

Mesure de l'indice de réfraction de l'air à l'aide d'un interféromètre de Mach-Zehnder

Objectifs

- Montage d'un interféromètre de Mach-Zehnder
- Observation de la variation de l'échantillon d'interférence lorsque l'on fait le vide dans une chambre précédemment placée dans la trajectoire du faisceau
- Détermination de l'indice de réfraction de l'air

Principe

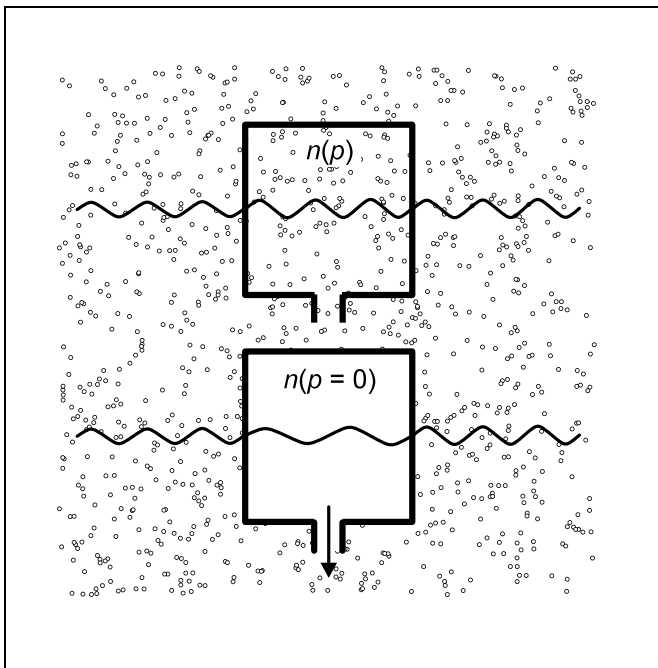
L'interférométrie est une méthode de mesure très précise utilisée pour la détermination de variations de longueurs, d'épaisseurs de couches, d'indices de réfraction ou de longueurs d'ondes, par exemple. Tout comme l'interféromètre de Michelson, celui de Mach-Zehnder est un interféromètre à deux faisceaux. Il fonctionne selon le principe suivant:

Le faisceau lumineux cohérent issu d'une source adéquate est divisé en deux faisceaux partiels par un composant optique. Ces derniers suivent alors des trajectoires différentes, sont déviés par des miroirs puis à nouveau réunis et superposés par un autre composant optique. Il se forme alors une image d'interférence. Si le chemin optique, c'est-à-dire le produit entre l'indice de réfraction et le chemin géométrique, de l'un des faisceaux varie, il apparaît un déphasage avec le second

faisceau. Il en résulte une modification de l'image d'interférence qui permet de tirer des conclusions quant à la modification du chemin optique.

Contrairement à l'interféromètre de Michelson, les faisceaux lumineux partiels ne sont pas réfléchis sur eux-mêmes mais parcourent chacun un chemin particulier jusqu'à ce qu'ils soient à nouveau réunis. De ce fait, les mesures effectuées sur des matériaux transparents, par exemple la mesure de l'indice de réfraction, sont plus faciles à comprendre et donc plus claires pour l'enseignement. Par contre, il est impossible de déterminer des variations géométriques de longueurs.

Pour déterminer l'indice de réfraction de l'air, on se sert d'une chambre à vide, que l'on place dans la trajectoire d'un faisceau partiel de l'interféromètre. En évacuant lentement l'air de la chambre, on fait varier le chemin optique du faisceau partiel considéré. L'indice de réfraction de l'air peut être déduit de la modification de l'échantillon d'interférence et de la variation de pression qui l'accompagne. L'interféromètre de Michelson permet également d'effectuer cette mesure mais il faut alors que le faisceau lumineux traverse deux fois la chambre.



Matériel

1 plaque de base pour optique laser	473 40
1 laser He-Ne à polarisation rectiligne	471 840
1 porte-laser	473 41
6 pieds pour optique	473 42
2 lames séparatrices p. ex.	473 432
2 porte-lame séparatrice	473 43
2 miroirs plans à réglage précis	473 46
1 lentille sphérique, $f = 2,7$ mm	473 47
1 chambre à vide	473 485
1 écran translucide	441 53
1 pompe à vide à main	375 58
1 petit pied en V	300 021
1 pince de fixation universelle S pour le pied	666 555
1 socle	300 11
1 règle en bois	311 03

Consignes de sécurité

Le laser He-Ne répond à la norme de sécurité allemande DIN 58126 (6ème partie) sur l'utilisation en cours de lasers de classe 2. Si les consignes de sécurité mentionnées dans le mode d'emploi sont respectées, les expériences avec le laser He-Ne ne présentent aucun danger:

- ne pas regarder directement le faisceau laser, ni le faisceau réfléchi.
- ne pas franchir les limites de sécurité, c'est-à-dire qu'aucun observateur ne doit être ébloui.

Montage

Remarque: les composants optiques dont la surface est endommagée ou salie peuvent provoquer des perturbations au niveau de l'échantillon d'interférence.

Manipuler le miroir plan, la lame séparatrice et la lentille sphérique avec précautions, les tenir à l'abri de la poussière et ne pas les prendre directement en main.

La disposition de l'interféromètre de Mach-Zehnder sur la plaque de base pour optique laser est représentée sur la figure 1. Il est indispensable d'ajuster soigneusement les différents éléments pour qu'ils coïncident avec le trajet du faisceau. Les étapes suivantes sont nécessaires au montage:

Plaque de base et laser:

- Gonfler le matelas d'air isolant
- Installer la plaque de base pour optique laser **(a)** et le matelas d'air isolant horizontalement sur la table de démonstration stable.
- Monter le laser sur le porte-laser et le placer au bord gauche de la plaque de base.
- Brancher le laser et l'allumer
- Desserrer les contre-écrous des trois vis réglables du porte-laser.
- Régler la hauteur et l'inclinaison du laser à l'aide des vis, de sorte que son faisceau passe horizontalement à environ 75 mm au-dessus de la plaque de base (il reste alors suffisamment de jeu pour un réajustage). Vérifier avec la règle en bois.
- Resserer les contre-écrous.

Préajustage:

- Vérifier si les lames séparatrices **(b)** et **(c)** réfléchissent le faisceau laser horizontalement. Pour ce faire, les monter sur pieds pour optique et les placer tour à tour à l'extrémité de la plaque de base, dans la trajectoire du faisceau, afin que ce dernier soit réfléchi à côté de l'orifice du laser.
- Si nécessaire, rectifier l'angle d'inclinaison des lames séparatrices, donc la trajectoire du faisceau, à l'aide des deux vis au niveau de la tige.
- Placer tour à tour les miroirs plans **(d)** et **(e)** à l'extrémité de la plaque de base, dans la trajectoire du faisceau, puis les régler avec la vis du haut, de sorte que le faisceau soit réfléchi horizontalement et à côté de l'orifice du laser.

Lames séparatrices et miroirs plans

Remarques:

Le réglage est facilité lorsque la pièce est légèrement sombre.

Des réflexions successives font apparaître, en plus des faisceaux principaux, des faisceaux parasites de moindre intensité. Par la suite, ces faisceaux partiels sont arrêtés par le porte-lentille. Dans cette expérience, nous ne considérerons que les faisceaux principaux.

Les faisceaux réfléchi et transmis doivent être de même intensité, dans la mesure du possible.

Lors de l'utilisation de la lame séparatrice variable (473 435), faire en sorte que le faisceau laser parvienne en son centre (approximativement).

- Placer la lame séparatrice **(b)** sur pied pour optique dans la trajectoire du faisceau, suivant un angle de 45° , comme le montre la figure 1. La couche semi-translucide de la lame doit être tournée face au laser.

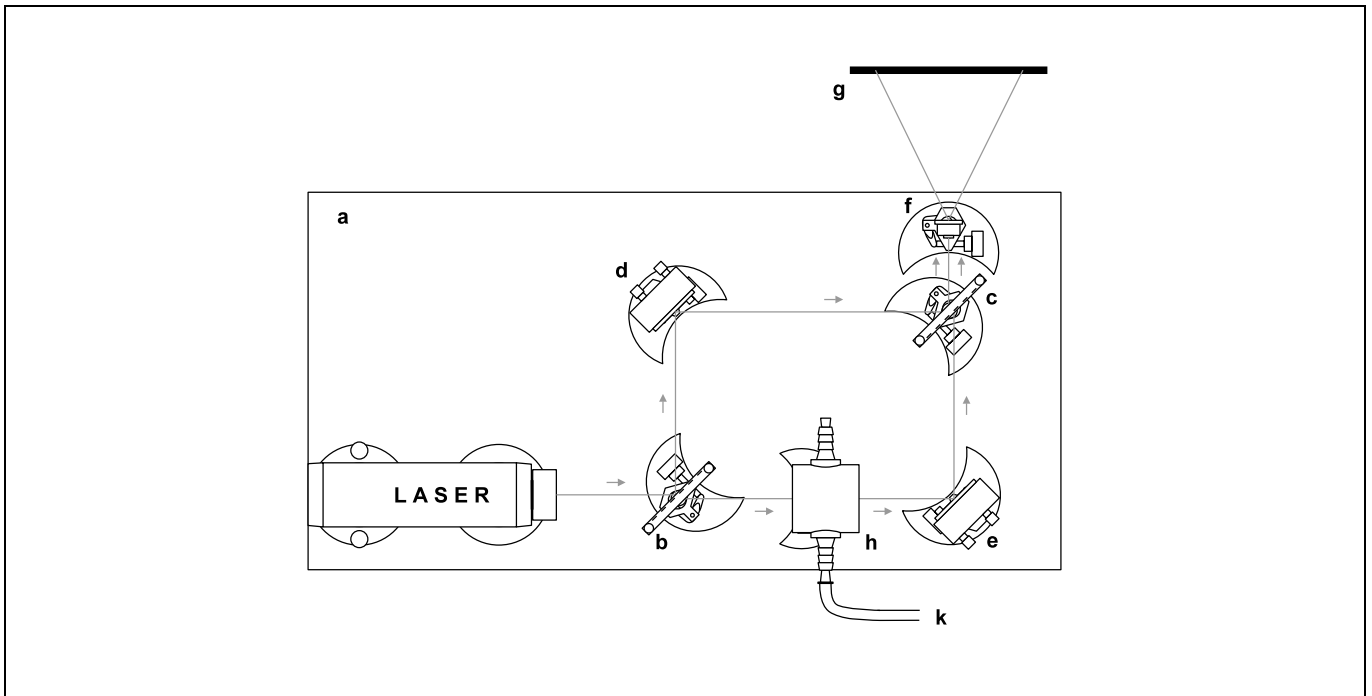


Fig. 1: Montage de l'interféromètre de Mach-Zehnder sur la plaque de base pour optique laser avec la chambre à vide. Vu de dessus

- a Plaque de base pour optique laser
- b, c lame séparatrice
- d, e Miroir plan à réglage précis
- f Lentille sphérique
- g Ecran translucide
- h Chambre à vide
- k Raccord pour tuyaux de la pompe à vide

- Placer le miroir plan (d) dans la trajectoire du faisceau réfléchi par la lame séparatrice, de manière à ce que ce dernier atteigne son centre.
- Disposer le miroir plan en tournant le pied pour optique sur la plaque de base de sorte que le faisceau soit dévié de 90° et soit parallèle au faisceau partiel transmis.
- Monter le miroir plan (e) en face du miroir plan (d), dans la trajectoire du faisceau partiel transmis, pour que ce dernier parvienne en son centre. Voir fig. 1.
- Tourner le pied pour optique du second miroir plan sur la plaque de base de l'interféromètre pour que le faisceau soit dévié de 90° .
- Fixer l'écran translucide (g) sur le socle et l'installer, comme sur la figure 1, derrière la plaque de base pour optique laser de sorte que le faisceau partiel réfléchi par le miroir plan (e) le touche en son centre.
- Placer la lame séparatrice (c) de sorte qu'elle soit antiparallèle à la lame séparatrice (b) et que les deux faisceaux partiels l'atteignent sous un angle de 45° . La partie semi-translucide n'est alors pas tournée vers l'écran (g).

Réajustage:

La disposition des différents éléments est correcte lorsque la trajectoire du faisceau entre les lames séparatrices forme un angle droit:

- rectifier la trajectoire du faisceau, si nécessaire.
- réajuster les miroirs plans et les lames séparatrices afin que les faisceaux les plus intenses des deux groupes de reflets se recouvrent sur l'écran (g).

- modifier la distance entre le miroir plan (g) et la lame séparatrice (c) et vérifier que les reflets des deux faisceaux réfléchis restent pratiquement superposés, c'est-à-dire qu'ils sont suffisamment parallèles.

a) Réajustage de la trajectoire perpendiculaire du faisceau:

Si les faisceaux partiels ont des trajectoires différentes dans le plan perpendiculaire:

- mesurer précisément, à l'aide de la règle en bois, la hauteur à laquelle passent les faisceaux partiels au-dessus de la plaque de base, derrière chaque composant optique. Si nécessaire, réajuster l'inclinaison des miroirs plans et des lames séparatrices.
- réajuster la position des composants afin que les faisceaux les plus intenses des deux groupes de reflets apparaissant sur l'écran translucide se recouvrent.
- contrôler le parallélisme des deux faisceaux partiels en modifiant la distance entre l'écran (g) et la seconde lame séparatrice (c).
- recommencer l'ajustage, si nécessaire.

b) Réajustage de la trajectoire horizontale du faisceau:

Dans le cas idéal, les deux faisceaux partiels sont issus pratiquement du même point de la lame séparatrice (c) et se réunissent sur l'écran translucide.

Si les faisceaux partiels ont des trajectoires différentes dans le plan horizontal:

- contrôler la trajectoire des faisceaux entre la lame séparatrice (b) et la lame séparatrice (c), puis modifier la position des composants correspondants si elle n'est pas à angle droit.
- déplacer le miroir plan (e) parallèlement au grand côté de la plaque de base et le disposer de sorte que le faisceau partiel qu'il réfléchit et celui réfléchi par le miroir plan (d) se recouvrent aussi bien sur la lame séparatrice (c) que sur l'écran translucide.

Lentille sphérique:

- Placer la lentille sphérique (**f**) (plus petite ouverture d'entrée du porte-lentille tournée vers la lame séparatrice) sur la plaque de base, entre la lame séparatrice (**c**) et l'écran translucide (**g**).
- Placer la lentille latéralement et en hauteur de manière à ce qu'elle soit traversée axialement par les deux faisceaux partiels.
- Eventuellement, rectifier la trajectoire du faisceau en réajustant l'un des miroirs plans.

Réglage précis:

Au cas où aucune frange n'est encore visible sur l'écran translucide:

- modifier légèrement la trajectoire du faisceau en ajustant les lames séparatrices ou les miroirs plans. Réajuster la lentille, si nécessaire.

La largeur et la distance entre les franges d'interférence sont d'autant plus grandes que les deux faisceaux sont parallèles entre la lame séparatrice (**c**) et l'écran (**g**);

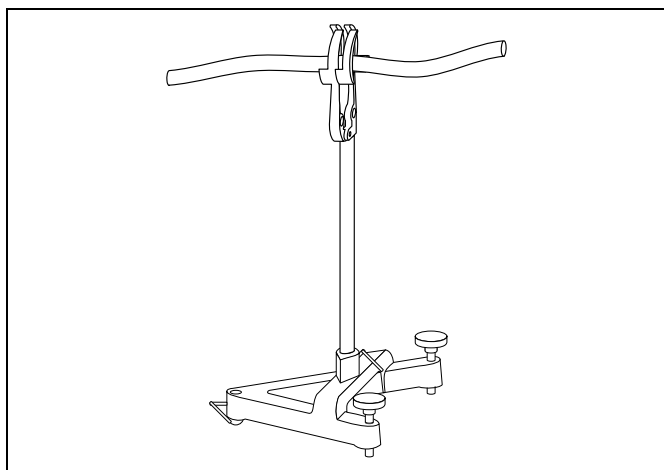
- régler le format en modifiant légèrement l'alignement des lames séparatrices et des miroirs de manière à pouvoir observer nettement l'échantillon d'interférence.

Si ce réglage n'est pas suffisant:

- recommencer l'ajustage de l'interféromètre.

L'échantillon d'interférence est beaucoup plus intense lorsque la puissance de sortie du laser est d'1 mW. Il peut en résulter une légère variation de la trajectoire du faisceau; aussi, la position de la lentille sphérique doit-elle être réajustée, le cas échéant.

Fig. 2: Disposition du support du tuyau de la chambre à vide

**Chambre à vide et pompe à vide à main:**

Remarque: le faisceau laser est réfléchi sur les parois en verre de la chambre à vide ce qui peut être défavorable, dans certains cas. En effet, la qualité du faisceau laser est réduite lorsque les faisceaux réfléchis pénètrent dans l'orifice du laser. Dans ce cas, tourner légèrement la chambre.

- Fermer hermétiquement l'une des petites brides à tubulure souple de la chambre à vide à l'aide de bouchons (fournis).
- Monter la chambre à vide sur un pied pour optique et la placer entre la lame séparatrice (**b**) et le miroir plan (**e**), dans la trajectoire du faisceau, de sorte que ce dernier la traverse axialement. Il est inutile de modifier la position des autres composants.
- Raccorder le tuyau de la pompe à l'autre petite bride à tubulure souple de la chambre à vide. Veiller à ne pas tirer la chambre de la plaque de base avec le tuyau; pour ce faire, choisir un adaptateur adéquat et l'insérer dans la bride.
- Réaliser un support à l'aide du petit pied et de la pince de fixation universelle S, comme le montre la figure 2, et fixer le tuyau à côté de la plaque de base afin que la mesure ne soit pas faussée par la rotation ou les déplacements de la chambre à vide.

Réalisation

Au cours de l'expérience:

- éviter les vibrations mécaniques de la plaque de base pour optique laser (ne pas bouger la table, par exemple).
- éviter l'apparition, dans le montage, de couches d'air réfringentes en mouvement dues par exemple à la respiration ou aux courants d'air.
- marquer l'écran translucide (**g**) à un endroit où les franges d'interférence qui défilent peuvent être comptées.
- établir lentement le vide dans la chambre (**h**) jusqu'à ce que le maximum d'intensité suivant se superpose avec la marque sur l'écran.
- relever la valeur du vide correspondante sur le manomètre de la pompe à main.
- recommencer jusqu'à atteindre le vide maximal.

Il est recommandé mais pas obligatoire de:

- laisser pénétrer de l'air en actionnant la valve de la pompe à main, jusqu'à ce que le maximum d'intensité précédent se superpose avec la marque sur l'écran.
- relever la valeur du vide correspondante sur le manomètre de la pompe à main.
- recommencer jusqu'à atteindre la pression atmosphérique standard.

Exemple de mesure

Tab. 1: Nombre Z de déplacements des maxima d'interférence et différence de pression p_D , mesurée pour $\vartheta = 22\text{ °C}$ et $\lambda = 632,8\text{ nm}$

Z	$\frac{p_D}{\text{mbar}}$	Z	$\frac{p_D}{\text{mbar}}$
1	40	19	930
2	100	18	880
3	150	17	830
4	190	16	780
5	240	15	730
6	290	14	680
7	340	13	630
8	390	12	580
9	440	11	530
10	480	10	480
11	530	9	430
12	580	8	390
13	630	7	330
14	680	6	290
15	730	5	230
16	780	4	190
17	820	3	140
18	870	2	80
19	920	1	20

Analyse et résultats

Pour les gaz, l'indice de réfraction n est une fonction linéaire de la pression p

$$n(p) = n(p=0) + \frac{\Delta n}{\Delta p} \cdot p \text{ mit } n(p=0) = 1 \quad (\text{I})$$

Nous allons déterminer, tout d'abord, le quotient

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{n(p+\Delta p) - n(p)}{\Delta p} \quad (\text{II})$$

à partir des mesures.

Le chemin optique d dans la chambre à vide est le produit entre la longueur géométrique s de la chambre et l'indice de réfraction $n(p)$ du gaz dans la chambre, dépendant de la pression.

En faisant varier la pression de la chambre de p à $p + \Delta p$, on modifie le chemin optique de

$$\Delta d = n(p + \Delta p) \cdot s - n(p) \cdot s \quad (\text{III})$$

Lorsque l'on établit le vide, on peut observer le déplacement des franges d'interférence sur l'écran translucide. En partant de la pression ambiante p_0 , on compte un certain nombre de déplacements jusqu'à ce que la pression p soit atteinte dans la chambre $Z(p)$. Un déplacement des maxima d'une interfrange correspond à une variation du chemin optique de λ . Entre p et $p + \Delta p$ le chemin optique varie donc de

$$\Delta d = (Z(p) - Z(p + \Delta p)) \cdot \lambda \quad (\text{IV})$$

On déduit de (III) et (IV) que

$$n(p + \Delta p) - n(p) = - (Z(p + \Delta p) - Z(p)) \cdot \frac{\lambda}{s}$$

et, d'après (II)

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = - \frac{\Delta Z}{\Delta p} \cdot \frac{\lambda}{s} \quad (\text{V})$$

La grandeur à mesurer n'est pas la pression p dans la chambre, mais la différence $p_D = p_0 - p$ avec p_0 , pression ambiante. Ainsi, on peut déterminer à partir des mesures, la pente

$$\frac{\Delta Z}{\Delta p_D} = - \frac{\Delta Z}{\Delta p}$$

On tire de la figure 3

$$\frac{\Delta Z}{\Delta p_D} = 0,020 \text{ mbar}^{-1}$$

et on obtient en prenant $\lambda = 632,8\text{ nm}$ et $s = 50\text{ mm}$

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}^{-1}$$

En remplaçant dans l'équation (I), on obtient pour l'indice de réfraction de l'air, la valeur

$$n = 1,00026$$

La valeur théorique correspondante à pression atmosphérique standard $p = 1013\text{ mbar}$, à la température $\vartheta = 22\text{ °C}$ et pour la longueur d'onde $\lambda = 632,8\text{ nm}$ est

$$n = 1,000269.$$

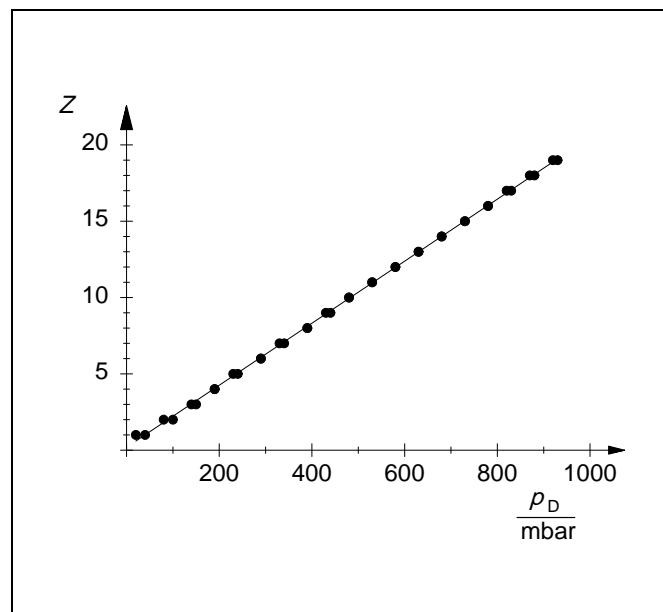


Fig. 3: Nombre Z de déplacements des maxima d'interférence en fonction de la différence de pression p_D