

Bestimmung der Linienaufspaltung zweier Spektrallinien mit einem Michelson-Interferometer

Versuchsziele

- Bestimmung der mittleren Wellenlänge der gelben Spektrallinien einer Hg-Spektrallampe mit einem Michelson-Interferometer
- Bestimmung der Linienaufspaltung der gelben Spektrallinien mit einem Michelson-Interferometer

Grundlagen

Kohärenz ist die Fähigkeit unterschiedlicher Wellen, stationäre Interferenzerscheinungen hervorzurufen. Eine zeitlich stationäre Interferenzstruktur kann nur dann beobachtet werden, wenn sich die Phasendifferenzen zwischen beliebigen Teilwellen in einem festen Punkt während der Beobachtungszeit um weniger als 2π ändern. Man nennt die Teilwellen dann zeitlich kohärent. Die maximale Zeitspanne Δt , während der sich die Phasendifferenzen zwischen allen überlagerten Teilwellen um höchstens 2π ändern, heißt Kohärenzzeit Δt_c . Oft wird statt der Kohärenzzeit die Kohärenzlänge verwendet. Damit wird die Strecke $\Delta s_c = \frac{c}{n} \Delta t_c$

bezeichnet, die das Licht in einem Medium mit Brechungsindex n während der Kohärenzzeit zurücklegt.

Für zwei unterschiedliche, nahe beieinander liegende Wellenlängen λ_1 und λ_2 führt die kohärente Überlagerung zweier Teilstrahlen zu einer Schwebung: Für bestimmte Weglängendifferenzen erhält man einen starken Kontrast zwischen hellen und dunklen Ringen, während für andere Weglängendifferenzen der Kontrast völlig verschwindet. Der Unterschied in den optischen Weglängen zwischen zwei Intensitätsmaxima oder Intensitätsminima, die an einem festgelegten Punkt auf dem Beobachtungsschirm vorbeilaufen, entspricht gerade der mittleren Wellenlänge:

$$\Delta s_1 = \bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (I)$$

Der Unterschied in den optischen Weglängen zwischen zwei Punkten maximalen oder minimalen Kontrasts, ist gegeben durch

$$\Delta s_2 \approx \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta \lambda} \quad (II)$$

Daraus kann der Abstand der Wellenlängen $\Delta \lambda$ bestimmt werden über

$$\Delta \lambda \approx \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta s_2} \quad (III)$$

Für ausreichend kohärente Quellen, wie etwa Spektrallampen, lassen sich so auch sehr kleine Linienaufspaltungen bestimmen. Verwendet wird hierzu z.B. ein Michelson-Interferometer. Das Michelson-Interferometer gehört zur Familie der Zweistrahlinterferometer. Die interferometrischen Messungen basieren bei diesem Interferometertyp auf folgendem Prinzip:

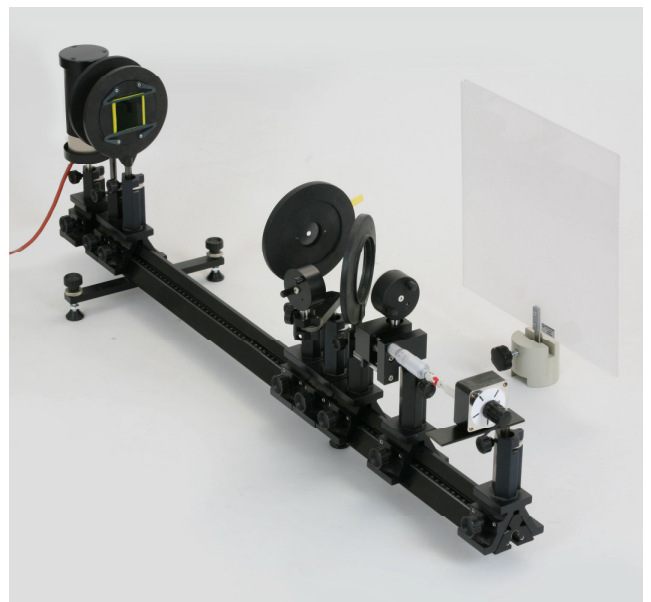


Abb. 1: Versuchsaufbau

Der aus einer geeigneten Quelle kommende kohärente Lichtstrahl wird durch ein optisches Bauelement in zwei Teile aufgespalten. Die Teilstrahlen durchlaufen unterschiedliche Wege, werden in sich reflektiert, schließlich wieder zusammengeführt und überlagern sich. Durch die Überlagerung der Lichtwellen entsteht ein Interferenzbild. Da die Spektrallampe ein leicht divergentes Lichtbündel aussendet, erhält man auf einem Schirm keine homogene Intensitätsverteilung sondern ein System aus hellen und dunklen Interferenzringen.

Im Versuch wird die mittlere Wellenlänge $\bar{\lambda}$ der gelben Hg-Spektrallinien ermittelt, indem einer der Planspiegel mit einem Feinstelltrieb um eine genau bestimmte Strecke verschoben wird, wodurch sich die optische Weglänge des betroffenen Teilstrahls ändert. Während dieser Verschiebung wandern die Interferenzstreifen auf dem Beobachtungsschirm. Zur Auswertung werden entweder die Intensitätsmaxima oder die Intensitätsminima gezählt, die an einem festgelegten Punkt auf dem Beobachtungsschirm vorbeilaufen, während der Planspiegel verschoben wird.

Für die Bestimmung der Linienaufspaltung $\Delta \lambda$ wird der Abstand zwischen zwei Positionen bestimmt, für die das Interferenzbild verschwindet, obwohl die Weglängendifferenz kleiner als die Kohärenzlänge ist.

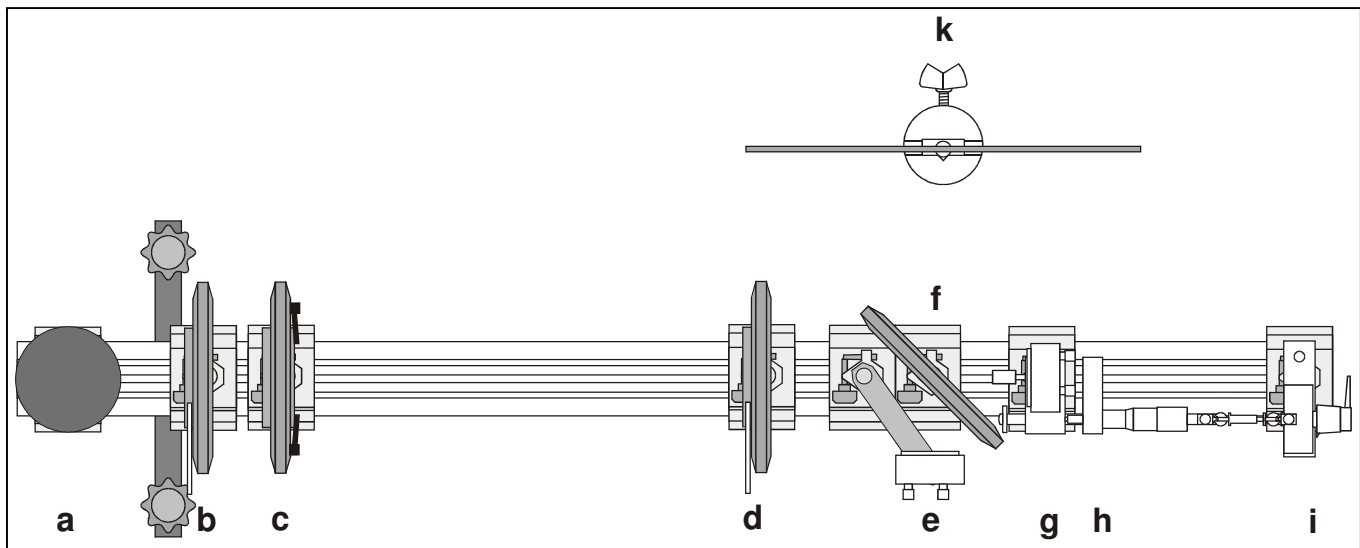


Abb. 2: Aufbau des Michelson-Interferometers auf der optischen Bank von oben betrachtet

- a** Spektrallampe Hg 100
- b, d** Irisblende
- c** Lichtfilter 580 nm
- e, g** Planspiegel, feinjustierbar
- f** Strahlenteiler
- h** Feinstelltrieb
- i** Untersetzungsgetriebe des Feinstelltriebs
- k** Durchscheinender Schirm

Geräte

1 Spektrallampe Hg 100.....	451 062
1 Gehäuse für Spektrallampen	451 16
1 Universaldrossel 230 V, 50 Hz.....	451 30
1 Optische Bank mit Normalprofil, 1 m	460 32
1 Optikreiter 60/50.....	460 373
7 Optikreiter 90/50.....	460 374
2 Planspiegel, feinjustierbar	473 461
1 Feinstelltrieb.....	473 48
1 Verlängerungsarm.....	460 380
1 Strahlenteiler.....	471 88
2 Irisblenden	460 26
1 Lichtfilter 580 nm.....	468 30
1 Halter mit Federklammern.....	460 22
1 Durchscheinender Schirm.....	441 53
1 Sockel	300 11

Hinweis:

Der Versuch kann auch für die Doppellinien einer Na-Spektrallampe (451 111), durchgeführt werden.

Sicherheitshinweise:

- Spektrallampe (451 062) in Gehäuse (451 16) nur über Universaldrossel (451 30) ans Netz anschließen.
- Zwischen Lichtaustrittsöffnung und optischem Element (z.B. Blende, Linse) einen Mindestabstand von 3 cm einhalten, um Überhitzung durch Wärmestau auszuschließen.

Aufbau

Hinweis: Messungen in einem möglichst vollständig verdunkelten Raum durchführen.

Optische Komponenten mit beschädigten oder verschmutzten Oberflächen können Störungen im Interferenzmuster hervorrufen:

Planspiegel und Strahlenteiler sehr sorgfältig behandeln, staubfrei aufbewahren und nicht mit bloßen Händen anfassen.

Ein Versuchsaufbau mit dem Kreuzverbinder (460 342) ist am Ende des Handblatts gezeigt.

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 2 dargestellt. Zum Aufbau sind folgende Schritte nötig:

Montage auf der optischen Bank:

- Die Spektrallampe Hg 100 (**a**) im Optikreiter 60/50 an einem Ende der optischen Bank anbringen.
- Das Untersetzungsgetriebe des Feinstelltriebs (**i**) mit der Magnetbank auf dem Getriebetisch befestigen und am anderen Ende der optischen Bank anbringen.
- Einen Planspiegel (**g**) oben in den Feinstelltrieb (**h**) einspannen und vor dem Untersetzungsgetriebe (**i**) auf der Bank montieren.
- Die Doppelkreuzgelenk-Kupplung vorsichtig an den Gelenkkopf der Mikrometerschraube des Feinstelltriebs (**h**) klemmen.
- Den Optikreiter des Feinstelltriebs (**h**) so verschieben und die Getriebetischhöhe des Untersetzungsgetriebes (**i**) so einstellen, dass das Kupplungsgestänge weder völlig gestreckt noch gestaucht wird. Andernfalls kann später die Messung durch Verschieben des Feinstelltriebs verfälscht werden.
- Den Winkel zwischen den einzelnen Gliedern der Gelenkkupplung so klein wie möglich halten (auf keinen Fall größer als 45°)
- Eine der Irisblenden (**b**) ca. 5 cm hinter der Spektrallampe Hg 100, die zweite Irisblende (**d**) ca. 25 cm vor dem Planspiegel montieren, so dass die Blendenmitten auf gleicher Höhe sind.
- Die Universaldrossel an die Spektrallampe anschließen und einschalten; Aufwärmphase von einigen Minuten abwarten.

Justage des Planspiegels (g)

Nach der Justage des Planspiegels (**g**) soll das Licht der Spektrallampe in sich zurückreflektiert werden. Nur dann führt eine Verschiebung des Planspiegels (**g**) über den Feinstelltrieb nicht zu einer Verlagerung des Strahls.

- Die Irisblenden (**b,d**) möglichst weit schließen.
- Den Planspiegel (**g**) durch Verstellen der Justierschrauben auf der Rückseite so ausrichten, dass der reflektierte Strahl sowohl Irisblende (**d**) als auch Irisblende (**b**) mittig trifft.

Ab jetzt dürfen die Justierschrauben des Planspiegels (**g**) nicht mehr verstellt werden! Ein Verstellen des Planspiegels (**g**) würde dazu führen, dass ein Verschieben des Planspiegels (**g**) mit dem Feinstelltrieb eine Verlagerung des reflektierten Strahls bewirkt und somit die Teilstrahlen nicht mehr richtig überlagert werden.

Strahlenteiler (f) und zweiter Planspiegel (e)

- Den Strahlenteiler (**f**) möglichst dicht vor dem Planspiegel (**g**) aufbauen, so dass der komplette Hub des Feinstelltriebs noch genutzt werden kann. Die verspiegelte Seite des Strahlenteilers zeigt zur Spektrallampe.
- Den Strahlenteiler (**f**) so drehen, dass der vom Planspiegel (**g**) reflektierte Strahl um 90° abgelenkt wird.
- Den durchscheinenden Schirm (**k**) im Sockel befestigen und neben der optischen Bank so aufstellen, dass er mittig getroffen wird.
- Den zweiten Planspiegel (**e**) in den Verlängerungsarm einspannen und so auf der optischen Bank montieren, dass der Planspiegel von dem vom Strahlenteiler reflektierten Teilstrahl mittig getroffen wird. Der Abstand des Planspiegels (**e**) und des Planspiegels (**g**) vom Strahlenteiler (**f**) sollten etwa gleich groß sein. Aufgrund der relativ kleinen Kohärenzlänge der Spektrallampe von einigen Millimetern darf sich die optische Weglänge der beiden Interferometerarme nur wenig unterscheiden. Ggf. die Positionen von Planspiegel (**e**) und/oder Strahlenteiler (**f**) anpassen.

Überlagerung der Teilstrahlen

Zur Überlagerung nur Planspiegel (**e**) (auf Verlängerungsarm) verstellen!

- Den Planspiegel (**e**) durch Verstellen der Justierschrauben auf der Rückseite so ausrichten, dass der Strahl nahezu in sich reflektiert wird und nach der Transmission durch den Strahlenteiler mit dem ersten Teilstrahl zusammentrifft.
- Durch Feinjustage des Planspiegels (**e**) die Strahlen der beiden Interferometerarme vollständig zur Deckung bringen. Hierzu ist es hilfreich, den vom Planspiegel (**e**) reflektierten Strahl direkt vor dem Planspiegel (**e**) teilweise mit einem Stück festem Papier (z.B. Visitenkarte) abzudecken. Die Position des vorbei gelassenen Teilstrahls kann so gut mit der Position des vom Planspiegel (**g**) reflektierten Strahls verglichen werden.
- Die Irisblende (**d**) ganz öffnen.

Auf dem Schirm sollten nun Interferenzstreifen sichtbar sein.

- Den Planspiegel (**e**) vorsichtig so verstellen, dass auf dem Schirm ein konzentrisches Ringsystem mittig im ausgeleuchteten Bereich sichtbar ist.
- Die Irisblende (**b**) so weit öffnen, dass der Kontrast des Interferenzmusters noch nicht beeinträchtigt wird.

Durchführung

Während des Versuchs:

- Mechanische Erschütterungen der optischen Bank vermeiden (z.B. nicht am Tisch wackeln).
- Entstehung von Luftschlieren im Aufbau, z.B. durch Luftzug, vermeiden.
- Eine Stelle auf dem durchscheinenden Schirm (**k**) markieren, an der die vorbeiziehenden Interferenzstreifen gezählt werden können.
- Aufgrund des Getriebespiels den Getriebeknopf durch leichtes Anlegen des Fingers an den Hebel des Untersetzungsgetriebes (**i**) langsam und gleichmäßig verstellen (ggf. mehrere Umdrehungen), bis sich die Interferenzstreifen in Bewegung setzen.
- Anschließend mit dem Getriebeknopf mindestens eine weitere Umdrehung vollziehen, bevor mit der Messung begonnen wird.

Hinweis: bei „ruckelnder“ Bewegung des Planspiegels und somit des Interferenzmusters muss die Gleitbuchse des Feinstelltriebes geschmiert werden.

Bestimmung der mittleren Wellenlänge der gelben Spektrallinien einer Hg-Spektrallampe

- Das Lichtfilter 580 nm im Halter mit Federklemmen festklemmen und hinter der Irisblende (**b**) auf der optischen Bank montieren.
- Getriebeknopf drehen, bis ein Bereich mit hohem Kontrast der Interferenzstreifen erreicht wird. Getriebeknopf weiterdrehen und gleichzeitig die an der Markierung vorbeiziehenden Interferenzstreifen (ca. 100) und die Umdrehungen des Untersetzungsgetriebes zählen.

Bestimmung der Linienaufspaltung der gelben Spektrallinien einer Hg-Spektrallampe

- Getriebeknopf weiterdrehen, bis das Interferenzbild gerade verschwindet.
- Getriebeknopf weiterdrehen, so dass das Interferenzbild wieder erscheint. Gleichzeitig die Umdrehungen des Untersetzungsgetriebes zählen, bis das Interferenzbild wiederum verschwindet.

Messbeispiel und Auswertung**Bestimmung der mittleren Wellenlänge der gelben Spektrallinien einer Hg-Spektrallampe**

Die Zahl N der Umdrehungen des Untersetzungsgetriebes, die Gesamtverschiebung Δx_1 des Planspiegels, die mittlere Wellenlänge $\bar{\lambda}$ der Spektrallinien und die Anzahl Z der Intensitätsmaxima stehen in folgendem Zusammenhang:

$$Z \cdot \bar{\lambda} = \Delta s_1 = 2 \cdot \Delta x_1 \text{ mit } \Delta x_1 = N \cdot 5 \mu\text{m}$$

Durch den Faktor 2 wird in dieser Gleichung berücksichtigt, dass der geometrische Weg sowohl für den ankommenden als auch für den reflektierten Strahl um Δx_1 verändert wird.

Für $\bar{\lambda}$ gilt also die Bestimmungsgleichung

$$\bar{\lambda} = 2 \cdot \frac{\Delta x_1}{Z} = 2 \cdot \frac{N \cdot 5 \mu\text{m}}{Z}$$

In einer Beispielmessung ergab sich für die Anzahl der ausgezählten Intensitätsmaxima $Z = 52$ und für die Zahl der Umdrehungen $N = 3$. Daraus erhält man für die Wellenlänge der grünen Spektrallinie der Hg Spektrallampe:

$$\bar{\lambda} = 577 \text{ nm.}$$

Die Literaturwerte betragen $\lambda_{1,theo} = 576,96 \text{ nm}$ und $\lambda_{2,theo} = 579,07 \text{ nm}$ und damit $\bar{\lambda}_{theo} = 578,02 \text{ nm}$.

Bestimmung der Linienaufspaltung der gelben Spektrallinien einer Hg-Spektrallampe

Der Unterschied in den optischen Weglängen zwischen zwei Punkten maximalen oder minimalen Kontrasts, ist laut Gleichung (II) gegeben durch

$$\Delta s_2 = 2 \cdot \Delta x_2 \approx \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta \lambda},$$

wobei Δx_2 die Gesamtverschiebung des Planspiegels ist. Daraus kann anhand Gleichung (I) der Abstand der Wellenlängen $\Delta \lambda$ bestimmt werden über

$$\Delta \lambda \approx \frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta x_2}.$$

Im Versuch entsprach der Abstand zwischen zwei Punkten minimalen Kontrasts 17 Umdrehungen mit dem Getriebe-
knopf, d.h. $\Delta x_2 = 85 \mu\text{m}$. Daraus erhält man mit

$$\bar{\lambda} = 577 \text{ nm: } \Delta \lambda = 2 \text{ nm.}$$

Aus den Literaturwerten $\lambda_{1,theo} = 576,96 \text{ nm}$ und $\lambda_{2,theo} = 579,07 \text{ nm}$ erhält man $\Delta \lambda_{theo} = 2,11 \text{ nm}$.

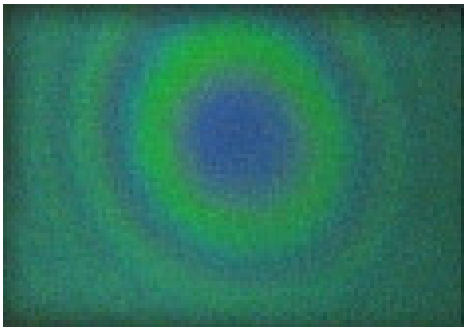


Abb. 3: Interferenzbild auf Schirm ohne Lichtfilter

Diskussion

Durch die interferometrische Messung kann die mittlere Wellenlänge und die Linienaufspaltung der gelben Spektrallinien der Hg Spektrallampe sehr genau bestimmt werden. Die Messgenauigkeit der Wellenlängenbestimmung ist um so besser, je größer die Gesamtverschiebung Δs_1 und damit die Zahl der Umdrehungen und die Anzahl der ausgezählten Intensitätsmaxima ist. Die Genauigkeit der Linienaufspaltung hängt einerseits von der relativen (!) Genauigkeit der mittleren Wellenlänge und von der Größe der Gesamtverschiebung Δs_2 und damit auch hier von der Zahl der Umdrehungen ab.

Je kleiner die Linienaufspaltung, um so größer ist die Gesamtverschiebung Δs_2 zwischen zwei Punkten minimalen oder maximalen Kontrasts. Dies macht eine genauere Bestimmung möglich. Ist jedoch Δs_2 größer als die Kohärenzlänge, so ist eine rein manuelle Auswertung nicht mehr möglich.

Hinweise:

Nimmt man elektronisch (z.B. mit einer Photodiode) den Intensitätsverlauf an einem Punkt des Interferenzbildes in Abhängigkeit von der Gesamtverschiebung Δs auf, so können mit Hilfe einer Fourier-Transformation direkt die beteiligten Frequenzen/Wellenlängen, d.h. das ganze Spektrum, bestimmt werden. Diese Methode wird allgemein Fourier-Transform-Spektroskopie genannt und ist z.B. als *Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie* (FTIR) weit verbreitet.

Alternativer Versuchsaufbau mit Kreuzverbinder (460 342)

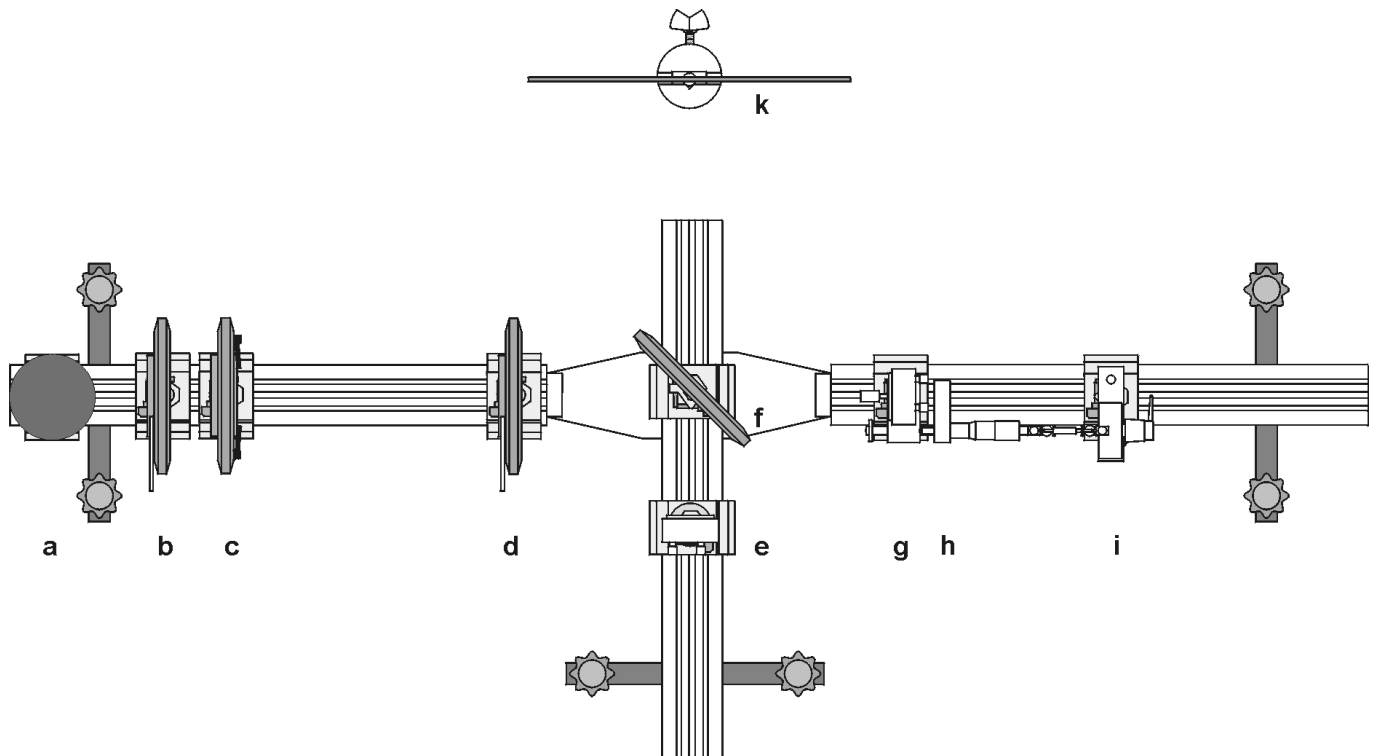


Abb. 4: Aufbau des Michelson-Interferometers auf der optischen Bank von oben betrachtet

- a Spektrallampe Hg 100
- b, d Irisblende
- c Lichtfilter 580 nm
- e Planspiegel, feinjustierbar, auf Verlängerungsstiel
- f Strahlenteiler
- h Feinstelltrieb
- g Planspiegel, feinjustierbar
- i Untersetzungsgetriebe des Feinstelltriebs
- k Durchscheinender Schirm

Die optischen Bänke mit Hilfe des Kreuzverbinders kreuzförmig verbinden (siehe Abbildung 4). Aufbau und Justage der optischen Komponenten erfolgt analog zum Aufbau auf einer Schiene.

Geräte

1 Spektrallampe Hg 100.....	451 062
1 Gehäuse für Spektrallampen.....	451 16
1 Universaldrossel 230 V, 50 Hz	451 30
3 Optische Bank mit Normalprofil, 0,5 m	460 335
1 Kreuzverbinder.....	460 342
1 Optikreiter 60/50.....	460 373
7 Optikreiter 90/50.....	460 374
1 Verlängerungsstiel	460 385
2 Planspiegel, feinjustierbar	473 461
1 Feinstelltrieb.....	473 48
1 Strahlenteiler	471 88
2 Irisblenden.....	460 26
1 Lichtfilter 580 nm.....	468 30
1 Halter mit Federklemmen	460 22
1 Durchscheinender Schirm	441 53
1 Sockel	300 11

