

Michelson Interferometer aus dem 3D Drucker

Nils Wüchner, Seminar Esslingen, Johannes-Kepler-Gymnasium Stuttgart
wuechner@seminar-esslingen.de
CC-BY-NC-SA

1. Dezember 2024

Mit moderner 3D-Drucktechnologie wird der Bau eines Michelson-Interferometers nicht nur erschwinglich, sondern auch kreativ gestaltbar. Dieses Projekt zeigt, wie ein solches Interferometer flexibel und modular gefertigt werden kann – ideal für den Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. Neben der einfachen Konstruktion bietet es faszinierende Möglichkeiten, beispielsweise zur Messung kleinster Weglängenänderungen, und lässt sich problemlos zu einem Mach-Zehnder-Interferometer erweitern.

1 Einführung

Das auf den folgenden Seiten vorgestellte Interferometer und seine Komponenten können kostengünstig und modular mit einem 3D-Drucker hergestellt und durch den Zukauf einfacher Bauteile wie Spiegel, Strahlteiler und Linsen ergänzt werden. Der Aufbau ist einfach gehalten und bis hin zum Mach-Zehnder-Interferometer erweiterbar.



Abbildung 1: Interferometer mit einfachen optischen Komponenten

2 Optische Bank

Die optische Bank besteht aus einem Aluminium-Nutprofil mit passenden Füßen und Reitern, die als Aufnahme für die einzelnen optischen Komponenten dienen. Für den Interferometeraufbau werden verschieden große Stücke miteinander verbunden und bilden ein Kreuz mit einem langen Teilstück für die Projektion auf den Schirm.

Die Aluminiumprofile entsprechen den klassischen Nutprofilen (20x20, Nut 6, B-Typ), die bei vielen Herstellern zu einem geringen Preis pro Meter erhältlich sind. Für das Kreuz empfiehlt sich ein Aufbau mit zwei 20 cm langen Stücken für die Arme und den Laser sowie einem ca. 120 cm langen Teilstück für den Schirm. Entsprechende Eckverbinder finden sich auf gängigen Verkaufsportalen. Die Profile werden mittels Standfüßen auf dem Tisch platziert. In die Nuten werden speziell angepasste Reiter eingesetzt, die durch eine Schraube entweder ein Bauteil oder den Reiter selbst auf der Bank fixieren. Dafür sind M4-Schrauben in 12 mm bzw. 16 mm Länge vorgesehen. Rundkopfschrauben können zusätzlich mit einem gedruckten Rändeldeckel versehen werden.

Die Basisausstattung besteht aus einem Laserpointerhalter, zwei Spiegelhaltern, einem Halter für den Strahlteiler, einem Diahalter für die Aufweitungslinse und einem Transparenzschirm. Alle Komponenten werden mit einem Aluminiumrundrohr ($d = 8$ mm, Baumarkt) in den Reitern befestigt und auf eine optische Achse ausgerichtet, die durch eine Rohrlänge von standardmäßig 80 mm definiert ist. Für den Schirm eignet sich eine kürzere Länge, damit dieser mittig platziert werden kann. Ein Standardlaserpointer (ca. 650 nm bzw. 532 nm) dient

zusammen mit dem Laserpointerhalter als kohärente Lichtquelle. Er wird mit zwei Schrauben im Halter fixiert und mit einer dritten ein- bzw. ausgeschaltet. Die M6-Schrauben sollten ebenfalls mit einem Rändeldeckel versehen werden. Eleganter ist die Verwendung eines Lasermoduls (z. B. Laserfuchs Punktlaser rot) in einem entsprechenden Gehäuse. Darin lässt sich der Laser durch zwei kleine M3-Schrauben horizontal justieren. Bei Schulversuchen sind grundsätzlich nur Laser der Klassen 1 und 2 nach RiSU 2016 zugelassen.

Die Spiegelhalter dienen der Feinjustage der Lichtwege. In horizontaler und vertikaler Achse arbeiten zwei Schrauben mit passenden Rundmagneten als Zug- und Druckmechanismus zur Ausrichtung des aufgeklebten Vorderflächenspiegels. Der teildurchlässige Spiegel wird als Strahlteiler verwendet. Der Diahalter fixiert die Linse 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. Diese wird ebenfalls mit einem Alurohr im Reiter fixiert.

3 Aufbauanleitung

Die optische Bank und ihre Komponenten sind modular. Sie können einzeln gebaut und zusammengesetzt werden, wobei das System ständig erweiterbar bleibt. Durch eine Veränderung der Geometrie der Aluminiumschienen kann ebenso ein Mach-Zehnder-Interferometer realisiert werden.

Für die Herstellung ist neben dem Kauf der Materialien der Druck der CAD-Files mit einem 3D-Drucker erforderlich. Dieser kann mit Standard-PLA erfolgen, wobei sich insbesondere matt-schwarzes Material besonders für Optikversuche eignet. Für die Füllung (10–15 %), Druckauflösung (0,1–0,12 mm) und Verfeinerung sind Standardwerte ausreichend. Unterstützungsstrukturen werden nicht benötigt.

Die Füße der optischen Bank können direkt verwendet werden. Die Gewinde für Schrauben werden gemäß der angehängten Tabelle in die Löcher geschnitten. Die Schrauben werden mit Rändeldeckeln versehen und eingebracht (ggf. geklebt). Der teildurchlässige Glasspiegel wird in die Strahlteilerhalterung eingesetzt und festgeschraubt. Die Stahlschrauben werden in die Spiegelhalterungen eingeschraubt, und die Magnete werden durch leichte Hammerschläge in die Öffnungen eingeschlagen. Die Vorderflächenspiegel werden abschließend mit wenig Flüssigkleber aufgebracht. Die Linse wird sanft in die vorgesehene Halterung gedrückt. Zur Herstellung des Schirms wird das Transparentpapier mit einer Vorlage für Millimeterpapier bedruckt (Skalierung auf 100 % einstellen und ggf. überprüfen) und auf die entsprechende Größe zugeschnitten. Nach dem Einlegen können die beiden Teile des Schirms mit Flüssigkleber befestigt werden. Der Höhenfinder wird zusammengesetzt.



Abbildung 2: Linse, Strahlteiler und Spiegel

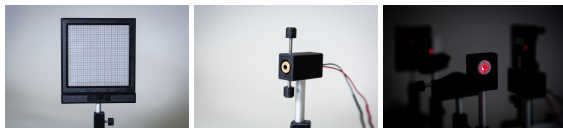


Abbildung 3: Schirm, Lasermodul und Höhenfinder

4 Versuchsteile und Ergebnisse

Justage

Für die Justage der Anordnung müssen beide Lichtwege exakt horizontal über die Komponenten verlaufen. Dazu wird der Höhenfinder mit einem passenden Einsatz in Weiß und einem modifizierten Fuß verwendet. Mit dem Höhenfinder wird zunächst der Laser auf einer Strecke von mindestens einem Meter präzise horizontal und vertikal justiert. Zur horizontalen Ausrichtung kann der Halter im Fuß gedreht werden. Für die vertikale Ausrichtung müssen die Schrauben in der Lasermodulhalterung angepasst werden. Auf einer möglichst langen Strecke sollte der Laserpunkt sowohl in der Nähe als auch in größerer Entfernung exakt durch das Fadenkreuz verlaufen.

Nach der Ausrichtung des Lasermoduls kann das Interferometer aufgebaut werden. Dazu werden Füße und Reiter auf den Aluminiumprofilen befestigt. Lasermodul, Strahlteiler, die beiden Spiegel und der Schirm werden grob ausgerichtet und festgeschraubt. Anschließend wird der Strahlenverlauf mit dem Höhenfinder angepasst. Zunächst wird der Laser mittig auf den gegenüberliegenden Spiegel ausgerichtet. Dann wird der Höhenfinder vor dem zweiten Spiegel positioniert, und der Strahlteiler wird so lange gedreht, bis der Laserstrahl durch die Bohrung des Höhenfinders verläuft. Die Neigung der Spiegel wird zuletzt eingestellt, indem der Höhenfinder vor dem Schirm positioniert und die Schrauben der Spiegel so lange justiert werden, bis die Lichtstrahlen wieder zentriert durch den Höhenfinder verlaufen. Die beiden Teilstrahlen sollten nun perfekt übereinanderliegen. Abschließend kann der Diahalter mit der Aufweitungslinse eingesetzt werden. Der Laserstrahl wird mit der +26,5 mm Linse aufgeweitet, wobei die Linse exakt mittig im Strahlengang positioniert sein muss.

Sobald die Anordnung zur Ruhe gekommen ist, erscheint auf dem Schirm ein kreisförmiges Interferenzmuster. Mit Hilfe der Schrauben der Spiegel kann die Feinausrichtung optimiert werden.

Michelson-Interferometer

Nach der Justage des Strahlengangs kann auf dem Schirm ein kreisförmiges Interferenzmuster beobachtet werden. Je nach Weglängendifferenz der beiden Teilstrahlen entstehen helle und dunkle Ringe konstruktiver und destruktiver Interferenz. Jeder Ring entspricht der relativen Wegdifferenz einer halben Wellenlänge, bei rotem Licht also ca. 325 nm. Dies verdeutlicht nicht nur das Prinzip des Interferometers, sondern ermöglicht auch konkrete Messungen.

Die außerordentliche Präzision des Interferometers wird besonders deutlich, wenn die Interferenz durch äußere Einflüsse gestört wird. Bereits leichtes Klopfen auf den Tisch,

ein Schritt in der Nähe oder ein Luftstoß auf einen der Spiegel zerstört das Muster auf dem Schirm, das erst bei vollständiger Ruhe zurückkehrt.

Messungen der relativen Weglänge

Für konkrete Messungen kann der Versuchsaufbau angepasst werden. Ein erster Test zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten einer Stahlschraube hat eindrucksvoll gezeigt, wie empfindlich das Interferometer auf kleinste Weglängenänderungen reagiert. Dazu wird einer der beiden Spiegel in einem frei beweglichen Reiter montiert, der durch eine Schraube mit einem festen Reiter verbunden ist. Durch das Einschrauben der Schraube in den festen Reiter und das Einschlagen eines Magneten in den beweglichen Reiter wird die Verbindung hergestellt.

Nach der Justage und dem Einstellen des Interferenzmusters wird unter der Schraube ein Teelicht entzündet, um die Schraube zu erwärmen. Die relative Weglänge verlängert sich dadurch, wodurch die Interferenzringe kleiner werden und in der Mitte verschwinden. Nach dem Löschen der Kerze entstehen in der Mitte neue Interferenzringe, die nach außen wandern. Jede Veränderung entspricht einer halben Wellenlänge.

Alternativ kann ein Piezo-Wandler verwendet werden, der auf den Spiegelhalter vor dem Spiegel geklebt wird. Mit einer Spannungsquelle können so Weglängen im Mikrometerbereich erzeugt werden.

5 Zusammenfassung

Die gängigen Demonstrationsinterferometer der Lehrmittelfirmen kosten mittlere vierstellige Beträge und bieten eine schnelle und einfache Justage. Mit dem hier vorgestellten Versuchsaufbau wurde ein modulares Interferometersystem entwickelt, das kostengünstig selbst gefertigt werden kann. Je nach Auswahl der Komponenten entstehen Kosten von maximal 150 Euro. Zusätzlich ist die Druck- und Montagezeit einzuplanen. Der Aufbau und die Justage des Interferometers sind in wenigen Minuten realisierbar. Anders als herkömmliche Aufbauten kann das System modular erweitert und individuell modifiziert werden.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Prof. Bruno Rager für seine wertvolle Unterstützung bei der Entwicklung und Perfektionierung der einzelnen Komponenten sowie für die ständige pädagogische Betreuung.

Ebenso gilt mein großer Dank Harald Hochwald vom Stadtmedienzentrum für seine didaktischen und fachlichen Anregungen sowie Tobias Reinsch und Ronny Nawroth (Universität Stuttgart) für die Beantwortung zahlreicher Fragen.

Abbildungen

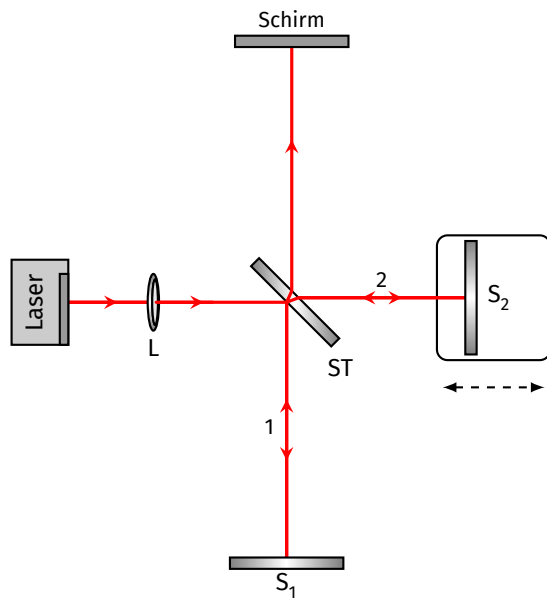


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Michelson-Interferometers

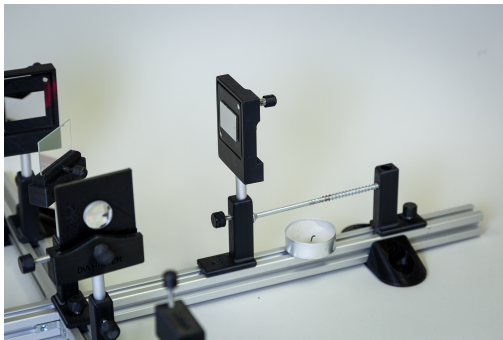


Abbildung 5: Interferometer mit einem frei gelagerten Spiegel

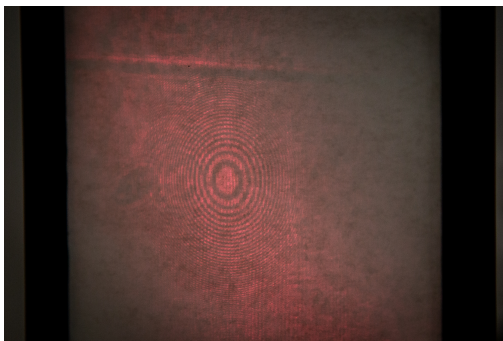


Abbildung 6: Interferenzmuster mit Ringen konstruktiver und destruktiver Interferenz

Tabellen

Tabelle 1: 3D-Druckdateien

Anzahl	Dateiname
4	base_100.stl
1 (opt)	base_150.stl
1 (opt)	bpw34_halter.stl
1 (opt)	bpw34_lochblende_1mm.stl
1 (opt)	bpw34_lochblende_2mm.stl
1	dialhalter.stl
1 (opt)	hoehenfinder_einsatz_weiss.stl
1 (opt)	hoehenfinder_reiter.stl
1 (opt)	hoehenfinder.stl
1 (opt)	konstantstrom_wuen_box.stl
1 (opt)	konstantstrom_wuen_deckel.stl
1 (opt)	lasermodul_halter_einfach.stl
1 (opt)	lasermodul_halter_pictronic.stl
1	laserpointer.stl
1	linse_dia_+265_d18.stl
6-7	m3_raendel_hex.stl
14	m4_raendel_hex.stl
3	m6_raendel_hex.stl
1 (opt)	polfilter1.stl
1 (opt)	polfilter2.stl
1 (opt)	polfilter3.stl
1 (opt)	reiter_b-2020-8_innut_magnet.stl
6-7	reiter_b-2020-8_innut.stl
1	schirm_oben.stl
1	schirm_unten.stl
2	spiegel_deckel.stl
2	spiegel.stl
1	strahlteiler_deckel.stl
1	strahlteiler.stl

Tabelle 2: Materialliste pro Aufbau

Anzahl	Materialien
1x120	Alu-Nutprofil 20x20 B-Typ Nut 6
2x20	Eckverbinder
1	Laserpointer (z.B. 532nm, 650nm)
1	Lasermodul Punktlaser rot 650nm 1mW (ggfls. mit Stromversorgung)
2	Vorderflächenspiegel 20x30
1	Teildurchl. Vorderfl.spiegel 30x40
1	2-Linser, $f = 26,5 \text{ mm}$, $d = 15 \text{ mm}$
4 - 5	Magnet rund $d = 4 \text{ mm}$, 2 mm , N35
6 - 7	Zylinderkopfschraube M3 30mm Stahl
6 - 7	Zylinderkopfschraube M4 16mm
6 - 7	Zylinderkopfschraube M4 12mm
1	Transparentpapier A4

Tabelle 3: Schrauben und Gewinde

Bauteil	Gewinde	Schraube
Reiter	2xM4	1xM4-16, 1xM4-12
Spiegelhalter	2xM3	2xM3-30 Stahl (magnetisierbar)
Strahlteiler	1xM3	1xM3
Dialhalter	1xM4	1xM4-12
Lasermodul	2xM3	2xM3
Laserpointer	3xM6	3xM6
Höhenfinder	1xM4	1xM4-12