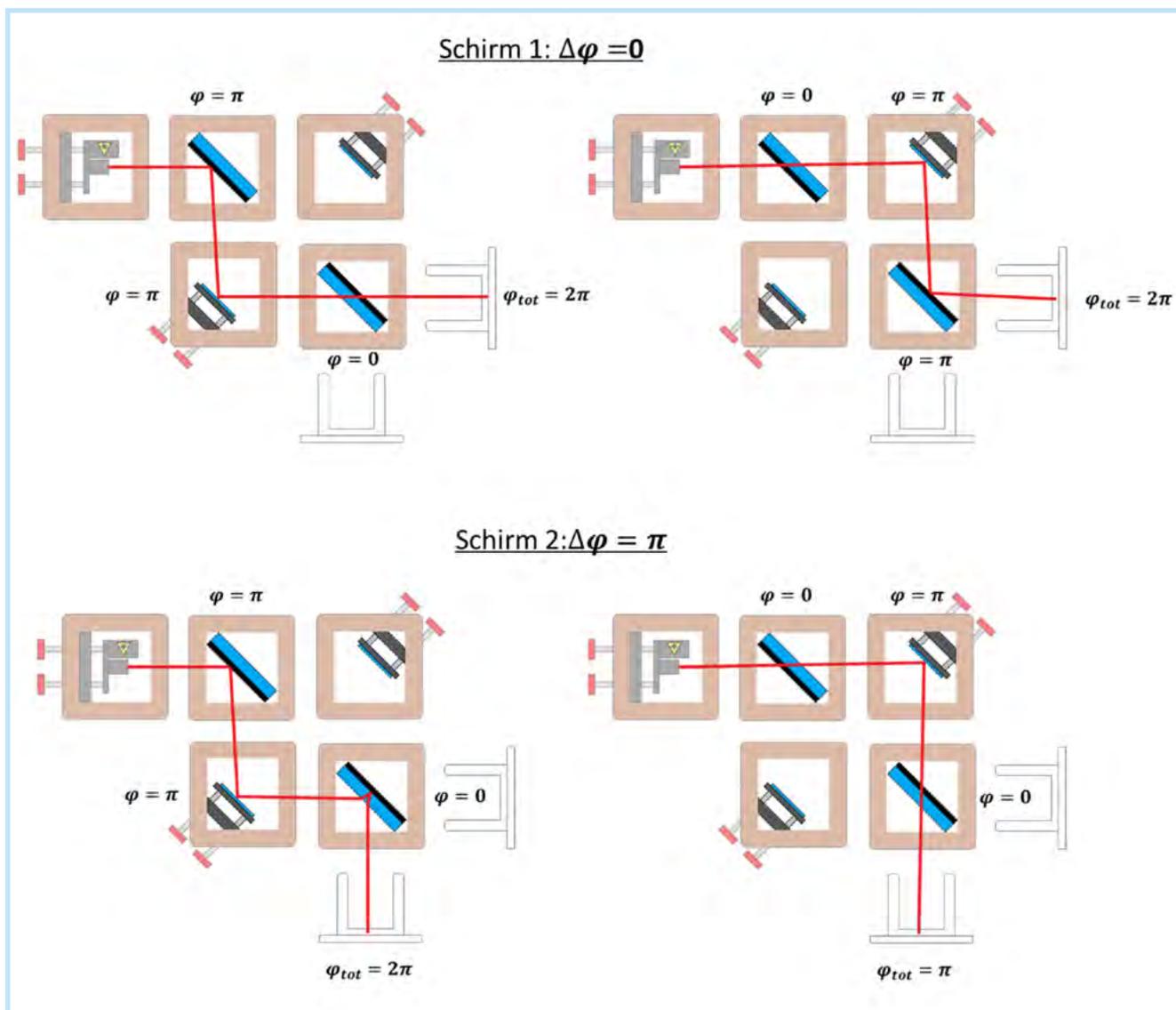


Abb. 10. Phasensprünge bei Reflexion und Transmission im Mach-Zehnder-Interferometer. An der beschichteten Seite der Strahlteiler und an den Vorderflächenspiegel treten jeweils Phasensprünge auf. Wenn der Lichtstrahl erst in das Glas des Strahlteilers eintritt und dann reflektiert wird (unten links, dritte Reflexion), tritt kein Phasensprung auf.



Abb. 11. Das Mach-Zehnder-Interferometer wird um fünf Polarisationsfilter A-E ergänzt (jew. auch erkennbar am roten Rad).

#### 4.4 Beobachtung und Erklärung

Die Polfilter werden in mehreren Schritten im Aufbau ergänzt und erlauben so jeweils neue Beobachtungen. Zunächst wird ein Polfilter hinter der Laserdiode positioniert (Polfilter A; Abb. 12) und auf eine feste lineare Polarisation (z.B.  $0^\circ$ ) eingest-

stellt. Durch diesen wird das Licht der Laserdiode, das sonst typischerweise nur teilweise polarisiert ist, vollständig linear polarisiert. Weil nur ein kleiner Teil des Lichtes durch den Polfilter absorbiert wird, sind kaum Änderungen am Interferenzbild festzustellen.

Als nächstes werden zwei weitere Polfilter in den beiden Teilstrahlengängen integriert (Polfilter B und C). Stellt man beide Polfilter auf denselben Winkel wie den Polfilter A (Achtung: Durch die Reflexionen am Strahlteiler bzw. am Spiegel wird die Polarisation jeweils an der vertikalen Achse gespiegelt, so dass  $+45^\circ$  zu  $-45^\circ$  (bzw.  $+315^\circ$ ) wird.), so kann nach wie vor ein Interferenzmuster beobachtet werden, da beide Polfilter nach dem Gesetz von MALUS (nahezu) alles Licht transmittieren und keinen Einfluss auf die Polarisation haben.

Verdreht man aber einen der Polfilter um  $45^\circ$  im Uhrzeigersinn und einen der Polfilter um  $45^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn (also z.B. Polfilter A:  $0^\circ$ , Polfilter B:  $-45^\circ$ , Polfilter C:  $+45^\circ$ ), kann kein Interferenzverhalten mehr beobachtet werden. Dies liegt

daran, dass die Polarisierung der beiden Teilstrahlen durch die Polfilter gedreht wird, so dass sie orthogonal zueinander polarisiert sind und der Interferenzterm (s. Kasten 1) verschwindet. Zusätzlich verringert sich die Intensität auf dem Schirm nach dem Gesetz von MALUS um etwa 50%.

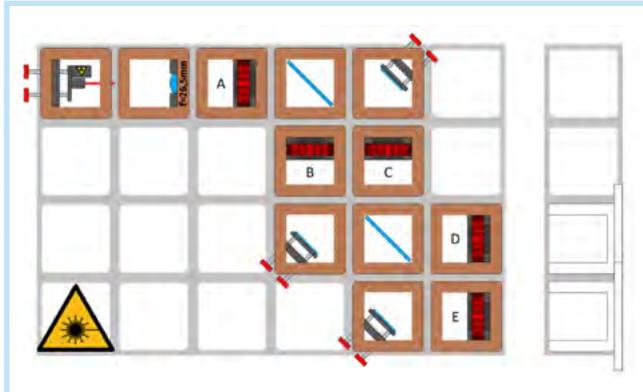


Abb. 12. Schematische Ansicht Mach-Zehnder-Interferometer mit Polarisationsfiltern

Zuletzt werden zwei weitere Polfilter hinter den beiden Ausgängen des Interferometers positioniert (Polfilter D und E). Werden diese auf die gleiche Polarisierung eingestellt wie Polfilter A (also z.B. Polfilter A:  $0^\circ$ , Polfilter B:  $-45^\circ$ , Polfilter C:  $+45^\circ$ , Polfilter D:  $0^\circ$ , Polfilter E:  $0^\circ$ ), dann kann beobachtet werden, dass das Interferenzverhalten wieder auftritt. Durch die Polfilter D und E wird die Polarisierung der beiden Teilstrahlen ein weiteres Mal gedreht, sodass beide Teilstrahlen wieder parallel polarisiert sind.

Neben den vorgestellten Experimenten können außerdem Untersuchungen des Gesetzes von MALUS und zur Polarisierung der Laserdiode durchgeführt werden. Diese sind in HAVERKAMP, PUSCH, HEUSLER & GREGOR (2022) beschrieben.

## 5 Michelson-Interferometer im Einsatz als Schülerexperiment

Das hier vorgestellte Interferometer wurde in sechs Oberstufenkursen (Grund- und Leistungskurse) im Rahmen einer 90-minütigen Unterrichtssequenz eingesetzt und getestet. Dazu wurde mit den im nachfolgenden Abschnitt vorgestellten Workbooks gearbeitet, die die Lernenden in die Thematik, die Benutzung sowie die Experimente eingewiesen und begleitet haben.

Im Rahmen der Sequenz sollten die Schüler/innen das Michelson-Interferometer zunächst in Kleingruppen justieren, sodass ein Interferenzmuster zu sehen war (Kap. 3.1). Anschließend sollten sie einen der beiden Spiegel gegen einen Spiegel mit Piezo-Element ersetzen und bestimmen, wie die Ausdehnung des Piezo-Elements von der angelegten Spannung abhängt (Kap. 3.2).

Alle Kleingruppen konnten das Michelson-Interferometer im Rahmen der Doppelstunde justieren, so dass ein Interferenzmuster deutlich zu erkennen war. Ein großer Teil der Arbeitsgruppen konnte außerdem auch die Messung durchführen. Die Auswertung der bearbeiteten Workbooks zeigte allerdings, dass viele Schüler/innen Schwierigkeiten mit der Berechnung der Ausdehnung des Piezo-Elements überfordert waren. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass das Konzept des Michelson-Interferometers in Kombination mit dem Piezo-Element für die Schüler/innen zu viel Inhalt für die 90-minütige Sequenz war und außerdem aufgrund der zeitlich begrenzten Anlage der Studie keine Sicherungsphase durchgeführt werden konnte.

### 5.1 Arbeitsmaterial

Um übersichtliche Anleitungen zu den Experimenten zu erstellen, wurden schematische Abbildungen (in den Stilen wie Abb. 3, 6 und 8) erstellt. Dafür stehen alle Module als einzelne Abbildungen zur Verfügung und können z.B. in Microsoft PowerPoint

Ganz allgemein gilt für die Überlagerung von zwei polarisierten elektromagnetischen Feldern  $E_1$  und  $E_2$  folgender Zusammenhang für die Intensität  $I_{ges}$ :

$$I_{ges} \sim |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + \underbrace{2\text{Re}(\vec{E}_1^* \vec{E}_2)}_{\text{Interferenzterm}}$$

Relevant für das Auftreten von Interferenz ist dabei der sogenannte Interferenzterm, in dem das Skalarprodukt beider elektrischer Felder enthalten ist. Dieser hängt unter anderem vom Winkel  $\theta$  zwischen den Polarisierungen beider Felder ab. Für den Fall, dass beide Felder parallel zueinander polarisiert sind ( $\theta = 0^\circ$ ), hängt der Interferenzterm  $2|E_1||E_2| \cos(\Delta\varphi(x))$  von der Phasenverschiebung  $\Delta\varphi(x)$  zwischen beiden Feldern am Ort  $x$  ab, und kann Werte zwischen  $\pm 2|E_1||E_2|$  annehmen. Damit ergeben sich im für uns wesentlichen Fall mit 50% Strahlteilern im Aufbau und folglich  $|E_1| = |E_2|$  als Gesamtintensität  $I_{ges}(x) = 2I_1(1 + \cos(\Delta\varphi(x))) = 2I_2(1 + \cos(\Delta\varphi(x)))$ . Je nach Position auf dem Schirm variiert  $I_{ges}(x)$  periodisch. Wegen  $\cos(\Delta\varphi(x) + \pi) = -\cos(\Delta\varphi(x))$  sind die in Abbildung 9 gezeigten Interferenzmuster komplementär zueinander, siehe auch Abbildung 7.

Wenn beide Felder orthogonal zueinander polarisiert sind ( $\theta = 90^\circ$ ), ergibt das Skalarprodukt der Feldstärken den Wert 0, in diesem Fall fällt der Interferenzterm weg. In diesem Fall ergibt sich  $I_{ges} = I_1 + I_2$  und es tritt keine Interferenz auf. Eine wichtige Voraussetzung für das Auftreten von Interferenz ist folglich, dass die Polarisierung der beiden Felder nicht orthogonal zueinander ist. Zusammengefasst muss der Interferenzterm für  $\theta = 90^\circ$  verschwinden, für  $\theta = 0^\circ$  ergibt sich die maximale Interferenz wie oben beschrieben. Für allgemeines  $\theta$  ergibt sich der Ausdruck:

$$I_{ges}(x) = 2I_1(1 + \cos(\Delta\varphi(x)) \cos(\theta)) = 2I_2(1 + \cos(\Delta\varphi(x)) \cos(\theta))$$

Kasten 1. Interferenz von (linear) polarisierten elektromagnetischen Feldern

individuell angeordnet werden, um bestimmte Konfigurationen vorzugeben und so einfach übersichtliche und qualitativ hochwertige Anleitungen oder Arbeitsmaterialien zu erstellen.

Für den Aufbau zum Michelson-Interferometer steht außerdem eine vollständige Anleitung zur Verfügung, die mit WunderBooks (<https://www.wunderbooks.de/>) erstellt wurde (Abb. 13, verfügbar unter [www.o3q.de](http://www.o3q.de)).

In dem Material sind eine theoretische Einführung, eine Anleitung zum Aufbau des Experiments sowie einige Aufgaben zum Experiment enthalten.

Außerdem gibt es eine Beschreibung zur Durchführung der Messung. Materialien für die weiteren hier beschriebenen Aufbauten sind in Vorbereitung.

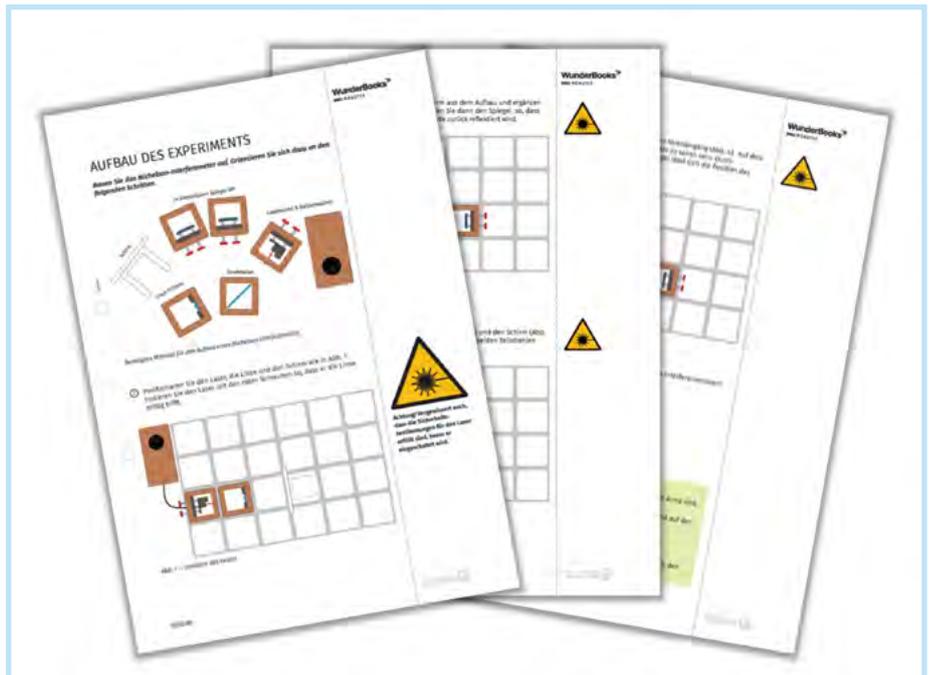


Abb. 13. Arbeitsmaterialien zum Michelson-Interferometer

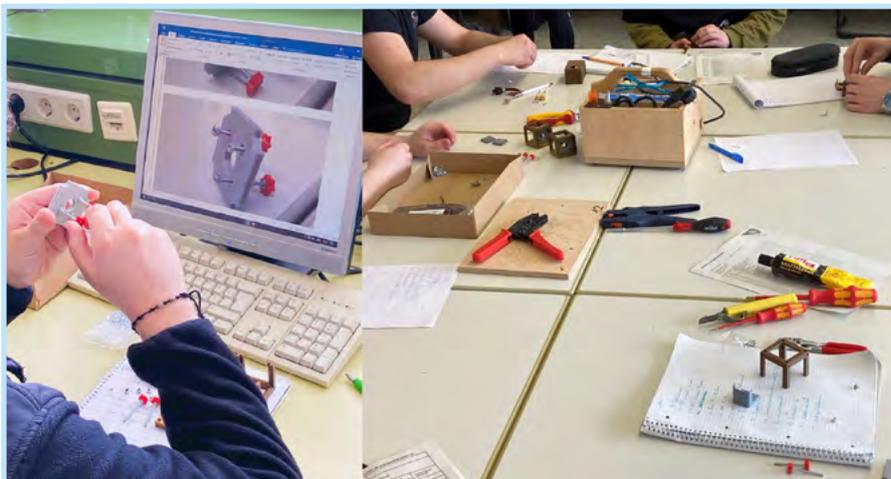


Abb. 14. Die Schülerfirma IT4U der BBS Osterholz-Scharmbeck druckt, montiert, verpackt und versendet die Komponenten des Michelson-Interferometers. (Fotos: MARTIN JANIK)

Die 20–25 Realschüler/innen arbeiten einmal wöchentlich sechs Unterrichtsstunden in der Schülerfirma, die sich neben zwei weiteren kleineren Geschäftsfeldern hauptsächlich mit der Produktion und dem Vertrieb des Michelson-Interferometer Experimentiersets beschäftigt. Die unterschiedlichen Arbeitsschritte in der Werkstatt (Produktion, Abb. 14) und im Fachraum (Einkauf, Marketing, Vertrieb, Controlling) bieten viele Möglichkeiten, den Talenten und Interessen entsprechend zu arbeiten. Besonders reizvoll dabei ist, dass es sich um eine echte (Schüler-)Firma mit realem Umsatz und Kunden sowie Kooperationspartnern handelt und erwirtschaftete Überschüsse unter Einbeziehung von Mitarbeitervorschlägen in technische Neuheiten reinvestiert oder für Firmenausflüge ausgegeben werden können. Die Organisation der Schülerfirma (Kombination Wirtschaft und Fachpraxisunterricht) bietet den Mitarbeiter/inne/n der IT4U viele Anlässe zum Entdecken neuer Talente, was nicht zuletzt das Selbstbewusstsein stärkt, haben doch Schüler/innen diese Schulform mitunter gewählt, weil sie keinen Ausbildungsplatz gefunden oder die abgebende Schule nicht mit dem gewünschten Abschluss verlassen haben. Hierbei ist auch aus schulorganisatorischer Sicht der Lehrkräfteeinsatz interessant, da es sich um ein abteilungsübergreifendes Lehrerteam aus Technik und Wirtschaft handelt, die voneinander lernen und sich im Unterricht ergänzen können.

Kasten 2. Die Schülerfirma IT4U an der Berufsbildenden Schule Osterholz-Scharmbeck

## 5.2 Herstellung und Bezugsmöglichkeiten

Die STL-Dateien für den 3D-Drucker, eine Teileliste mit Bezugsquellen sowie eine Aufbauanleitung sind unter der Webseite [www.o3q.de](http://www.o3q.de) kostenlos verfügbar.

Es besteht außerdem die Möglichkeit, Sets über die mit uns kooperierende Schülerfirma IT4U der Berufsbildenden Schule Osterholz-Scharmbeck zu bestellen (<https://www.bbs-ohz.de/2022/05/02/it4u-baut-das-michelson-interferometer>). Die Schülerfirma IT4U ist Teil des Fachpraxisunterrichts im Lernfeld „Arbeit im Modellunternehmen“ der einjährigen Berufsfachschule Technik mit Schwerpunkt Informationstechnik (s. Kasten 2).

## 6 Ausblick

In diesem Artikel wurde günstiges Experimentiermaterial für Experimente zur Interferenz vorgestellt. In einem Schultest mit sechs Oberstufenkursen konnte gezeigt werden, dass dieses Material für den Einsatz als Schülerexperiment geeignet ist, um die gewünschten experimentellen Ergebnisse zu zeigen, insbesondere zum wichtigen Phänomen der Interferenz. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass die theoretische Einbettung in Form des Workbooks nicht ausreichte und eine umfangreichere Thematisierung der Theorie notwendig ist.

Durch das modulare System lassen sich Module für viele weitere Experimente, wie z.B. ein Modellexperiment zum BB84-Protokoll, einfach drucken, montieren und ergänzen und mit den vorhandenen kombinieren.

## Danksagung

Die Komponenten und Experimente wurden im Rahmen des BMBF-Projekts O3Q (FKZ 13N15388) überarbeitet bzw. entwickelt. Im Rahmen dieses Projekts danken wir unseren Kooperationspartnern RÜDIGER SCHOLZ, KIM-ALESSANDRO WEBER, MARINA PETERS, JAN STEGEMANN, JONAS HOMRIGHAUSEN und NICOLE LANGELS.

## Literatur

BERNSTEIN, F., WILHELM, T. & SCHMELING, S. (2022). 3D-gedruckte Experimente zur modernen Physik. *Plus Lucis*, 4/2022, 33–39.

DIEDERICH, B., LACHMANN, R., CARLSTEDT, S., MARSIKOVA, B., WANG, H., UWURUKUNDO, X., MOSIG, A. S. & HEINTZMANN, R. (2020). A versatile and customizable low-cost 3D-printed open standard for microscopic imaging. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19447-9> (30.05.23).

HAVERKAMP, N., HOLZ, C., UBBEN, M. & PUSCH, A. (2020). Measuring Wavelengths with LEGO® Bricks: *Building a Michelson Interferometer for Quantitative Experiments*. *The Physics Teacher*, 58(9), 652-655. <https://doi.org/10.1119/10.0002734> (30.05.23).

HAVERKAMP, N., PUSCH, A., HEUSLER, S. & GREGOR, M. (2022). A simple modular kit for various wave optic experiments using 3D printed cubes for education. *Physics Education*, 57(2), 025019. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac4106> (30.05.23).

MÜLLER, R. (o.J.). milq-Lehrgang <https://www.milq.info/> (30.05.23).

Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2022). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. In *schulentwicklung.nrw.de*. [https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/208/g9\\_ph\\_klp\\_%203411\\_2019\\_06\\_23.pdf](https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/208/g9_ph_klp_%203411_2019_06_23.pdf) (30.05.23).

SCHÜRMAN, P. (2019). *Experimente zur optischen Interferenz aus dem 3D-Drucker*. Wiesbaden: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28894-5> (30.05.23).

Vollmer, M. & Möllmann, K. P. (2008). Michelson Interferometer for Your Kitchen Table. *The Physics Teacher*, 46(2), 114–117. <https://doi.org/10.1119/1.2834535> (30.05.23).

NILS HAVERKAMP, Dr. ALEXANDER PUSCH und Prof. Dr. STEFAN HEUSLER lehren und forschen am Institut für Didaktik der Physik der Universität Münster.

Prof. Dr. MARKUS GREGOR lehrt und forscht an der FH Münster im Bereich der Quantentechnologien.

Kontakt an das Team über [info@o3q.de](mailto:info@o3q.de) ■

**Gehen Sie auf die Suche.**

SUCHE IM ARCHIV DES MNU-JOURNALS

MNU journal

Das Archiv umfasst die im MNU-Journal erschienenen Artikel der Jahrgänge 1992 bis 2021. Bei Angabe mehrerer Suchbegriffe werden alle Ergebnisse angezeigt, die mindestens einen dieser Begriffe enthalten.

Suchbegriffe:

**2500 Artikel des MNU-Journals wollen entdeckt werden.**

Heft	Titel	Fach	Stufe
2005-02	Geometrisches Konstruieren - Unterschiedliche Zugänge am Beispiel eines griechischen Kirchenfensters erfahrbar machen	Mathematik	
2010-03	Bilder aus generationalen Funktionen	Mathematik	
2013-06	Erkennen heißt Machen - Freilandversuche im Physikunterricht	Physik	
2017-02	Experimentieren mit Hexaflaxagonen - Strukturen explorieren, Vermutungen überprüfen	Mathematik	SI

[www.mnu-journal.de](http://www.mnu-journal.de)