

Versuche zur Wellenoptik auf der optischen Bank

NILS WÜCHNER

Johannes Kepler Gymnasium, Stuttgart
nils.wuechner@jkg-stuttgart.de

27. März 2022

Zusammenfassung

Moderne 3D-Drucktechnik ermöglicht die kostengünstige Fertigung von Schülerexperimentiersets zum Einsatz in der gymnasialen Oberstufe. In dieser Anleitung werden Praktikumsversuche zu Wellenoptik an einer einfachen 3D-gedruckten optischen Bank vorgestellt. Dabei wird auf die grundlegende Idee sowie die einzelnen Komponenten und Erweiterungsmöglichkeiten eingegangen.

I. EINFÜHRUNG

Die Vorstellung von den Modellen des Lichts gehört zu den zentralen Inhalten der Schulphysik. Geometrische Optik in der Unterstufe wird durch die Wellenoptik und Quantenphysik in der Oberstufe ergänzt, sodass sich abschließend ein Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik bietet.

Während sich die geometrische Optik in der Unterstufe stark auf Schülerexperimenten zum Lichtstrahlmodell stützt, wird die Wellenoptik im klassischen Unterrichtsgang vor allem durch Demonstrationsversuch gestützt. Ziel der hier dargestellten Versuchsanordnung ist es eine kostengünstige und einfach herzustellende Alternative zum Unterrichtsgang Wellenoptik mit Schülerversuchen aufzuzeigen. Dabei kann dies sowohl als zentrale Methode genutzt werden oder ergänzend zum klassischen Vorgehen als Vertiefung zum eigenständigen Experimentieren anregen.

Die Optikbank und ihre Komponenten können modular aus dem 3D-Drucker hergestellt und durch Zukauf einfacher Komponenten ergänzt werden. Der Aufbau ist einfach gehalten und bis hin zu Realisierungsmöglichkeiten von Interferometern erweiterbar.

II. OPTIKBANK

Die Optikbank besteht auf einem Aluminium-Nutprofil mit dazu passenden Füße und Reitern, welche als Aufnahme für die einzelnen optischen Komponenten dienen.



Abbildung 1: Aufbau der Optikbank mit Mehrfachspalten auf selbstgedrucktem Dia

Die Aluminiumprofile entsprechen den klassischen Nutprofilen (20x20, Nut 5, B-Typ), welche sich bei vielen Herstellern für einen geringen Preis pro Meter beziehen lassen. Diese eignen sich am besten in Längen zwischen 100 – 120 cm zur Ausstattung einer Schülergruppe. Kürzere oder längere Profile sind aufgrund von experimentellen Überlegungen oder Tischkapazitäten oft nicht sinnvoll.

Die Profile werden mittels Standfüßen auf dem Tisch platziert, welche in einer breiteren oder schmaleren Version vorliegen. In die Nuten werden speziell angepasste Reiter eingebracht, sodass jeweils durch eine Schraube ein Bauteil bzw. der Reiter selbst auf dem Bank fixiert werden kann. Dafür sind M4-Schrauben in 12mm bzw. in 16mm vorgesehen. Rundkopfschrauben können zusätzlich mit einem Rändeldeckel versehen werden.

Die Basisausstattung besteht auf einem Laserpointerhalter, einem Diahalter und einem Transparenzschirm. Alle Komponenten werden mit einem Aluminium-



Abbildung 2: Fuß, Aluprofil und Reiter

rundrohr ($d = 8\text{ mm}$) in den Reitern befestigt und sind auf eine optische Achse ausgerichtet, welche durch eine Rohrlänge von standardmäßig 80mm ausgelegt ist. Laserpointerhalter (90mm) und Schirm (45mm) benötigen aufgrund der Geometrie andere Rohrlängen.

Ein Standardlaserpointer (ca. 650nm bzw. 532nm eignen sich gut) dient zusammen mit dem Laserpointerhalter als kohärente Lichtquelle. Er wird mit zwei Schrauben im Halter fixiert und mit der dritten Ein- bzw. Ausgeschaltet. Die M6-Schrauben liegen als Druckfile bei. Bei Schülerversuchen sind grundsätzlich nur Laser der Klassen 1 und 2 nach RiSU 2016 zugelassen. Der Diahalter fixiert ein beliebiges Beugungsobjekt mit einer M4x12-Schraube inkl. Rändeldeckel im Strahlengang. Der Schirm besteht aus einem Vorder- und Hinterteil zwischen denen eine auf Transparentpapier gedruckte Millimeterskala eingepasst wird. Es wird ebenfalls mit einem Alurohr im Reiter fixiert.



Abbildung 3: Halterungen für Laserpointer, Dia und Schirm

III. AUFBAUANLEITUNG

Die Optikbank und ihre Komponenten sind modular. Sie können so einzeln gebaut und zusammengesetzt werden, wobei das System ständig erweiterbar bleibt.

Für die Herstellung ist neben dem Kauf der einzelnen Materialien der Druck der CAD-Files im 3D-Drucker nötig. Dieser kann mit Standard-PLA erfolgen, wobei sich vor allem matt-schwarzes Material bestens für Optikversuche eignet. Bei der Füllung (10 – 15%), Druckauflösung (0,1 – 0,12mm) und Verfeinerung sind Standardwerte ausreichend. Unterstützungsstrukturen werden bei keine benötigt. Bei stark belasteten Komponenten wie den M6x30-Schrauben eignet sich eine größere Füllung.

Die Füße der optischen Bank können direkt verwendet werden. Die Löcher der Reiter sowie der Halterungen für Dia (jeweils M4) und Laserpointer (M6) müssen mit einem Innengewinde versehen werden.

Tabelle 1: 3D-Druckteile pro Schülergruppe

Name / Teil	Anzahl
base_100.stl	2
reiter_b2020-8_innut.stl	3
laserpointer2.stl	1
schraube_m6b.stl	3
dialhalter_v2_schueler.stl	1
m4_raendel_hex.stl	7
schirm_o.stl	1
schirm_u.stl	1

Dafür eignet sich ein Gewindeschneitsatz und ein Akuschrauber besonders gut. Für jeden Reiter wird eine M4x12mm- (oben) und eine M4x16mm-Schraube (unten) mit einem Rändeldeckel versehen. Für den Diahalter wird eine M4x12mm-Schraube benötigt. Zur Herstellung des Schirmes wird das Transparenzpapier mit einer Vorlage für Millimeterpapier bedruckt (Vorsicht: Skalierung zu 100% wählen und ggfls. nachprüfen) und auf die entsprechende Größe des Schirm zugeschnitten. Nach dem Einlegen können die beiden Teile des Schirms mit Flüssigkleber befestigt werden.

Tabelle 2: Materialliste pro Schülergruppe

Materialien	Anzahl	Preis
Laserpointer (z.B. 532nm oder 650nm)	1	25 – 30€
Dia mit Beugungsobjekten	1 – 2	2 – 3€
Alu-Nutprofil 20x20 B-Typ Nut 5	1,2m	2 – 3€
M4 Rundkopfschrauben (12mm und 16mm)	ca. 10	5€
Transparentpapier A4	1	1€

Als Laserpointer können handelsübliche stabförmige Modelle verwendet werden. Die für Schülerexperimente zulässigen Schutzklassen müssen eingehalten werden. Der Laserpointer wird in die Halterung eingelegt und jeweils mit den beiden hinteren Schrauben fixiert. Die vordere Schraube kann so den Knopf für das Einschalten während der gesamten Versuchsdauer betätigen.

Zentrales Bauteil für die spätere wissenschaftliche Arbeit ist das verwendete Beugungsobjekt. Gängige Lehrmittelfirmen bieten Beugungsobjekte auf Dia oder Glasplatte in verschiedenen Preisklassen und je nach Versuchsziel an. Relevante für die späteren Eigenschaften des Beugungsbildes sind beim Einzelespalt die Spaltbreite b , beim Doppelspalt der Spaltmittenabstand g und ähnlich beim Gitter die Gitterkonstante. Aufgrund der Abmessung der optischen Bank ergibt sich beim einem Schirmabstand von ca. 1 m eine na-



Abbildung 4: Versuchsaufbau mit verstellbarem Einzelspalt



Abbildung 6: Versuchsaufbau mit Beugungsobjekt auf Dia

türliche Grenze für diese drei Parameter. Sinnvoll sind folgende Werte:

$$b \approx 0,1\text{mm}, \quad g \approx 0,025 - 0,05\text{mm}, \quad 40 - 180 \frac{\text{Linien}}{\text{cm}}$$

Mithilfe dieser Werte können die passenden Beugungsobjekte ausgesucht werden.

Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit oder zu hoher Einzelpreise wurde auch die Entwicklung eigener individualisierter Beugungsdiass angedacht.

IV. VERSUCHSTEILE UND ERGEBNISSE

Beugung am Einzelspalt

Die Beugung am Einzelspalt kann mit einem verstellbaren oder festen Einzelspalt erfolgen. Dabei eignet sich der verstellbare Spalt vor allem zur Einführung der Wellenoptik als Grenzfall der geometrischen Optik. Aus dem Beugungsbild kann dann später zum Beispiel die Spaltbreite errechnet werden. Der feste Einzelspalt sollte immer so gewählt werden, dass er dieselbe Spaltbreite wie ein später verwendeter Doppelspalt besitzt, um das Prinzip der Einhüllenden experimentell zu erforschen. Das in 5 fotografierte Beugungsbild zeigt das Versuchsergebnis mit einem festen Einzelspalt der Breite $b = 0,05\text{mm}$. Gegenüber der geometrischen Vorstellung stehen ganz klar die erster, zweiter und dritter Ordnung, die durch Interferenz im Fernfeld entstehen. Diese können aufgrund der Millimeterskala auch quantitativ ausgemessen werden.

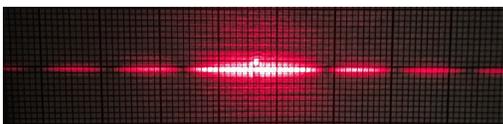


Abbildung 5: Versuchsergebnis Einzelspaltbeugung am Schirm

Beugung am Doppel- und Mehrfachspalt

Beugung am Doppelspalt liefert durch die Überlagerung und Interferenz zweier Elementarwellen ein

Beugungsbild mit Hauptmaxima, welche durch die Intensitätsverteilung der Einzelspalt eingehüllt wird. Deutlich zu erkennen ist, dass die Minima des Einzelspalt an denselben Stellen wie zuvor auftreten. Durch die klare Trennung der Maxima ist zum Beispiel mithilfe der Minima die Bestimmung der Lichtwellenlänge möglich. Je nach bekannten Größen können natürlich auch andere Parameter bestimmt werden. Bei den Mehrfachspalten ist deutlich zu erkennen, dass die Maxima schmaler werden und an Schärfe zunehmen. Es ergeben sich beim Dreifachspalt ein und bei Vierfachspalt zwei Nebenmaxima, die jeweils durch Nebenminima voneinander getrennt sind. Auch hier bestimmt der Einzelspalt jeweils die Einhüllende. Beide Mehrfachspalt können qualitativ ausgewertet werden.

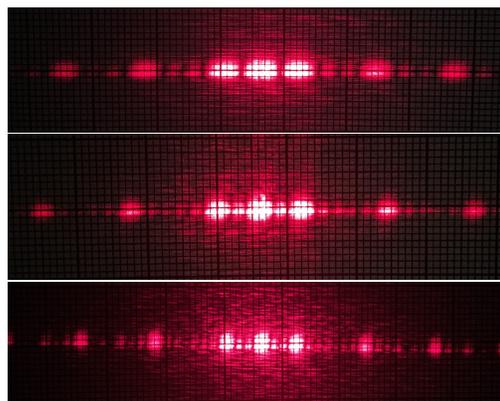


Abbildung 7: Versuchsergebnis Doppel-/Dreifach- und Vierfachspaltbeugung

Beugung am Gitter

Für die Beugung am Gitter muss lediglich das Beugungsobjekt ersetzt werden. Dabei eignen sich für die Dimensionen der vorgestellten Optikbank Gitterkonstanten im Bereich von $40 - 160 \frac{\text{Linien}}{\text{cm}}$. Ergebnisse der Beugung bei verschiedenen Gitterkonstanten liegen zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht vor,

werden am in Kürze eingepflegt.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund des reduzierten Aufbaus und der hervorragenden Messergebnisse eignet sich die Optikbank mit Laserpointer, Diahalter und Schirm als einfacher Praktikumsversuch zur Wellenoptik für die Oberstufe. Durch die flexible Erweiterung mit unterschiedlichen Beugungsobjekten wie Mehrfachspalt oder Gitter ergibt sich die Möglichkeit zur Differenzierung und des praktischen Erfahrens der optischen Interferenz. Der geringe Kosteneinsatz von ca. 30 Euro pro Versuchsaufbau eröffnen die Möglichkeit zum Einsatz im Schüler-Praktikum.

DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt Prof. Bruno Rager vom Seminar Esslingen für die große Hilfe bei der Entwicklung und Perfektionierung der einzelnen Komponenten sowie die ständige pädagogische Betreuung. Für ständige Beratung und Hilfe bei der Herstellung eigener Beugungsobjekte danke ich Herr Ulrich Schneider (Universität Stuttgart). Ebenso gilt mein großer Dank Harald Hochwald vom Stadtmedienzentrum für Didaktik und Fachkenntnisse, sowie Tobias Reinsch und Ronny Nawroth (Universität Stuttgart) für die Beantwortung zahlloser Fragen.