

Wellenoptik

Interferometrie auf dem Küchentisch

KLAUS-PETER MÖLLMANN | MICHAEL VOLLMER

Bei Interferometrie denkt man an teure Aufbauten. Doch es geht verblüffend einfach: Laserpointer, Glasplättchen, Linse, Knetgummi, Küchentisch – fertig ist das Interferometer. Auf diese Weise lassen sich für Schulversuche schnell Jamin-, Michelson- oder Mach-Zehnder-Interferometer aufbauen.

Interferometer werden in Wissenschaft und Technik vielfältig eingesetzt. Man misst mit ihnen zum Beispiel kleine Abstände, bestimmt die Brechzahlen von Gasen, prüft die Qualität von optischen Bauteilen wie etwa Linsen oder erfasst Oberflächenrauigkeiten. Doch trotz ihrer Verbreitung und sehr guter Unterrichtsanregungen [1] werden Interferometer kaum an Schulen in der Lehre eingesetzt. Wahrscheinlich liegt das an einigen Vorurteilen. Interferometer gelten als schwierig zu realisieren, vermeintlich bestehen sie aus teuren Einzelkomponenten und haben einen komplizierten Aufbau. So wird meist vorausgesetzt, dass man optische Tische benötige oder zumindest optische „Breadboards“. In den Praktikumsversuchen an Hochschulen sind Interferometer tatsächlich häufig so aufgebaut.

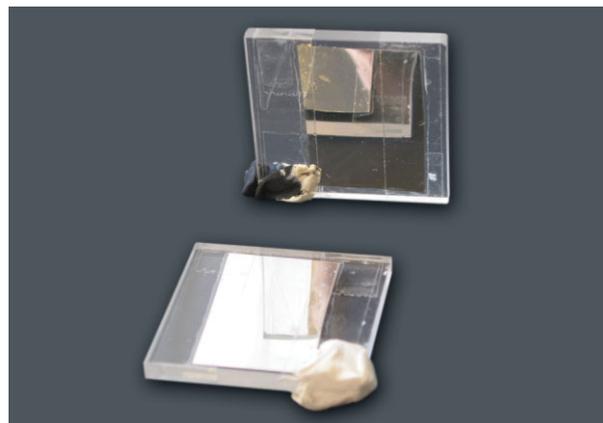
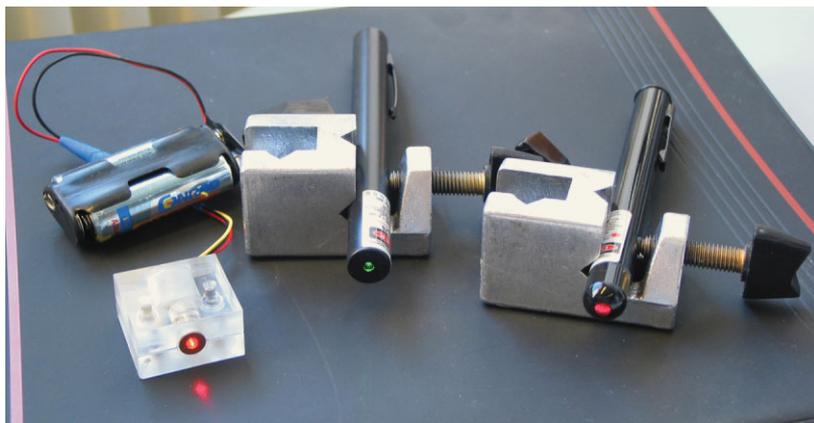
Wir wollen hier Aufbauten vorstellen, die deutlich einfacher und preiswerter sind und trotzdem verblüffend gut funktionieren. Anstelle des Breadboards genügt uns im einfachsten Fall ein völlig normaler Tisch, etwa ein Küchentisch. Die festgeschraubten Halterungen oder Magnethalterungen können wir durch Knete ersetzen, die hochpräzisen

Strahlteiler durch Mikroskopträger-Glasplättchen und die Spiegel entweder durch kleine Stücke von Haushaltsspiegeln oder Spiegelfolie. Alufolie funktioniert allerdings nicht, weil ihre Oberfläche zu rau ist.

Interferenzbilder macht man üblicherweise sichtbar, indem man sie durch eine kurzbrennweitige Linse vergrößert auf einen Schirm abbildet. Die entsprechende Linse können wir beispielsweise durch ein Mikroskopokular ersetzen. Als Schirm kann eine Wand oder ein Blatt Papier dienen. Die häufig als kohärente Lichtquelle eingesetzten He-Ne-Laser ersetzen wir durch einen deutlich preiswerteren Laserpointer oder einfache Halbleiterlaser. Die Versuche, die wir hier vorstellen, haben wir mit einem grünen Laserpointer (frequenzverdoppelter NdYag-Laser, $\lambda = 532 \text{ nm}$, $P = 6,5 \text{ mW}$), einem roten Laserpointer (650 nm , $5,5 \text{ mW}$) und einem Aufbausatz eines roten Halbleiterlasers (650 nm , 1 mW) getestet. Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung aller nötigen Komponenten.

Jamin-Interferometer

Am einfachsten lässt sich ein Jamin-Interferometer aufbauen (Abbildung 2). Dazu richten wir den Laserstrahl auf die planparallele Glasplatte, die wir in einen Winkel von 45° zum Strahl justieren. Er wird an ihrer Vorderseite und zusätzlich nach Brechung auch an ihrer Rückseite um etwa 90° reflektiert. Die beiden Teilstrahlen sind seitlich gegeneinander versetzt, der Versatz hängt von der Dicke des Plättchens ab (Abbildung 2). Nach dem Durchlaufen einer



zweiten Glasplatte, die zur ersten parallel orientiert ist und die gleiche Dicke hat, können die beiden Teilstrahlen miteinander interferieren. Für ein weiterführendes Experiment könnte man nun eine Probe in einen der beiden Lichtwege setzen.

Um das entstehende Interferenzmuster besser sichtbar zu machen, kann man das Jamin-Interferometer mit einem divergenten Laserstrahl beleuchten, den man durch eine Linse aufweitet. Nach einer Aufbau- und Justagezeit, die nach unseren Tests ein bis zwei Minuten beansprucht, sind auf einem Schirm sofort und deutlich Interferenzmuster erkennbar (Abbildung 2). Damit sich das Experiment besser fotografieren lässt, haben wir für die hier gezeigten Fotos einen leistungsstarken grünen Laserpointer verwendet. Alle hier vorgestellten Experimente lassen sich aber auch mit roten Lasern durchführen, dazu muss man den Raum allerdings abdunkeln.

Michelson-Interferometer

Viel gebräuchlicher als das Jamin-Interferometer ist das Michelson-Interferometer. Abbildung 3 zeigt das Prinzip und die von uns realisierte Küchentischvariante. Ein Laserstrahl fällt auf einen Strahlteiler, für den wir hier wieder eine einfache planparallele Glasplatte verwenden. Sowohl der durchgehende als auch der abgelenkte Teilstrahl werden an den Spiegeln reflektiert und treffen wieder am selben Punkt des Strahlteilers auf. Dabei überlagern sich die Lichtwellen der beiden optischen Lichtwege, und es entstehen sowohl in Richtung des Schirms als auch in Richtung der Lichtquelle Interferenzmuster.

Das Interferometer justiert man am besten auf Kolinearität, noch bevor man eine Linse zur Strahlaufweitung einbaut. Dann ist das Beugungsbild im Allgemeinen schon zu sehen oder erscheint nach winzigen Justagearbeiten. In der Praxis erweist es sich nämlich als einfacher, zwei sehr kleine Spots kolinear zu überlagern als aufgeweitete Strahlen. Erst nach der Justage schieben wir die Linse zwischen Strahlteiler und Schirm, um den Fleck zu verbreitern und das Interferenzmuster besser sichtbar zu machen.

Nach unserer Erfahrung reichen wieder wenige Minuten für Aufbau und Justage. Danach hat man die Teilstrah-

len ausreichend kolinear überlagert und findet recht schnell das charakteristische Interferenzmuster. Im Vergleich zum stabileren Laboraufbau auf einer optischen Bank ist es allerdings schwierig, das Kreisringssystem mit dem zentralen Punkt sichtbar zu machen. Im Allgemeinen wird man einen Ausschnitt der Ringmuster weit außen sehen (Abbildung 3 unten).

Unter Umständen kann man schon Interferenzmuster sehen, bevor man die beiden Strahlen justiert hat. Sie entstehen durch die Überlagerung anderer Teilstrahlen, die von der Vorder- und der Rückseite des Strahlteilers reflektiert werden. Diese Interferenzmuster sind im Allgemeinen nicht so ausgeprägt wie das Muster des Michelson-Aufbaus.

Unser einfacher Aufbau unterscheidet sich von den aufwendigeren Laboraufbauten vor allem darin, dass wir den optisch hochpräzisen 50:50-Strahlteiler durch eine einfache Glasplatte ersetzen. Typischerweise liegt deren Reflektivität bei etwa vier Prozent an jeder der beiden Grenzflächen. Beim Labor-Interferometer haben die beiden überlagerten Teilstrahlen je etwa 25 % der Ausgangsleistung des Lasers, in unserem Fall sind es wegen des Plättchens dagegen nur je etwa $0,04 \cdot 0,96^2 = 0,035$. Für einen weiteren Verlust sorgt die geringere Reflektivität der Spiegelfolie, weshalb am Ende nur etwa $1/7$ der Ausgangsleistung eines konventionellen Labor-Interferometers für das Muster zur Verfügung stehen. Diese Lichtmenge ist jedoch auch bei einem roten Laser von 1 mW Leistung ausreichend, um die Interferenz in einem abgedunkelten Raum beobachten zu können.

Heiße Luft

Mit unserem Aufbau können wir sogar qualitative oder halbquantitative Messungen an Proben machen. Wir können beispielsweise die Luft in einem Arm des Interferometers durch ein brennendes Streichholz kurzzeitig um einige hundert Grad erwärmen. Ist die von der Flamme überdeckte Strecke ΔL entlang des Teilstrahls etwa 2 cm lang, dann kann man ein Wandern des Musters um 8 bis 10 Interferenzstreifen beobachten.

Das entspricht in etwa der theoretischen Abschätzung, denn die Änderung der optischen Weglänge $L \cdot n$ (n ist der Brechungsindex) hängt von der Zahl der durchgelaufenen

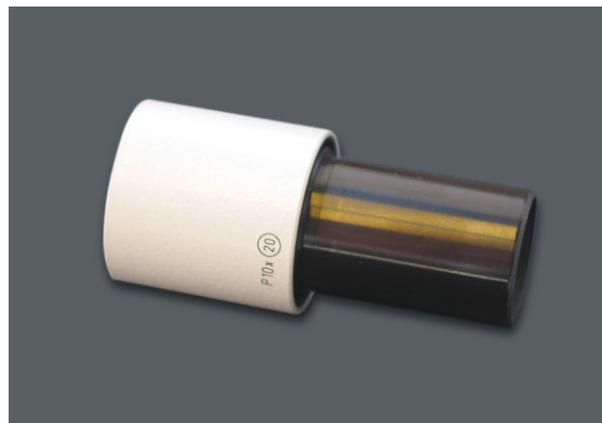
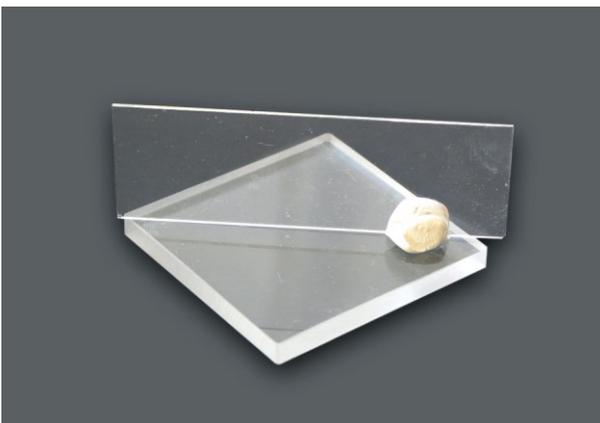


Abb. 1 Einzelkomponenten der Interferometer, ganz rechts ist das Okular.

ABB. 2 | JAMIN-INTERFEROMETER

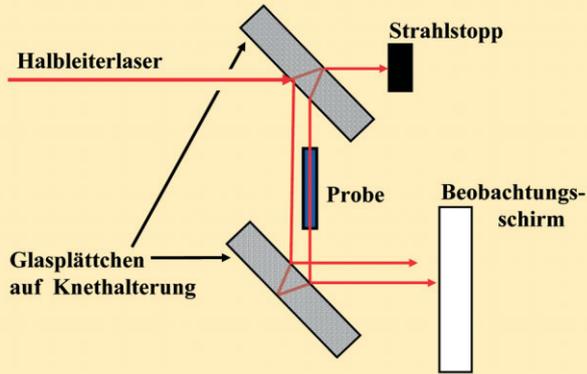
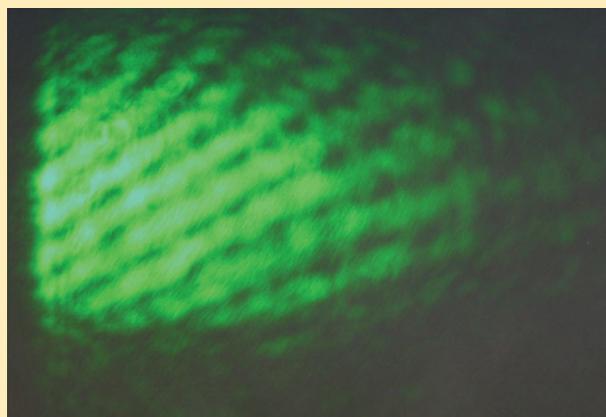
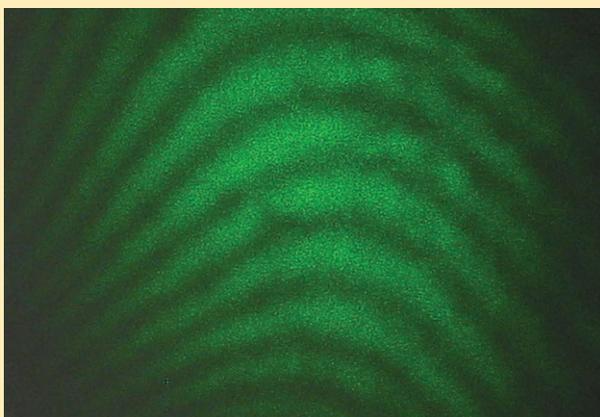
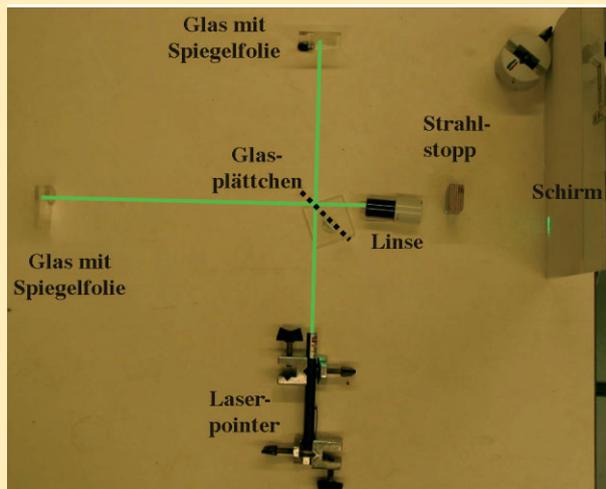
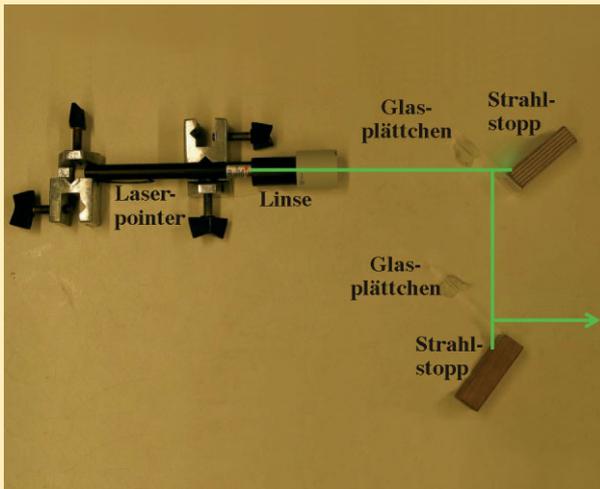
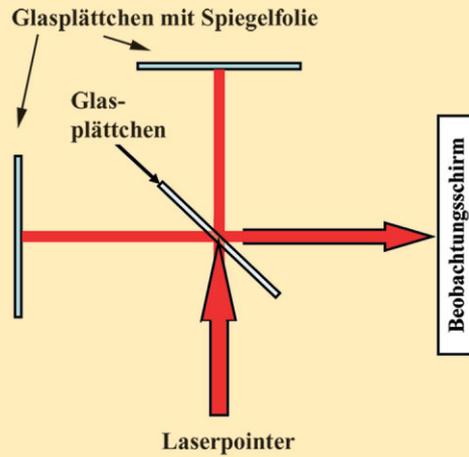


ABB. 3 | MICHELSON-INTERFEROMETER



Prinzipieller und realisierter Aufbau eines einfachen Jamin-Interferometers. Unten: Ausschnitt aus dem Interferenzmuster.

Prinzipieller und realisierter Aufbau eines einfachen Michelson-Interferometers. Unten: Ausschnitt aus dem Interferenzmuster.

Ringe N und der verwendeten Wellenlänge ab. Wenn die Gesamtlänge des Interferometerarms L und die Brechzahl bei tiefer Temperatur n_0 beträgt, so gilt

$$\Delta(L \cdot n) = L \cdot n_0 - [(L - \Delta L) n_0 + \Delta L (n_0 - \Delta n)] = \Delta L \cdot \Delta n = \Delta N (\lambda/2).$$

Die Flamme änderte die Dichte der Luft also auf einer Strecke von $\Delta L \approx 2$ cm. Bei $N = 8$ und $\lambda = 532$ nm entspricht das einer Änderung der Brechzahl von etwa 10^{-4} . Theoretisch hätte man für trockene Luft

$$n = 1 + \frac{77,6 \cdot p}{T} \cdot 10^{-6}$$

erwartet (mit p in Hektopascal und T in Kelvin). Das entspricht bei $p \approx 1000$ hPa und $T_0 = 293$ K (20 °C) und geschätzter Flammtemperatur von $T_F = 800$ K in der Tat $\Delta n \approx 1,6 \cdot 10^{-4}$. Angesichts der Ungenauigkeiten in ΔL und ΔT ist diese Übereinstimmung sehr gut.

Mit den einfachen Mitteln, die wir hier vorgestellt haben, kann man sogar ein Mach-Zehnder-Interferometer aufbauen. Allerdings ist dessen Justage etwas schwieriger.

Zusammenfassung

Bei Interferometrie denkt man an teure optische Aufbauten. Doch für Schulversuche geht es viel einfacher. Auf einem Küchentisch lassen sich mit Laserpointern oder Laserdioden, Glasplättchen, Spiegeln, Linse und Knetgummi in wenigen Minuten komplette Interferometer aufbauen. Wir konnten das mit funktionsfähigen Jamin-, Michelson- und Mach-Zehnder-

Interferometern demonstrieren. Sie erlauben sogar Versuche mit Proben, zum Beispiel die Bestimmung der Brechzahl von erhitzter Luft.

Stichworte

Michelson-Interferometer, Jamin-Interferometer, Mach-Zehnder-Interferometer, Brechzahl, Schulversuch.

Literatur

- [1] G. Koppelman, P. Moest, S. Pfaffe, Praxis Naturwiss. Physik **1985**, 34(2), 21.

Die Autoren



Klaus-Peter Möllmann, geb. 1956, Studium der Physik in Berlin, dort Promotion und Habilitation, seit 1994 Professor für Experimentalphysik an der FH Brandenburg.



Michael Vollmer, geb. 1957, Studium der Physik in Heidelberg, dort Promotion und Habilitation, seit 1994 Professor für Experimentalphysik an der FH Brandenburg.

Anschrift

K.-P. Möllmann und M. Vollmer, Physikalische Technik, Fachhochschule Brandenburg, Magdeburger Straße 50, 14770 Brandenburg. nachname@fh-brandenburg.de