

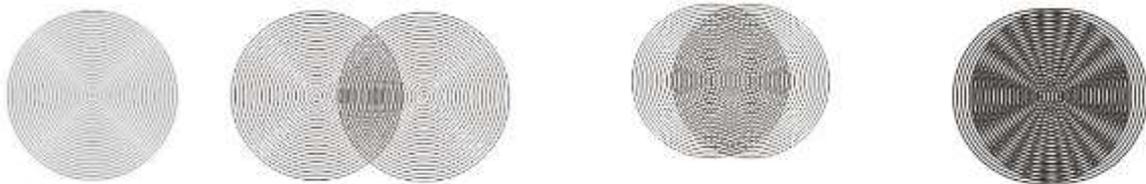
3. Der Mensch im Flutlicht

Einige theoretische und praktische Erklärungen.

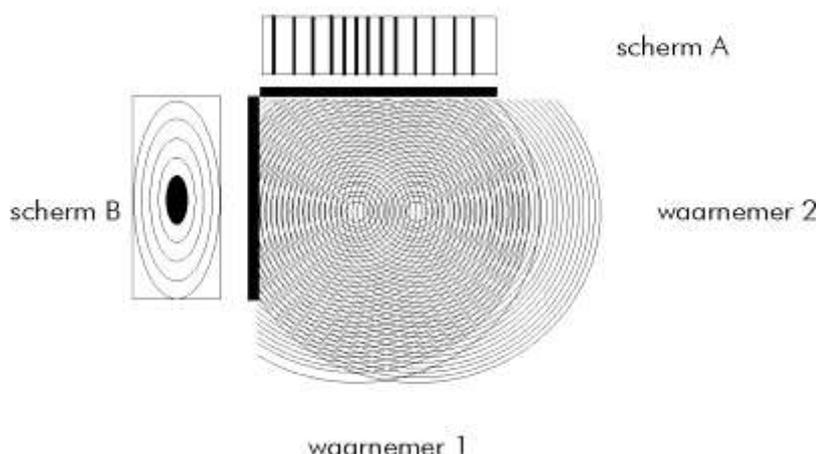
Eine detailliertere Beschreibung der Experimente wird hier gegeben, für diejenigen, die sie technisch verstehen wollen, und möglicherweise für diejenigen, die sie selbst nachmachen wollen. Zunächst werden wir uns etwas näher mit dem Thema der optischen Interferenz befassen.

Optische Interferenz

Zwei kohärente Lichtpunkte, die sehr nahe beieinander liegen, erzeugen Lichtwellen, die sich wie viele konzentrische Kugeln immer weiter ausdehnen und miteinander vermischen. Veranschaulichen Sie dies mit zwei Folien, auf denen eine Reihe von konzentrischen Kreisen aufgedruckt ist, und schieben Sie die Folien nach und nach übereinander. Sie scheinen eine Art Moiré-Muster zu bilden.



Das Papier zeigt all dies in einer flachen Ebene, in zwei Dimensionen. Im Grunde genommen handelt es sich jedoch nicht um Kreise, sondern um sich ausdehnende Sphären, die noch eine räumliche und eine zeitliche Dimension haben.



Oben sehen wir eine Draufsicht auf zwei kohärente monochromatische Punktlichtquellen, nennen wir sie A und B, die sehr nahe beieinander liegen. Der horizontale und der vertikale schwarze Streifen stellen jeweils die Draufsicht auf eine Projektionsfläche dar. Die Bildschirme

A und B sind die gleichen Bildschirme, aber jetzt leicht aufgeklappt, sagen wir in einem Winkel von 45° , so dass wir sehen können, was auf sie projiziert wird.

Vom Standpunkt des Beobachters 1 aus gesehen liegen die Lichtquellen A und B nebeneinander. Auf dem Bildschirm A werden eine Reihe paralleler Interferenzlinien zu sehen sein, was uns zu den Interferenzexperimenten von Young und Fresnel führt.

Vom Standpunkt des Beobachters 2 aus gesehen liegen die Lichtquellen A und B jedoch hintereinander. Auf der Projektionsfläche B sind einige konzentrische Kreise zu sehen, die sich auf die Newtonschen Ringe beziehen.

Lassen Sie uns versuchen, dies zu klären. Die folgenden Bilder sind Details zu den soeben genannten Bildern.

Sehen wir uns zunächst Bildschirm A an.

Oben in der Mitte sehen wir eine dunkle Linie, die Linie der destruktiven Interferenz. Punkt C liegt auf dieser Linie. Alle Lichtstrahlen von A und B, die die Linie bilden, in der C liegt, wie die Lichtstrahlen 1 und 2, haben eine entgegengesetzte Phase und löschen sich gegenseitig aus.

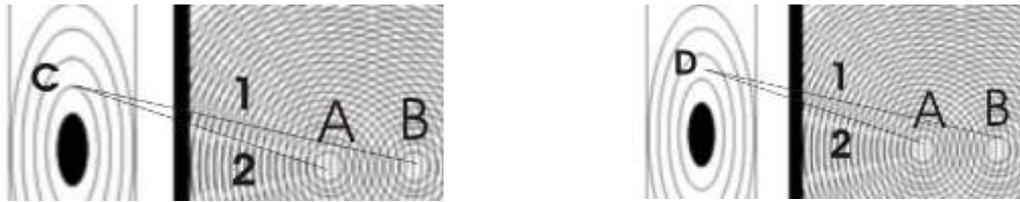
Der Punkt D in der Abbildung rechts fällt auf ein breiteres Lichtband, eine Linie der konstruktiven Interferenz. Alle Lichtstrahlen von A und B, die die Linie bilden, in der D liegt, wie die Lichtstrahlen 1 und 2, haben die gleiche Phase und verstärken sich gegenseitig. Das Licht ist dort viel intensiver.



Sehen wir uns nun Bildschirm B an.

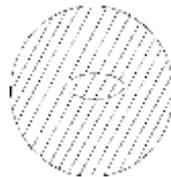
Der Punkt C auf dem linken Bild fällt auf einen dunklen Kreis, einen Kreis der destruktiven Interferenz. Alle Lichtstrahlen von A und B, die den Kreis C bilden, wie die Lichtstrahlen 1 und 2, haben eine entgegengesetzte Phase und löschen sich gegenseitig aus.

Der Punkt D in der Abbildung rechts fällt auf einen größeren Lichtkreis, einen Kreis der konstruktiven Interferenz. Alle Lichtstrahlen von A und B, die den Kreis D bilden, wie die Lichtstrahlen 1 und 2, haben die gleiche Phase und verstärken sich gegenseitig. Das Licht ist dort viel intensiver.



Wenn man sich allmählich von der Position des Beobachters 1 zu der des Beobachters 2 bewegt, verwandeln sich diese zunächst parallelen Linien theoretisch allmählich in Kurven, bis sie schließlich zu konzentrischen Kreisen werden.

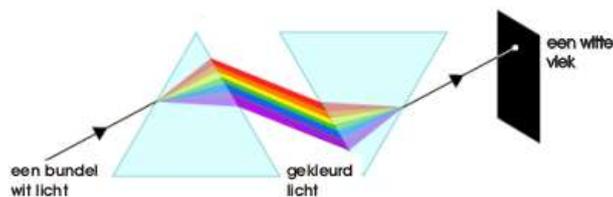
Bei einer bestimmten Form der Interferenzmikroskopie wird das Sichtfeld so eingestellt, dass es mit vielen Linien destruktiver Interferenz gefüllt ist. Eine transparente Bakterie, die in den Lichtweg gebracht wird, bremst das Licht, wodurch diese Linien leicht verzerrt und verschoben werden. Dies gibt Aufschluss über den Standort, die Form und die Dicke des Bakteriums.



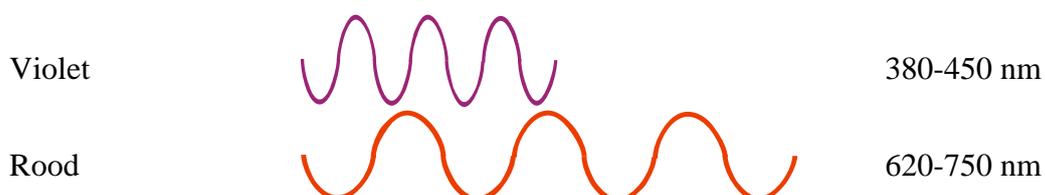
Wenn man die beiden Lichtquellen noch näher zusammenbringt, werden diese Kreise auf Bildschirm B immer größer. Schließlich wird der zentrale Ring so groß sein, dass er das gesamte Blickfeld des Beobachters ausfüllt. Dies wird im Angelsächsischen als "unendliche Randbreite" bezeichnet. Im Folgenden werden wir dies mit "IFW" abkürzen.

Etwas über Farben

Der brillante englische Physiker Isaac Newton (1643/1727) wies nach, dass Sonnenlicht, das durch ein Prisma fällt, in seine einzelnen Farben zerlegt wird. Ein zweites Prisma kann diese Farben wieder zu weißem Licht kombinieren.



Jede Farbe hat ihre eigene Wellenlänge. Die Wellenlänge von Rot beispielsweise (620-750 Nanometer) ist viel länger als die Wellenlänge von Violett (380-450 Nanometer).



Wit licht

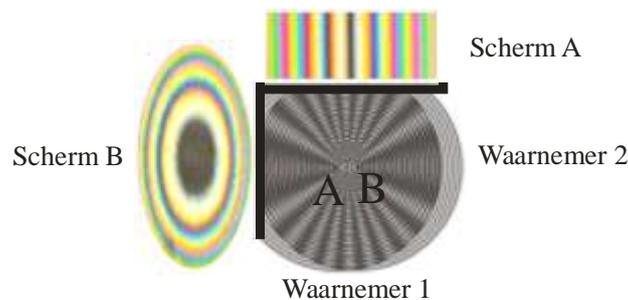


380-750 nm

Die "weiße" Punktlichtquelle S unten erzeugt alle Farben des Regenbogens. Da in einem Millimeter etwa zweitausend (!) Wellen enthalten sind, überlagern sich die verschiedenen Farben sehr schnell und es entsteht recht schnell wieder weißes Licht.



In unseren Experimenten arbeiten wir mit weißem Licht. So werden die Interferenzlinien und die Newton-Ringe auf unseren beiden Projektionsflächen ziemlich bunt aussehen. Wir bekommen:



Was in den Bildern mit unserer monochromatischen Lichtquelle schwarze Linien oder Kreise waren, sind jetzt Linien und Kreise in den Farben des Regenbogens.

Unten sehen Sie einen Ausschnitt von Bildschirm B und Bildschirm A. In der Mitte jedes Bildes ist eine rote Linie eingefügt. Wir sehen, dass die Hälften auf beiden Bildschirmen das Spiegelbild des jeweils anderen sind.



Wenn wir nun die blaue Farbe der Interferenzlinie 1 heranzoomen, finden wir links davon die rote Farbe. Wenn wir die Zeile 2 vergrößern, finden wir die rote Farbe rechts davon.

Lassen Sie uns einen Schritt weiter denken. Wir stellen uns so ein, dass die gesamte Oberfläche unseres Hauptspiegels mit einer einzigen Farbe des Spektrums gefüllt ist. Wenn wir dann den Lichtweg stören, indem wir z. B. unsere Hand direkt vor den Spiegel halten, wird die von unserer Hand ausgehende Erwärmung/Verdampfung den Lichtweg an dieser Stelle

verlangsamen und zu einer Verschiebung der Interferenzfarben führen. Es ist dann offensichtlich, dass diese Verschiebung in Abhängigkeit von der Interferenzlinie oder dem Interferenzkreis links oder rechts von der Linie oder dem Kreis der destruktiven Interferenz erfolgt. Mit anderen Worten: Es kommt darauf an, ob wir uns im Störungsbereich 1 oder 2 befinden.

Eine durch monochromatisches Licht verursachte Störung in einer Interferenzanordnung führt zu einer Verschiebung der Interferenzlinien. Wir haben dies am Beispiel der Bakterie im Mikroskop veranschaulicht.

Wenn wir mit weißem Licht arbeiten, ist eine solche Linie eine Ansammlung von Farben. Wenn wir unseren Aufbau so einstellen könnten, dass die Spiegeloberfläche mit einer einzigen Farbe einer einzigen Linie gefüllt ist, hätten wir guten Grund zu der Annahme, dass wir ein viel empfindlicheres Instrument erhalten würden. Dies ist letztlich die Grundidee für alle weiteren Experimente, die wir durchführen wollen.

Etwas Über Interferometer

Wie bereits erwähnt, wird das Licht in einem Interferometer in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die irgendwie gestört werden und sich dann wieder vereinigen, was zu Interferenzen und beobachtbaren Farbverschiebungen führt.

Verwendete Abkürzungen

S = Quelle, Punktlichtquelle.

M = Spiegel, Konkavspiegel, 155 mm Durchmesser, $f = \pm 1250$ mm

m = Mirror, kleiner flacher Spiegel, mit reflektierender Schicht auf der Oberseite

Bs = Strahlenteilerwürfel (beamsplitter) für sichtbares Licht, 50/50, 20 mm

E = Auge, Standort des Beobachters

v = Objektabstand

b = Bildabstand

B = Bildpunkt

K (der Großbuchstabe) = Mittelpunkt der Krümmung

k (der Kleinbuchstabe) = Abstand des Drehpunkts

La = Grüner Laser, notwendig zum Ausrichten der Bauteile. La wird hinter E platziert, so dass sich der Kopf beim Blick zwischen La und E befindet und die Gefahr, vom Laser geblendet zu werden, verringert wird. Es wird nach wie vor empfohlen, den Laser beim Suchen auszuschalten.

IFW: Infinite fringe width (Unendliche Streifenbreite): Ein Bild, bei dem die Spiegeloberfläche nur eine Farbe des Spektrums aufweist. Mit anderen Worten: Eine einzige Interferenzlinie ist so breit gestreut, dass M mit einer einzigen Farbe ausgefüllt ist.

Ein Radialinterferometer.

1. Algebraischer Ansatz.

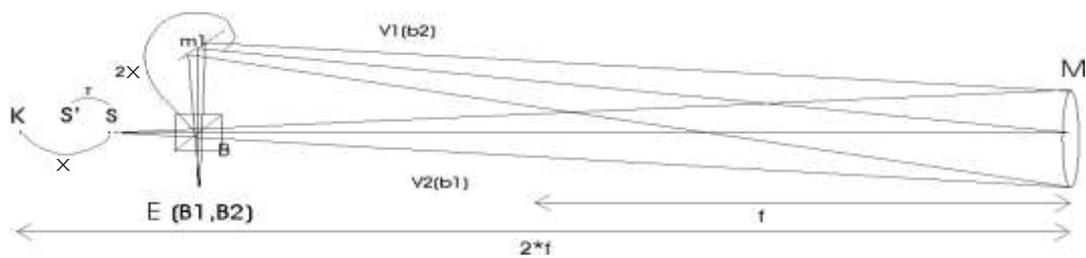
Für die Einrichtung gilt Folgendes:

a = Lichtweg von S nach M im Uhrzeigersinn

b = Lichtweg von S nach M im Gegenuhrzeigersinn

x = die Entfernung a - b

$$r = \sqrt{x^2 + f^2} - f$$



Wir nennen diese Einrichtung die "Grundeinrichtung". Wir stellen uns die punktförmige Lichtquelle als in S' befindlich vor und versuchen, die beiden Objektabstände algebraisch zu definieren.

Wir bekommen:

v1, die Objektentfernung im Uhrzeigersinn, ist gleich der Entfernung von S' zu S, dann zu B, m1 und M, oder: $v1 = 2*f - (x - r) + 2*x = 2*f + x + r$. (1)

v2, die Strecke gegen den Uhrzeigersinn, ist gleich der Strecke von S' nach S und weiter über B nach M oder: $v2 = 2*f - (x - r) = 2*f - x + r$ (2)

Über die Spiegelformel $1/f = 1/b + 1/v$ ergibt sich: $b = (v*f) / (v - f)$, so dass b1, die erste Bildentfernung, die zu v1 gehört und von M über B in Richtung E verläuft, gleich ist

$$b1 = (2*f - x + r)*f / (2*f - x - r - f) \quad (3)$$

Für b2, die zweite Bildentfernung, die zu v2 gehört und von M über m1 und B in Richtung E verläuft, ergibt sich

$$b2 = (2*f + x + r)*f / (2*f + x + r - f) \quad (4)$$

Wenn wir dann in der Zeichnung sehen, wo sich b1 befindet, sehen wir, dass der verfügbare Weg für b1 gleich v2 ist. Der Bildpunkt B1 (der Großbuchstabe zur Unterscheidung vom Kleinbuchstaben b1, dem Bildabstand) liegt also bei b1 - v2 von E, oder:

$$B1 = b1 - v2$$

Wenn wir analog die Position von b2 betrachten, sehen wir, dass der verfügbare Weg gleich v1 ist. Daher wird der Punkt B2 in der Entfernung b2 - v1 von E liegen.

$$B2 = b2 - v1$$

Wir ermitteln den Abstand D zwischen den beiden Bildpunkten B1 und B2, indem wir die Differenz zwischen diesen beiden Punkten bilden.

Wir bekommen:

$$D = B2 - B1 = (b2 - v1) - (b1 - v2) = (b2 - b1) - (v1 - v2) \quad (5)$$

Aus (1) und (2) ergibt sich:

$$(v1 - v2) = 2*f - x + r - 2*f + x - r = -2*x \quad (6)$$

$$\text{also können wir (5) umschreiben als: } D = (b2 - b1) + 2*x \quad (7)$$

Nun setzen wir in (7) für b2 und b1 die in (3) und (4) erhaltenen Werte ein:

$$D = ((2 \cdot f - x + r) \cdot f / (f - x + r)) - ((2 \cdot f + x + r) \cdot f / (f + x + r)) + 2 \cdot x$$

Nun rechnen wir diese Gleichung aus.

$$\begin{aligned} &= (((2f^2 - fx + fr) \cdot (f + x + r) - (2f^2 + fx + fr) \cdot (f - x + r)) / ((f - x + r) \cdot (f + x + r))) + 2x \\ &= (2f^3 + 2f^2x + 2f^2r - fx^2 - fxr + f^2r + fxr + fr^2) / ((f + x + r) \cdot (f - x + r)) - \\ &\quad (2f^3 - 2f^2x + 2f^2r + f^2x - fx^2 + fxr - f^2r - fxr + fr^2) / ((f + x + r) \cdot (f - x + r)) - 2x \\ &= (2f^2x / ((f + x + r) \cdot (f - x + r))) - 2x \\ &= (2f^2x / (f^2 - fx + fr + fx - xr + r^2)) - 2x \\ &= (2f^2x / (f^2 + 2fr + r^2 - x^2)) - 2x \\ &\text{oder } D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x \end{aligned} \tag{8}$$

Mit diesem letzten Ausdruck haben wir nun eine Formel, die uns sagt, in welchem Abstand sich die beiden Bildpunkte B1 und B2 in unserem Aufbau befinden, und zwar in Abhängigkeit von der Brennweite f unseres Spiegels M, vom Wert für x und von der radialen Verschiebung r unserer Punktlichtquelle.

In diesem Ausdruck setzen wir r auf 0, und wenn wir weiterrechnen, erhalten wir

$$\begin{aligned} D &= (2f^2x / (f^2 - x^2)) - 2x \\ D &= (2f^2x - 2x(f^2 - x^2)) / (f^2 - x^2) \\ D &= (2f^2x - 2xf^2 + 2x^3) / (f^2 - x^2) \\ D &= 2x^3 / (f^2 - x^2) \end{aligned}$$

Wir sehen, dass der Wert von D kleiner wird, wenn der Wert von x sinkt und/oder der Wert von f steigt. Wenn wir bei r = 0 die Bildpunkte B1 und B2 näher zusammenbringen wollen, müssen wir die Objektabstände v1 und v2 so weit wie möglich angleichen und mit Spiegeln mit langem(m) Brennpunkt arbeiten. Wie wichtig ein kleiner D-Wert ist, wird im Folgenden deutlich, wo gezeigt wird, dass wir dann mehr mechanischen Spielraum bei der Anpassung unseres Aufbaus haben.

Wir berechnen dies als Funktion des Abstands r, da dieser Wert in einer Anordnung am einfachsten verändert werden kann, indem man die Lichtquelle nach vorne oder hinten bewegt. Wenn wir dies ausgehend von der Gleichung in (8) ausrechnen, finden wir

$$\begin{aligned} D &= (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ oder:} \\ (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x &= 0 \end{aligned}$$

und wir arbeiten weiter daran:

$$\begin{aligned} 2f^2x / ((f+r)^2 - x^2) &= 2x, \text{ oder} \\ (f+r)^2 - x^2 &= 2f^2x / 2x \\ (f+r)^2 &= f^2 + x^2 \\ f + r &= \text{sqr}(x^2 + f^2), \text{ oder} \end{aligned}$$

$$r = (\text{sqr}(x^2 + f^2)) - f$$

Mit dieser letzten Formel haben wir, was wir brauchen: einen Nullwert für D in Abhängigkeit von r. Wenn also r die oben beschriebene Bedingung erfüllt, müssen theoretisch beide Bildpunkte B1 und B2 zusammenfallen.

2. Mathematischer Ansatz.

Lassen Sie uns dies anhand einiger konkreter Werte überprüfen.
 Durchmesser M = 155 mm, f = 1250 mm, Bs = 10mm³,
 Abstand m1 zum Mittelpunkt Bs = 10, dann 2x = 10mm und x = 5mm.
 Wenn B1 und B2 übereinstimmen sollen, muss r erfüllt sein:

$$r = \sqrt{f^2 + x^2} - f, \text{ oder}$$

$$r = \sqrt{1250^2 + 5^2} - 1250 = 0,01\text{mm.}$$

Bei r = 0,01, D = 0. Lassen Sie uns das überprüfen:

$$D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ oder}$$

$$D = (2 \cdot 1250^2 \cdot 5 / ((1250+0,01)^2 - 5^2)) - 2 \cdot 5 = 0 \text{ mm.}$$

Wir kommen weiter:

$$v1 = 2f + x + r \text{ oder } 2 \cdot 1250 + 5 + 0,01 = 2505,01$$

$$v2 = 2f - x + r \text{ oder } 2 \cdot 1250 - 5 + 0,01 = 2495,01$$

Über $1/f = 1/v + 1/b$ erhalten wir

$$b1 = (v1 \cdot f) / (v1 - f) \text{ oder } (2505,01 \cdot 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01$$

$$b2 = (v2 \cdot f) / (v2 - f) \text{ oder } (2495,01 \cdot 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01$$

Prüfen wir, wo in E die Punkte B1 und B2 liegen:

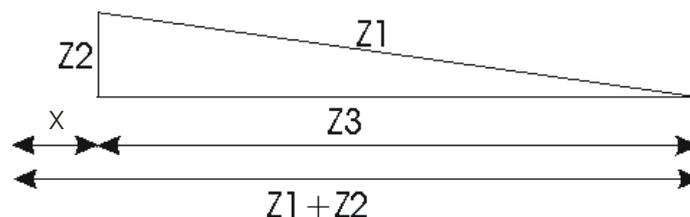
$$b2 - v1 = 2505,01 - 2505,01 = 0$$

$$b1 - v2 = 2495,01 - 2495,01 = 0$$

D ist dann ebenfalls 0, so dass B1 und B2 theoretisch genau übereinstimmen.

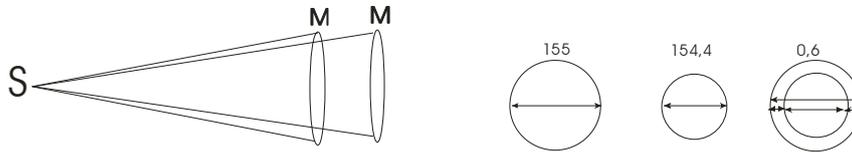
Die Grundidee dieser Art von Radialinterferometer ist sehr einfach.

Einerseits: Im rechtwinkligen Dreieck ist $z1 + z2 > z3$ und $z1 + z2 - z3 = x$.



Und andererseits: wenn $v < k$, dann $b > k$ und dann $v - b = x$.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir eine Art Radialinterferometer beschrieben und berechnet haben. Es handelt sich um ein Interferometer, weil sich zwei Lichtwege - im Uhrzeigersinn und gegen den Uhrzeigersinn - in E vereinen und weil diese Bilder nicht die gleiche Größe haben. Der Lichtweg M, Bs, E ist zwar kürzer als der Lichtweg M, m1, Bs, E. Dennoch fallen mit den gegebenen Werten theoretisch beide Bildpunkte zusammen.



3. Drei verschiedene Situationen

Im Folgenden werden die Folgen für Werte betrachtet, die leicht von den theoretisch berechneten abweichen. Mit anderen Worten: Wir sollten uns fragen, ob unser Konzept praktisch durchführbar ist. Nehmen wir zum Beispiel an, wir machen einen Fehler von einem Millimeter. Wir berechnen unseren Aufbau, wenn die Abstände 1 Millimeter zu kurz sind, wir vergleichen dies mit den Abständen, die genau der Theorie entsprechen, und schließlich, wenn sie 1 Millimeter zu lang sind. Um den Objekt- und den Bildabstand nicht zu verwechseln, ersetzen wir in der folgenden Zeichnung den Hohlspiegel durch eine Linse.

Situation 1: Die Abstände sind um 1 Millimeter zu kurz.

$$v1 = 2 * f + x + r - 1$$

$$v2 = 2 * f - x + r - 1$$

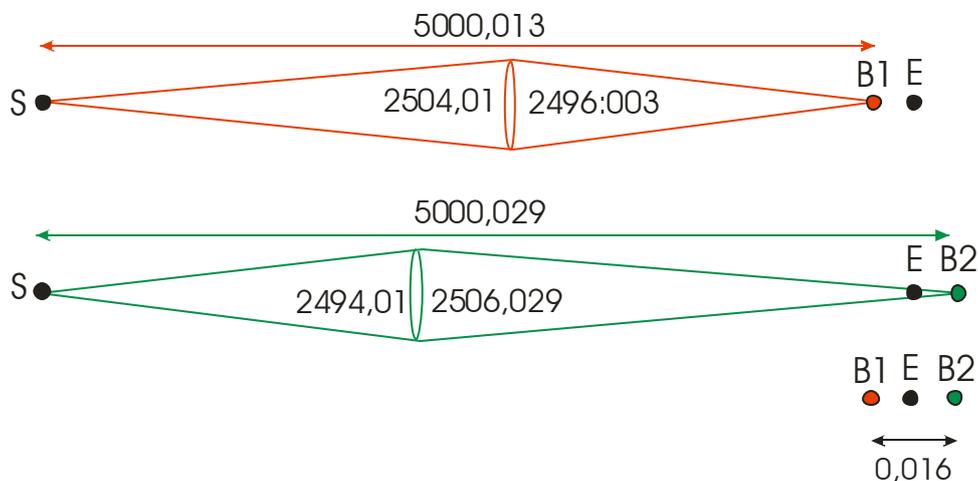
$$v1 = 2504,01 \quad b1 = (2504,01 * 1250) / (2504,01 - 1250) = 2496,003$$

$$v2 = 2494,01 \quad b2 = (2494,01 * 1250) / (2494,01 - 1250) = 2506,019$$

$$v1 + b1 = 2504,01 + 2496,003 = 5000,013$$

$$v2 + b2 = 2494,01 + 2506,019 = 5000,029$$

$$5000,029 - 5000,013 = 0,016$$



Denn $b_1 = 2496,003$, aber $v_2 = 2494,01$,
 B1 fällt auf $v_2 - b_1$ oder $2494,01 - 2496,003 = - 1,993$ über E

Da $b_2 = 2506,019$, aber $v_1 = 2504,01$,
 B2 fällt auf $v_1 - b_2$ oder $2504,01 - 2506,019 = - 2,009$ hinter E

B2 ist also weiter von E entfernt als B1,
 ihre gegenseitige Differenz ist $B_2 - B_1 = 2,009 - 1,993 = + 0,016$,

Situation 2: Die Abstände sind gleich.

$$v_1 = 2 * f + x + r$$

$$v_2 = 2 * f - x + r$$

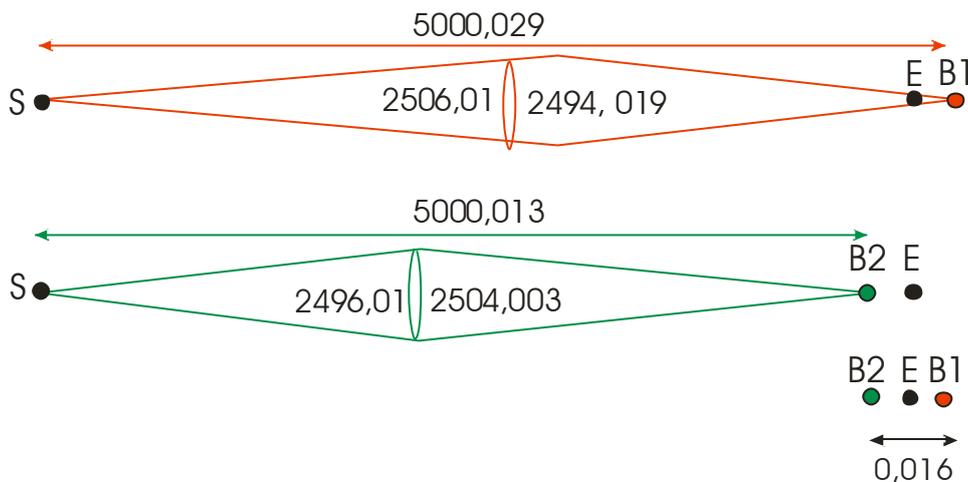
$$v_1 = 2505,01 \quad b_1 = (2505,01 * 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01$$

$$v_2 = 2495,01 \quad b_2 = (2495,01 * 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01$$

$$v_1 + b_1 = 2505,01 + 2495,01 = 5000,02$$

$$v_2 + b_2 = 2495,01 + 2505,01 = 5000,02$$

$$5000,02 - 5000,02 = 0,0$$



Da $b_1 = 2495,01$ und $v_2 = 2495,01$,
 B1 fällt auf $v_2 - b_1$ oder $2495,01 - 2495,01 = 0$ B1 fällt in E

Denn $b_2 = 2505,01$ und $v_1 = 2505,01$
 B2 fällt auf $v_1 - b_2$ oder $2505,01 - 2505,01 = 0$ fällt auf B2 in E

B2 und B1 stimmen also überein,
 ihre gegenseitige Differenz ist $B_2 - B_1 = 0$

Situation 3: Die Abstände sind um 1 Millimeter zu groß.

$$v_1 = 2 * f + x + r + 1$$

$$v_2 = 2 * f - x + r + 1$$

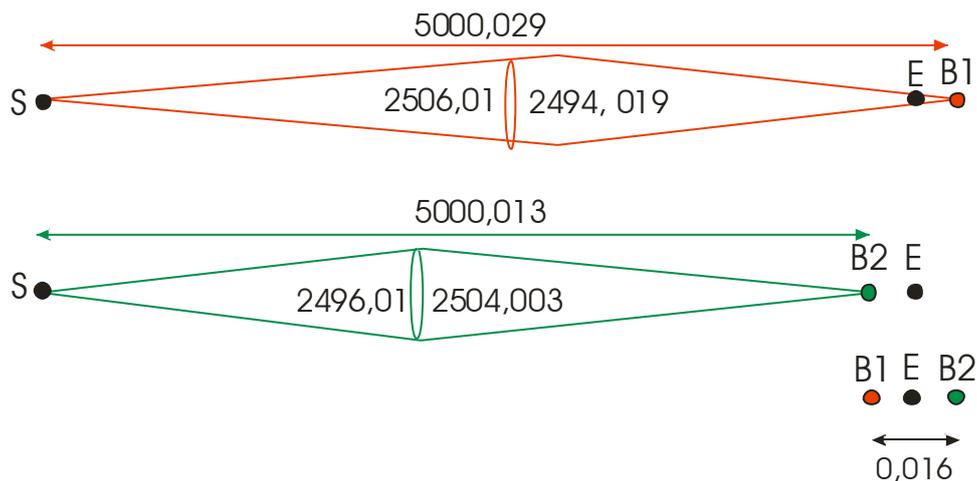
$$v_1 = 2506,01 \quad b_1 = (2506,01 * 1250) / (2506,01 - 1250) = 2494,019$$

$$v_2 = 2496,01 \quad b_2 = (2496,01 * 1250) / (2496,01 - 1250) = 2504,003$$

$$v_1 + b_1 = 2506,01 + 2494,019 = 5000,029$$

$$v_2 + b_2 = 2496,01 + 2504,003 = 5000,013$$

$$5000,029 - 5000,013 = - 0,016$$



Da $b_1 = 2494,019$, aber $v_2 = 2496,01$,
 B_1 fällt auf $v_2 - b_1$ oder $2496,01 - 2494,019 = 1,991$ für E

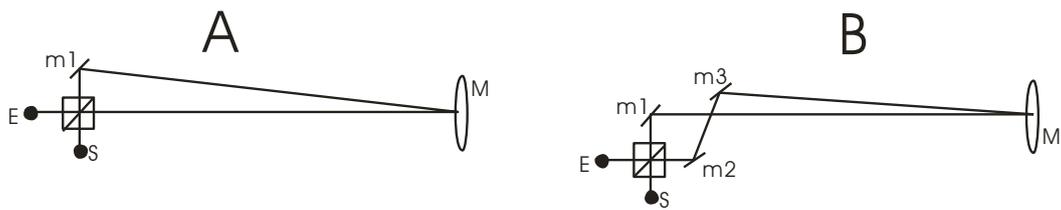
Da $b_2 = 2504,003$, aber $v_1 = 2506,01$,
 B_2 fällt auf $v_1 - b_2$ oder $2506,01 - 2504,003 = 2,007$ für E

B_2 ist also weiter von E entfernt als B_1 ,
 ihre gegenseitige Differenz beträgt $B_2 - B_1 = 1,991 - 2,007 = - 0,016$,

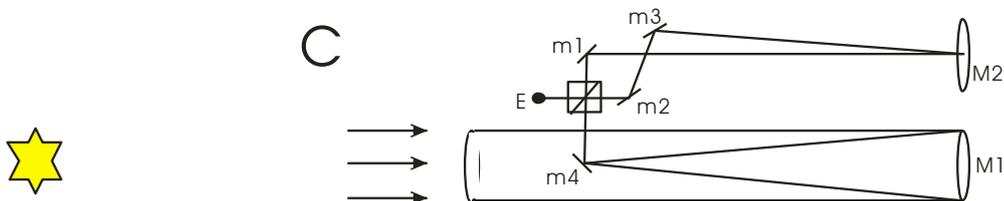
Wir verallgemeinern: In der Grundeinstellung können die Variablen so gewählt werden, dass B_2 relativ zum Spiegel M außergewöhnlich nahe nach B_1 liegt (1), dass beide zusammenfallen (2) oder dass B_2 außergewöhnlich nahe vor B_1 liegt (3). Mit anderen Worten: Theoretisch gibt es eine Möglichkeit, zwei Bildpunkte unglaublich nahe aneinander zu bringen oder sie sogar exakt zur Deckung zu bringen.

Auf diese Weise können die beiden Bildpunkte viel näher aneinander gebracht werden, als dies im klassischen Young'schen Zwei-Spalt-Experiment möglich ist.

Und noch etwas: In der Abbildung unten zeigt A den Grundaufbau: das Radialinterferometer. In B sehen wir wieder den Grundaufbau, aber jetzt mit gleichem Lichtweg, so dass die Radialität auf 0 zielt.



Man kann sich fragen, ob auch andere Anwendungen denkbar sind. Unter C haben wir zum Beispiel die Anordnung B mit einem Newtonschen Teleskop gekoppelt. Es stellt sich die Frage, ob sich aus dem vom Betrachter aufgenommenen Bild auch destruktive Interferenzen gewinnen lassen. In diesem Fall befinden wir uns jedoch auf professionellem Niveau, das viel weiter geht als das, was für einen Amateur möglich ist.



4. Erste Schritte

Vorab ein paar praktische Hinweise.

Ein ganzes Zimmer.

Bedenken Sie, dass für eine Aufstellung ein ganzer Raum benötigt wird, den wir auch verdunkeln können.

Die Punktlichtquelle.

Für S haben wir eine Punktlichtquelle mit einem Durchmesser von 0,3 mm verwendet. Wir befestigten ein Ende eines Glasfaserkabels in einem Stück Kunststoff-Elektorröhre, das wir mit einer Metallplatte (z. B. aus einer Getränkedose) verschlossen, und durchstachen es mit einer 0,3 mm dicken Akupunkturnadel. Schleifen Sie dann vorsichtig den gesamten Grat ab und überprüfen Sie ihn mit einem Mikroskop. Das andere Ende der Glasfaser wurde in einem gewissen Abstand (+/- 200 mm) zu einer Lampe (+/- 50 Watt) gehalten. Damit sollte vermieden werden, dass der Kunststoffhalter der Faser verbrennt. Wir haben keinen Ventilator benutzt, weil er störende Luftturbulenzen verursacht. Und aus demselben Grund wurde die Lampe nicht in den Lichtweg gestellt. Außerdem haben wir die Lampe in der Nähe von E mit einem Dimmer ausgestattet, damit wir die Lichtintensität erhöhen oder verringern können. Wir haben auch die Lichtquelle lichtdicht gemacht, um den Raum dunkel zu halten.

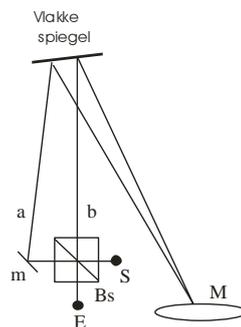
Ein Laser

Die Ausrichtung der einzelnen Aufbauten erfolgt mit einem Laser. Diese muss stark genug sein, denn bei manchen Aufbauten beträgt die Lichtstrecke bis zu 15 Meter. Je länger der Lichtweg ist, desto breiter und schwächer wird der Laserpunkt und desto schwieriger wird die

Ausrichtung. Wir platzieren den Laser hinter E, so dass das Laserlicht, wenn wir von E aus schauen, auf unseren Hinterkopf scheint. Wir vermeiden sorgfältig jedes Laserlicht im Auge. Ja, mit einem Schalter in der Hand schalten wir den Laser aus, bevor wir uns die Einrichtung ansehen.

Ein extra flacher Spiegel.

Wir wollen prüfen, was von unserer Hand zu sehen sein wird, wenn sie in einer solchen Anordnung direkt vor M platziert wird. Bei einem f-Wert von +/- 1250 mm und einem k-Wert von +/- 2500 mm ist dies natürlich nicht möglich. Um bei der Betrachtung der Hand nicht von anderen abhängig zu sein, platzieren wir einen zusätzlichen flachen Spiegel (Durchmesser +/- 100 mm) auf halber Strecke des Lichtwegs, so dass der Beobachter von E aus gesehen immer noch die Hand vor M halten und selbst sehen kann, was sich zeigt.



Der Hauptspiegel

Wir haben einen selbst geschliffenen Spiegel mit einem Durchmesser von 155 mm verwendet, was in etwa dem Standardwert für diejenigen entspricht, die an einer bekannten Sternwarte einen Kurs im Spiegelpolieren belegen, um ein Newton-Teleskop zu bauen.

Einige Spiegel

Außerdem benötigen wir einige Spiegel mit einer reflektierenden Schicht auf der Oberseite, um Fehler zu vermeiden, die dadurch entstehen, dass das Licht das Glas unterschiedlich durchdringen muss. Ihre Größe hängt von ihrer Position in der Aufstellung ab. Wenn sie sich in der Nähe von Bs befinden, sind 15*15 mm ausreichend. Wir selbst brauchten einige Spiegel von 15*100 mm. Dies wird später erklärt.

Drei größere Hilfsspiegel (H1, H2 und H3)

Diese gewöhnlichen Spiegel werden uns bei der Ausrichtung schwierigerer Aufstellungen helfen. Wir haben Spiegel von etwa 100 mm * 900 mm verwendet, mit der reflektierenden Schicht auf der Rückseite. Sie sind an einem Balken befestigt, der nicht wenig länger ist. Wir haben sie von alten Spiegelschränken übernommen, die man z.B. über Waschbecken oder auf Schranktüren stellt. Obwohl sie nach hochwertigen optischen Standards nicht wirklich "flach" sind, genügen sie in der Regel für unsere Zwecke.

4.1. Die Grundausrüstung

Der grundlegende Aufbau wurde unter 1. Der algebraische Ansatz erläutert. Auch die Verwendung eines zusätzlichen Planspiegels wurde erwähnt.

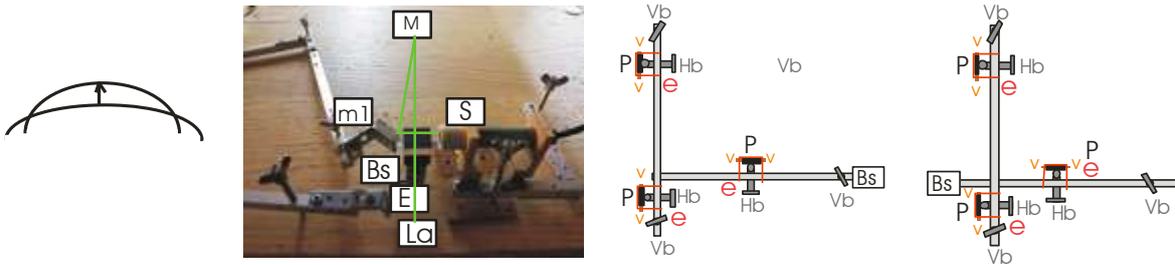
Da alle Teile in der gleichen "Ebene" liegen, ist dieser Aufbau relativ einfach zu bauen und mit einem Laser zu justieren. Bei diesem Aufbau spielt es beispielsweise keine Rolle, ob der Lichtweg B_s - m parallel zur optischen Bank verläuft oder nicht. Werden z. B. zwei Splitter oder mehrere kleine Spiegel verwendet, so wird die Einstellung, wie wir sehen werden, viel schwieriger.

Wenn Sie dieses Grundgerüst aufbauen, werden Sie bald eine Reihe von Interferenzlinien oder konzentrischen Kreisen feststellen. Man kann experimentieren, indem man den Wegunterschied zwischen den beiden Lichtwegen (s - B_s - m - M und s - B_s - M) vergrößert oder verkleinert. Störungen, Verzerrungen der Interferenzlinien durch z.B. das Einbringen einer brennenden Kerze, einer brennenden Zigarette oder der Hand in den Strahlengang, werden wahrnehmbar, wenn der Gangunterschied möglichst klein gehalten wird, d.h. wenn m und B_s sehr nahe beieinander liegen und der Abstand zu M genau der Berechnung entspricht. Wir selbst haben dafür immer den Foucaultschen Messertest verwendet. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass das Messer in E eine feste Position hatte und wir den Abstand zu M und m genauestens verändern konnten. Der Abstand zwischen m und B_s wird mit den Einstellschrauben verändert. Die Änderung der Entfernung von M nach E ist etwas schwieriger. Wir stellten M auf einen Wagen mit 4 Rädern und verbanden ihn mit einem längeren Balken, der unter die optische Bank fuhr, bis er in Reichweite des Beobachters in E war. Am anderen Ende des Strahls (bei E) wurden ein H_b und ein V_b angebracht, zusammen mit einem Bolzen, der den Spiegel M ein wenig näher oder weiter weg von E bewegen kann.



Man beachte, dass ein Radialinterferometer zwei ähnlich gestörte Wellen zusammenführt, die sich in ihrer Größe leicht unterscheiden. Versuchen wir, dies anhand der Zeichnung unten links zu veranschaulichen. Dort, wo sich die beiden Wellen "kreuzen", vermischen sie sich und es entstehen Farbunterschiede, die das Auge wahrnehmen kann.

Schauen wir uns das Bild (das zweite Bild unten) an, das schematisch einen Teil des Grundaufbaus zeigt. Mit einfachen Winkeleisen können m_1 und B_s grob entlang der gewünschten Achsen bewegt werden: der Spiegel m_1 entlang der x - und y -Achse, B_s entlang der x -, y - und z -Achse. Die Aluminiumstangen (Durchmesser: 10 mm²) können dann zur Feinabstimmung der gewünschten Teile verwendet werden. Die grüne Linie auf dem Foto wurde später angebracht und zeigt den Weg des Laserlichts. M befindet sich jedoch aufgrund seines großen f -werts außerhalb des Bildes.

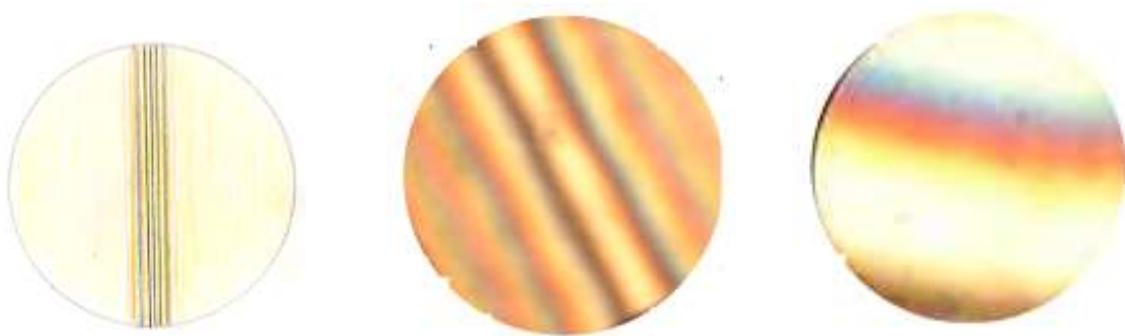


Das dritte Bild oben rechts zeigt z. B. Bs in einem modifizierten Halter. Beide "Hebel" sind aus Aluminium, haben einen Durchmesser von 10 mm² und sind etwa 400 mm lang. "Hb" steht für "Horizontale Schraube" (horizontale bout), "Vb" für "Vertikale Schraube"; (verticale bout). In das entstandene Loch wurde eine Kugel eingeklebt, um die Reibung zwischen dem Bolzen und der optischen Bank zu minimieren, wenn der Bolzen gedreht wird. Der Buchstabe "P" steht für ein festes, aufrechtes Brett, an dem sich der Bolzen beim Anziehen festsetzen kann. Der Buchstabe "e" steht für einen Spanner, der den Bolzen gegen das Regal drückt, und der Buchstabe "v" steht für eine kleine Schraube, an der der Spanner befestigt werden kann. Sie sehen, dass sich Bs durch das Zusammenspiel der 6 Bolzen nicht nur um seine 3 Achsen, sondern auch nach links, rechts, oben, unten, vorwärts oder rückwärts bewegen kann. Das sind alles Bewegungen, die wir brauchen werden.

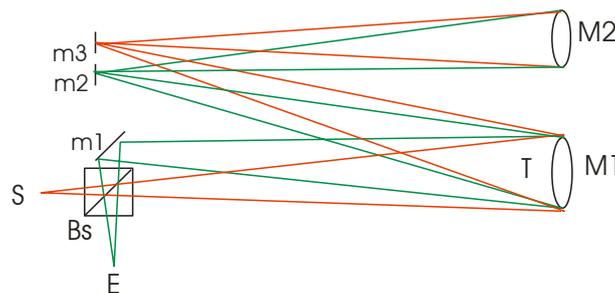
Die vierte Abbildung zeigt eine Variante eines Bs-Halters. Hier steht die Bs mehr im Mittelpunkt. Natürlich wählt man für jede Konstellation die praktikabelste Variante. Jeder kleine Spiegel, der Teil einer Einrichtung ist, muss ebenfalls in einem solchen Halter untergebracht werden.

Wenn eine Anlage nur aus wenigen Teilen besteht, wie z. B. die Grundanlage, dann ist sie relativ einfach zu bauen. Wenn ein Aufbau jedoch mehrere Teile erfordert, dann ist die optische Bank mit vielen Aluminiumstangen gefüllt, die sich oft gegenseitig im Weg zu stehen scheinen. Es erfordert dann etwas Einfallsreichtum, um alles benutzerfreundlich zu gestalten. Denken Sie daran, dass wir die Haupteinstellschrauben von E aus betätigen wollen. Das bedeutet, dass sie sich in Armlänge befinden müssen. Bei Aufbauten mit mehr als 1 Bs oder m sind auch zusätzliche flache Hilfsspiegel erforderlich. Beim Ausrichten müssen alle Laserstrahlen genau in einer Ebene liegen. Wir werden gleich darauf zurückkommen.



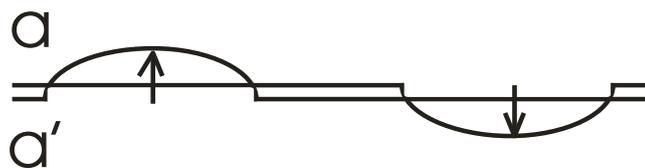


Eine Variante dieses Aufbaus (und einiger weiterer) besteht darin, das Licht ein zweites Mal durch die Störung "T", "T" der "Turbulenz", hier in der Regel unsere Hand, passieren zu lassen. Die Zeichnung unten zeigt zwar eine große Parallaxe, aber in der Praxis spielt dies keine große Rolle. Der Spiegel M1 ist 2500 mm von Bs entfernt, und m2 und m3 befinden sich in unmittelbarer Nähe von m1. Die Zeichnung ist also ganz und gar nicht proportional. Wir haben festgestellt, dass die Bildqualität dadurch weniger gut wurde. Das Licht legt hier tatsächlich eine Strecke von 15 Metern zurück. Im Prinzip kann dies kein Problem sein. Wir verwenden unsere Spiegel seit 25 Jahren und sie wurden noch nie neu beschichtet. Vielleicht spielt auch das eine Rolle.



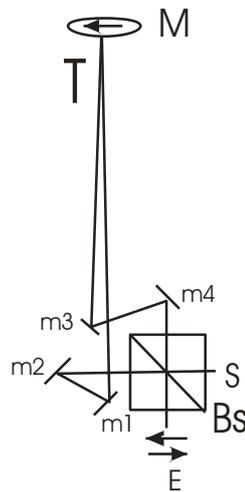
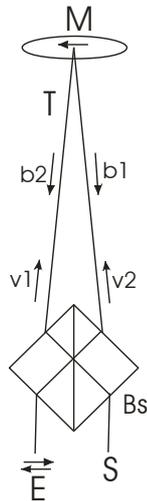
4.2. Ein Umkehrinterferometer ('reversal' interferometer)

Wie bereits erwähnt, wird bei einem Umkehrinterferometer die eine Hälfte des Bildes mit dem Spiegelbild der anderen Hälfte zusammengebracht. Wenn wir nicht mit der Hand über die Mittellinie des Spiegels fahren, interferiert eine gestörte Welle mit einer ungestörten Welle. Ihre gegenseitige Differenz, die jeweils durch den Pfeil unten angezeigt wird, ist viel größer als bei einem radialen Interferometer. Wir sehen also eine viel intensivere Farbverschiebung. Die Zeichnung im ersten Text bestätigt dies in der Tat: Wir sehen, dass die Verdampfung/Erwärmung der Hand zwei Interferenzlinien hervorbringt.

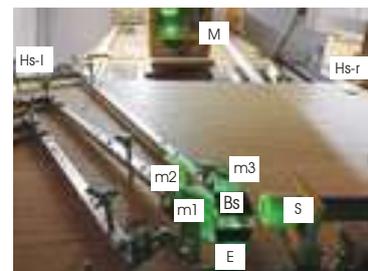
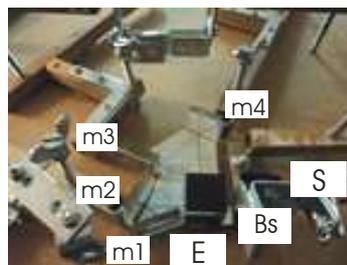
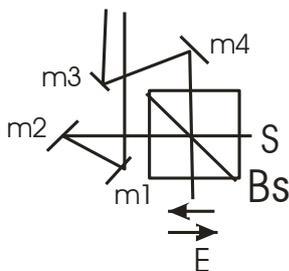


Der Aufbau im Bild unten links zeigt uns eine Umkehrung mit einem Bs, wie sie in der Literatur beschrieben wird. Es ist uns nicht gelungen, damit eine breite Interferenz zu erzeugen. Die Lichtstrahlen fallen zu schräg auf Bs, was IFW sehr schwierig macht.

Wir umgehen dieses Problem mit dem Aufbau, wie er auf dem Bild in der Mitte zu sehen ist. Um die verschiedenen Lichtpfade so ähnlich wie möglich zu gestalten, haben wir eine Karte (Bild rechts) verwendet, bei der die beiden Lichtpfade fast gleich lang sind und weniger als 1 mm Unterschied in der Länge aufweisen. Die Spiegel m1 bis m4 konnten so - wiederum über den festen Foucault-Test - sehr genau positioniert werden.



Das Foto unten zeigt ein Detail des Aufbaus auf der linken Seite. Achten Sie in der Mitte des Bildes auf m4. Sie zeigt das Spiegelbild der auf dem Karton gezeichneten Linien. Wenn wir den Spiegel m4 so einstellen, dass wir die gezeichnete Linie und ihr Spiegelbild in der Verlängerung des jeweils anderen sehen, dann wissen wir, dass die Einstellung bereits recht genau ist. Dies gilt natürlich für alle Spiegel.

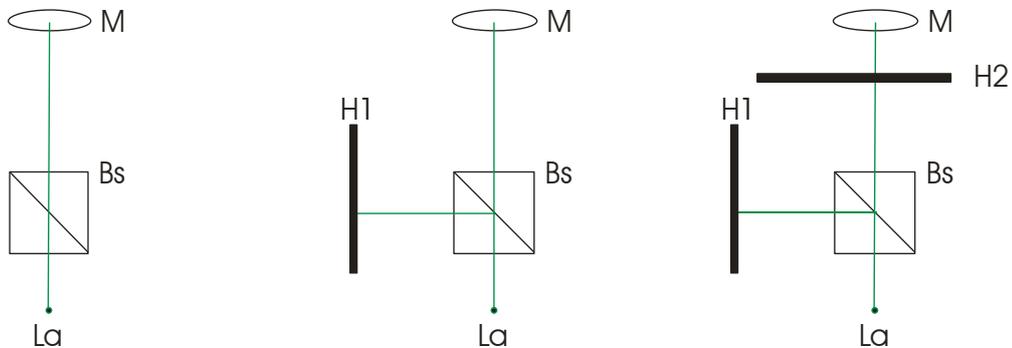


Da alle Teile genau in der gleichen Ebene liegen müssen, ist dieser Aufbau viel schwieriger zu bauen. Die Laserausrichtung erfordert einen gut durchdachten Algorithmus. Wir haben es wie folgt gemacht.

1. Bild links. Der Laser ist auf den Hauptspiegel M gerichtet. Wir stellen M so ein, dass das Licht zurück zum Laser reflektiert wird. Der Teiler Bs wird so in den Lichtweg gestellt, dass der zuvor schwache, von vorne reflektierte Lichtstrahl genau mit dem Laser zusammenfällt.

2. Bild in der Mitte. H1, der Erste-Hilfe-Spiegel ist angebracht. Er ist so positioniert, dass er sich entlang seiner beiden Achsen bewegen kann und dass er das von Bs kommende Licht genau nach Bs zurückreflektiert.

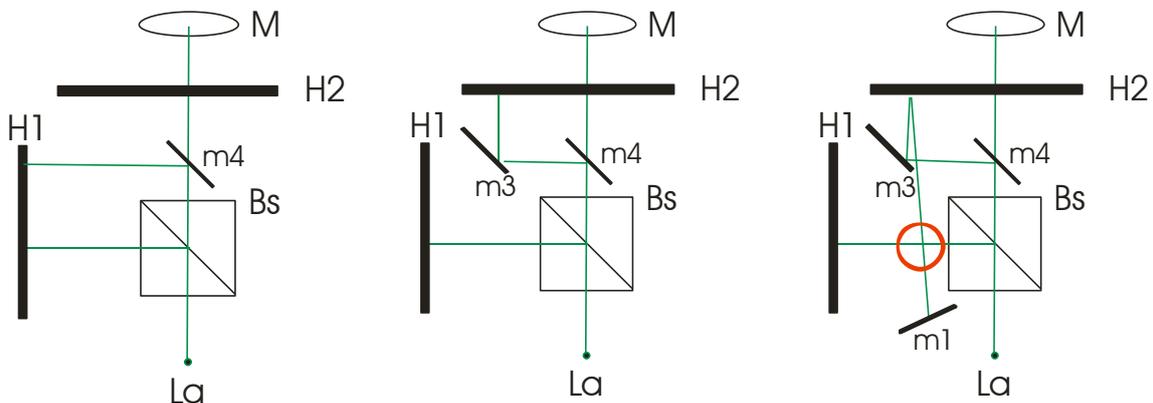
3. Bild rechts. H2, wird der zweite Hilfsspiegel angebracht. Es kann sich um seine beiden Achsen bewegen und reflektiert das von Bs kommende Licht genau zurück nach Bs. Dieser Spiegel wird nach Abschluss der Einstellung entfernt.



1. Bild links. Der Spiegel m4 ist so angebracht, dass das Licht zu H1 gelangt und zu m4 zurückreflektiert wird.

2. Bild in der Mitte. Der kleine Spiegel m3 ist so angebracht, dass das Licht zu H2 gelangt und von dort zurück reflektiert wird.

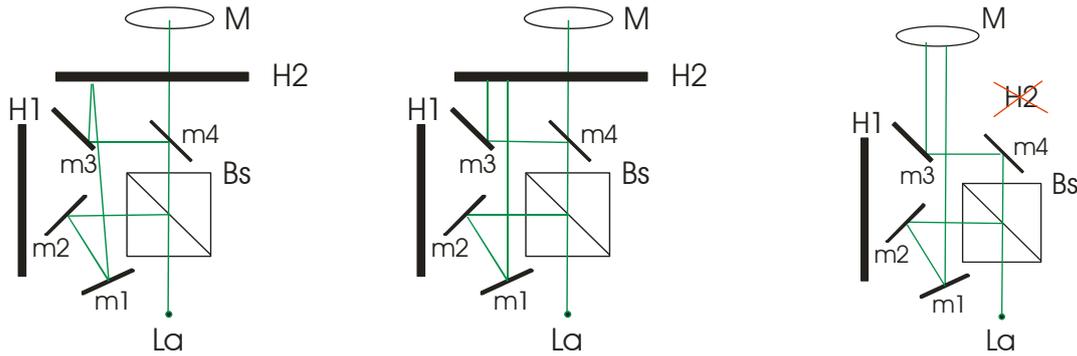
3. Bild rechts. Der kleine Spiegel m1 wird aufgestellt. Wir drehen m3 leicht, so dass das reflektierte Licht auf m1 fällt. Beachten Sie die beiden Laserlinien, die sich im roten Kreis kreuzen. In der Draufsicht scheinen sie sich zu überschneiden. Um dies sicherzustellen, bringen wir ein Stück durchsichtiges Glas oder Plastik an dieser Stelle in den Lichtweg. Auf dieser transparenten Platte sehen wir zwei Punkte, einen für jeden Laserpfad. Die Absicht ist, dass sich diese beiden Punkte im Schnittpunkt schneiden, dass sie zusammenfallen. Wenn dies nicht der Fall ist, muss m3 und nur m3 genauer ausgerichtet werden. Auf diese Weise können wir sicher sein, dass sich das gesamte Laserlicht immer noch in der gleichen Ebene befindet.



4. Bild links. Der Spiegel m2 ist so angebracht, dass das Licht von Bs auf m1 fällt, und zwar genau an der Stelle, an der das von H2 kommende Laserlicht bereits auf m1 fällt. Nun kann der Spiegel m1 so eingestellt werden, dass das Licht von H2 über m1 auf m2 und das Licht von m2 über m1 auf H2 fällt.

5. Bild in der Mitte. Die Spiegel m3 und m1 werden leicht angehoben, so dass der Laserstrahl von m3 nach H2 nach der Reflexion wieder auf m3 und der Strahl von m1 wieder auf m1 fällt.

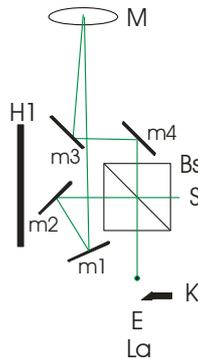
6. Bild rechts. H2, wird der zweite Zusatzspiegel entfernt. Der Hauptspiegel M ist leicht nach links verschoben, so dass die Laserstrahlen von m3 und m1 auf diesen Spiegel fallen.



7. Die Spiegel m3 und m1 werden ein wenig angehoben, so dass ihr Licht genau in die Mitte des Spiegels M fällt. Dieser Spiegel wird so eingestellt, dass das Licht von m3 nach M, nach der Reflexion zu m1, und das Licht von m1 nach M, nach der Reflexion zu m3 gelangt.

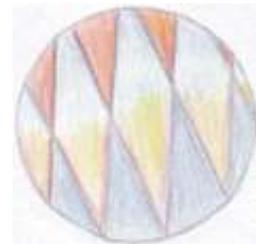
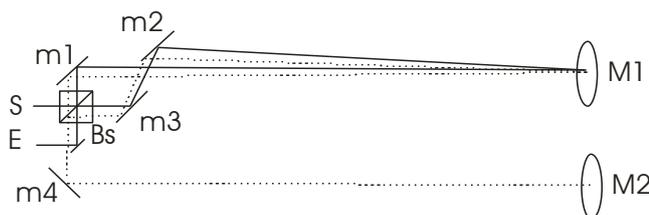
Außerdem wird die Punktlichtquelle S (die Glasfaser) so platziert, dass das Laserlicht von Bs genau auf das 0,3 mm große Loch fällt. S ist natürlich in einer Halterung untergebracht, so dass es genau entlang seiner Achsen bewegt werden kann. Bei E ist auch Platz für "K", von "Knife", dem Messer des Foucault-Tests, ein Test, den wir bei der Einstellung der konvergierenden Strahlen des weißen Lichts benötigen.

Und wundern Sie sich nicht, wenn wir am Ende etwa sechzig Schrauben anziehen müssen.



4.3. Ein Aufbau mit mehreren Interferenzen.

Wenn M1 leicht angehoben wird und wir einen zweiten, ebenso großen Hohlspiegel M2 verwenden, kann das Licht die Anordnung zweimal durchlaufen und wir erhalten eine Interferenz von zwei Interferenzen. Wir sehen in E, dass sich hier vertikale Interferenzlinien mit schrägen Linien mischen, was ein schönes und symmetrisches Farbmuster ergibt.



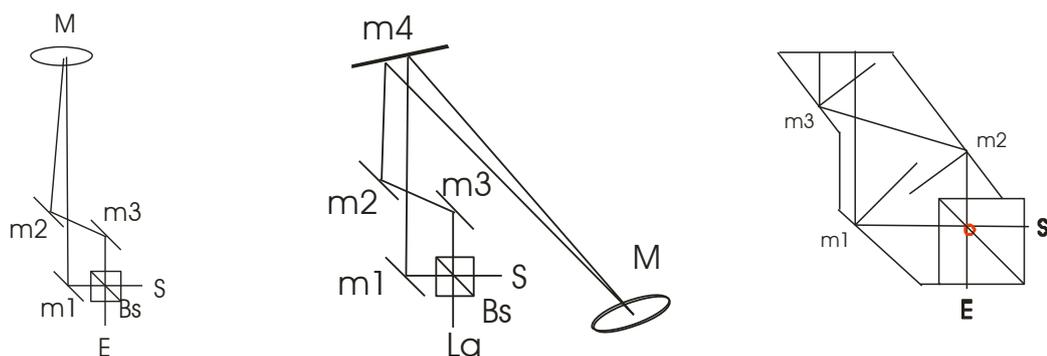
Wir lassen den Abstimmungsalgorithmus hier stehen. Es handelt sich um eine Variante des früheren Verfahrens der Feinabstimmung.

Um diese Interferenzlinien breiter zu machen, müssen alle Lichtstrahlen senkrecht auf Bs fallen. Da der Hauptspiegel M jedoch leicht gekippt ist, ist dies nicht möglich: Die gepunkteten Lichtwege fallen schräg auf Bs. Auf dem Splitter Bs sehen wir zwei Laserpunkte: einen Lichtpunkt, der zu M1 geht, und links davon den etwas schwächeren Lichtpunkt, der von M1 reflektiert wird.

Diese Anordnung ist daher ungeeignet, um sehr breite Interferenzlinien oder einen IFW zu erzeugen.

4.4. Nulling Interferometrie

Wir sagen, dass diese Art von Interferometer eine "Grenz"-Version eines Radialinterferometers ist, bei dem die Wegdifferenz der beiden Teilstrahlen gegen Null strebt. Wir erreichen dies, indem wir die Spiegel m2 und m3 zur Grundausstattung hinzufügen.



Die Zeichnung in der Mitte zeigt uns, wie M in Reichweite von E bleibt.

Die Zeichnung auf der rechten Seite zeigt ein Detail des Aufbaus. Auch hier haben wir eine sehr genaue Skizze in einem Zeichenprogramm angefertigt, die wir dann verkleinert, ausgedruckt, ausgeschnitten und auf ein Stück Karton geklebt haben. Dies ist notwendig, um die Spiegel auf den gewünschten Abstand und die gewünschte Richtung einzustellen. Wenn die Einstellung sehr genau vorgenommen wird, wird die destruktive Interferenz erreicht und das schwache Lichtband, das die Hand umgibt, sichtbar.

Es zeigt sich also, dass der Anpassungsalgorithmus - mutatis mutandis - analog zu dem oben beschriebenen Anpassungsverfahren ist.

4.5. Mehrfache Interferenz mit 2 Strahlteilern

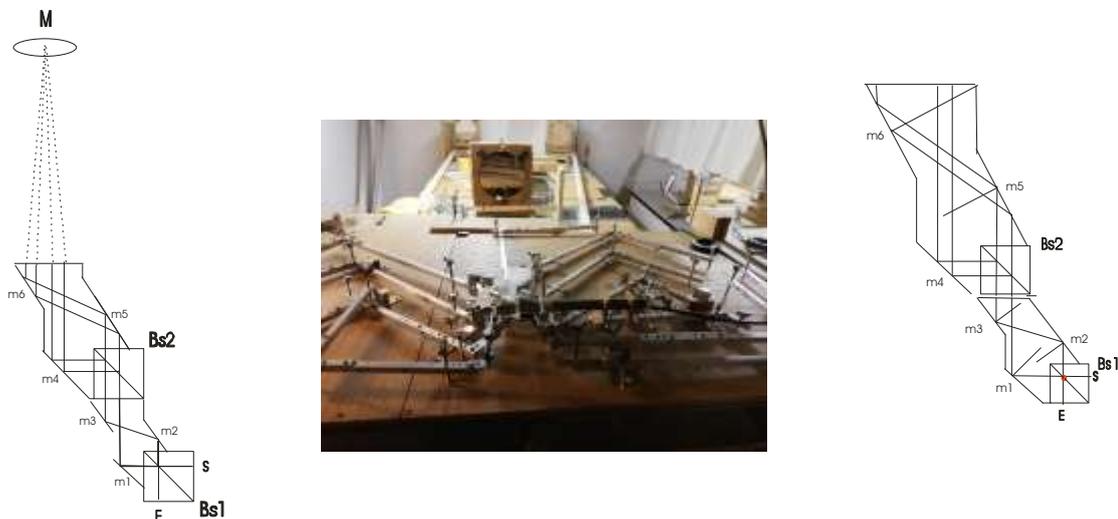
Wie im obigen Text angedeutet, kann dieses letzte Experiment erweitert werden, indem das Licht ein zweites Mal durch den Aufbau geleitet wird. Einerseits kann der Finger unter Beibehaltung einer Interferenz ein zweites Mal beleuchtet werden, andererseits kann dies dadurch geschehen, dass das Licht einer zweiten Interferenz unterzogen wird. Eine Skizze einer

solchen Einrichtung ist unten abgebildet. Schließlich ist auch ein Arrangement mit einer Kombination der beiden vorangegangenen denkbar.

In der Praxis sind sie jedoch alles andere als einfach. Nach dem mühsamen Einstellen und Ausrichten, das eine echte Geduldprobe ist, lohnt es sich aber. Die Bilder sind wunderschön, aber der Aufbau ist so sensibel. Schon die sanfte Berührung einer der Stellschrauben führt zu einem kaleidoskopischen und wechselnden Farbpanorama, bis man fast mit angehaltenem Atem zusieht, wie sich das Bild stabilisiert. Hält man dann die Hand vor den Spiegel, sieht man eine IFW, und zwar eine recht intensive Farbturbulenz, oder, wenn man sich auf die destruktive Linie einstellt, das leuchtende Band um die Hand.

Die oben als Kombination erwähnte Anlage haben wir nicht gebaut. Wie bereits erwähnt, sind wir hier wirklich an der Grenze dessen, was ein Amateur erreichen kann.

Schauen wir uns im Folgenden den Aufbau, einige Vorbereitungsarbeiten und ein Detail des Aufbaus an.



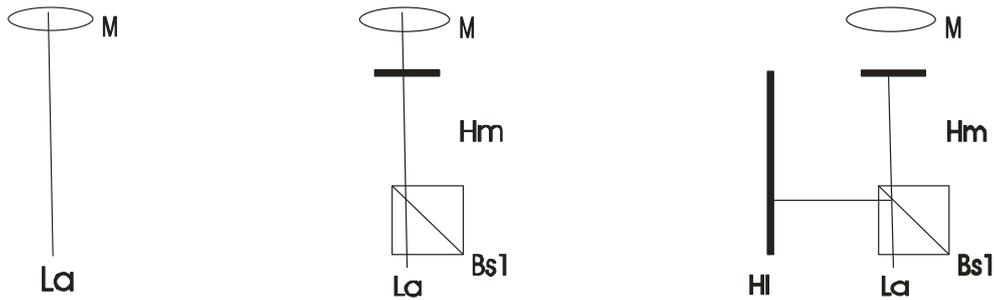
Da zwei Strahlteiler verwendet werden, die sich genau in der gleichen Ebene befinden müssen, erfordert dieser Aufbau eine noch größere Präzision.

So haben wir dieses System eingerichtet.

In der Zeichnung unten links ist der Laser auf den Hauptspiegel M gerichtet. Die reflektierten Strahlen fallen in den Laser zurück. Die reflektierten Strahlen fallen zurück in den Laser.

In der Zeichnung in der Mitte wird Bs1 hinzugefügt, und der flache Hilfsspiegel M wird hinzugefügt, so dass das von M reflektierte Licht nun behindert wird. Bs1 wird nun so eingestellt, dass das von seiner Vorderseite reflektierte Licht ebenfalls auf La zurückfällt. Dann wird Hm so eingestellt, dass das von ihm reflektierte Licht auch auf La fällt. Hm steht dann senkrecht zum Laserstrahl.

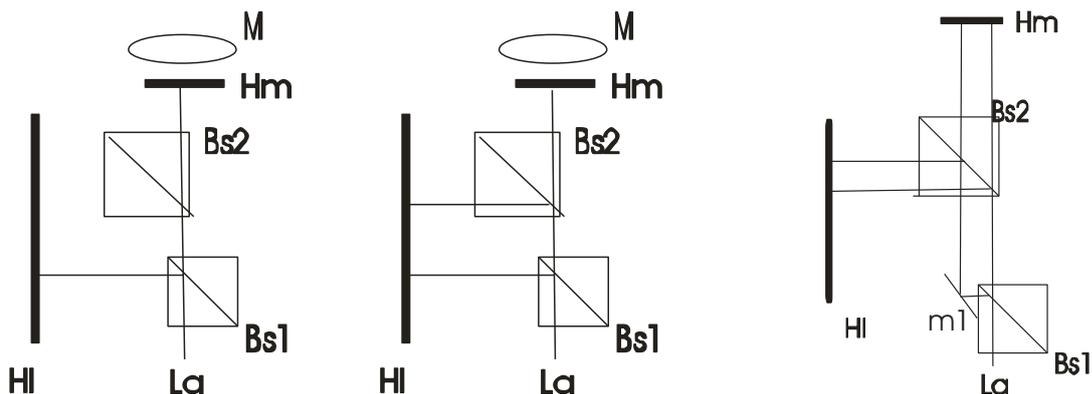
Hl, der Hilfsspiegel auf der linken Seite, wurde in die Zeichnung auf der rechten Seite eingefügt. Sie ist 600 mm von Bs1 entfernt. Dieser Spiegel sollte auch das Licht von Bs zurück zu Bs reflektieren.



Unten links wird Bs2 hinzugefügt und so eingestellt, dass das von seiner Vorderseite reflektierte Licht zurück in den Laser fällt.

In der Mitte wird Bs2 so eingestellt, dass das von HI reflektierte Licht genau dort auf Bs2 zurückfällt, wo der Laserstrahl Bs2 verlassen hat und in HI eingetreten ist. Diese Anpassungen sind zeitaufwändig und schwierig.

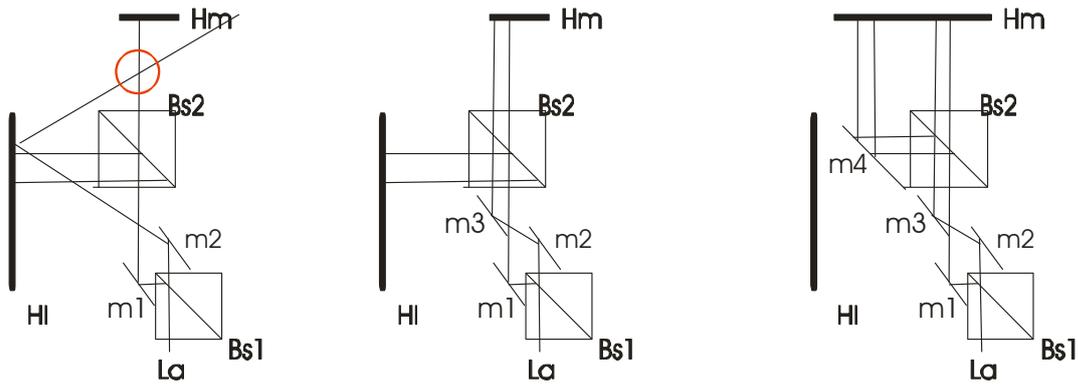
In der Zeichnung rechts wurde m1 hinzugefügt und so eingestellt, dass das auf Hm und HI fallende Licht auf m1 zurückfällt.



In der Zeichnung unten links ist der Spiegel m2 hinzugefügt worden. Wegen des gleichen Lichtweges der beiden Teilstrahlen liegt er nicht bei 45° . Der Spiegel m2 ist schräg auf HI angebracht und reflektiert das Licht schräg. Halten Sie nun das durchsichtige Stück Plastik (oder Glas) an die Stelle des roten Kreises. Der Lichtstrahl von Bs1 nach Hm muss den Lichtweg von m2, der auf HI reflektiert, kreuzen. Wir stellen m2 so ein, dass dies tatsächlich erreicht wird.

Dann wird in der Mitte m3 hinzugefügt und so eingestellt, dass das Licht von ihm zu Hm und zurück zu m3 reflektiert wird.

Rechts wird m4 hinzugefügt, so dass die Strahlen nach Hm wieder auf m4 reflektieren.

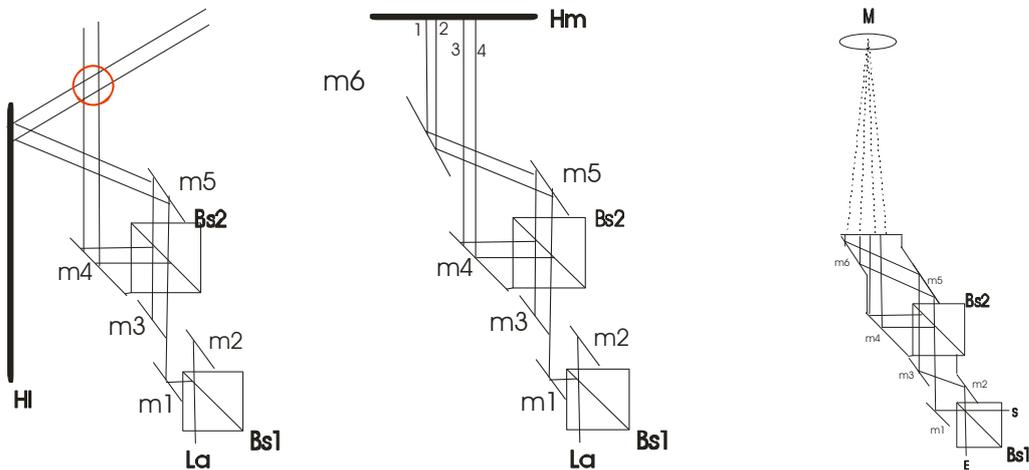


Unten links wird m5 hinzugefügt und so eingestellt, dass sich die von m4 reflektierten Strahlen durch m5- hl schneiden.

In der Mitte wird m6 hinzugefügt und so eingestellt, dass die reflektierten Strahlen von Hm wiederum auf m6 fallen. Wegen der Divergenz, die sich bei der Verwendung von weißem Licht zeigt, ist m6 bereits viel länger als z. B. m1. In unseren Versuchen war m6 bereits 80 mm lang.

Schließlich wird Hm entfernt und M so platziert, dass die Strahlen 1, 2, 3 und 4 in gleichen Abständen vom Zentrum von M fallen. Die Spiegel m1 und m4 (und nur diese) sind leicht verdrahtet, so dass die Bündel 1, 2, 3 und 4 genau in die Mitte von M fallen. Wenn die ganze Prozedur genau ist, wird 1 zu 4 und 2 zu 3 reflektieren und diese 4 Strahlen werden alle die gleiche Länge haben.

Am Ende werden sie uns eine Interferenz von zwei zeigen, was diese Anordnung außergewöhnlich empfindlich gegenüber Turbulenzen macht.



Bei dieser ganzen Konstellation stellten wir uns die Frage, ob etwas von diesem feinen Staub nachgewiesen werden kann. Unsere Experimente haben uns in unserer Überzeugung bestärkt, und wir haben den Eindruck, dass diese Frage hinreichend beantwortet wurde.

optische Experimente
von 2000 bis ...?

Weitere Referenzen

Einführung in die neueren Methoden der Lichtmikroskopie, G. Braun, Karlsruhe, 1967, S. 118. und, allgemeiner: J. James: Microscopische waarnemingsmethoden. (Mikroskopische Methoden der Beobachtung), A. Oosthoek, Utrecht, 1969.