

## Interferômetro de Mach-Zehnder 1014617

### Instruções de uso

07/15 ALF



### 1. Instruções de segurança

O interferômetro deve ser operado com Laser de hélio-néon classe 2. Olhar diretamente para o feixe do laser pode levar a queimaduras da retina e deve ser evitado de todas as formas.

- As diretrizes de segurança que acompanham o laser devem ser seguidas à risca!

O divisor de feixe (4) refletirá a luz laser não só para os dois espelhos (9), mas também para baixo (referente à Figura 1). Além disso, conforme a montagem do experimento, também poderá sair um feixe de laser a partir do segundo divisor de feixe, que alcança além da placa de base.

- Para a proteção das pessoas envolvidas no experimento, devem ser dispostos painéis opacos, conforme as possibilidades locais.
- O interferômetro deve ser montado em

mesa firme ou em outro local apropriado, para que não possa cair e ferir pessoas por conta de seu peso.

Os puxadores para carregamento (6) destinam-se a suspender o interferômetro para poder alcançar embaixo da placa de base.

A pressão máxima permitida na ampola de vácuo (11) é de 200 kPa (2 bar), respectivamente sobrepressão de 100 kPa (1 bar).

- Em caso de danos ao vidro da ampola, por exemplo, riscos ou rachaduras, a ampola de vácuo deve ser imediatamente removida e consertada.
- Em experimentos com sobrepressão, deve-se assegurar que não há pessoas na área de explosão da célula. Conforme o caso, utilizar óculos de proteção.

## 2. Componentes fornecidos

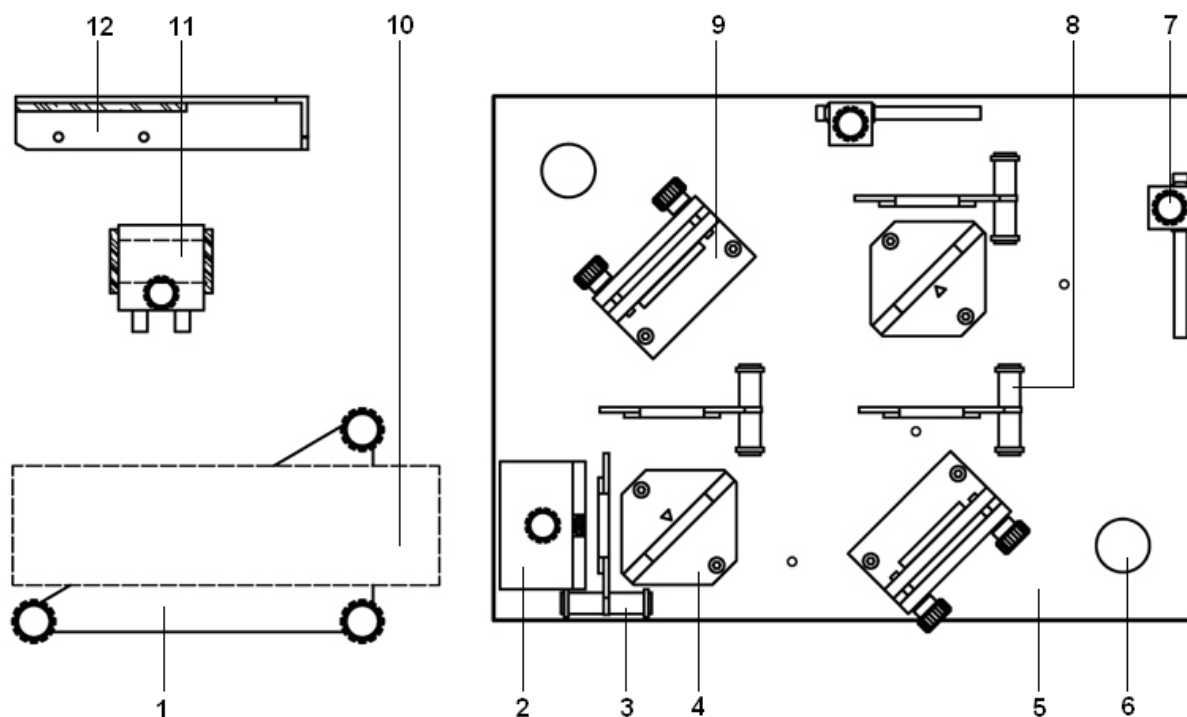


Fig. 1 Componentes fornecidos e componentes adicionais eventualmente necessários

- 1 Placa de suporte para laser
- 2 Lente divergente
- 3 Filtro de polarização, lâmina (2x)
- 4 Divisor de feixe (2x)
- 5 Placa de base
- 6 Puxador para carregamento
- 7 Tela (2x)
- 8 Filtro de polarização, vidro (2x)
- 9 Espelho de superfície ajustável (2x)
- 10 Laser (não incluído)
- 11 Ampola de vácuo (no conjunto de acessórios 1002652)
- 12 Placa de vidro sobre suporte (no conjunto de acessórios 1002652)

não constam da figura:

- 13 recipiente resistente de plástico
- 14 Chave sextavada
- 15 Ferramentas de ajuste do divisor de feixe
- 16 Instruções de uso

### 3. Descrição

O interferômetro de Mach-Zehnder é um desenvolvimento do interferômetro Jamin. Ele foi apresentado em 1891 por Ludwig Zehnder e, independentemente e simultaneamente, também foi desenvolvido por Ludwig Mach, porém somente mencionado por este último em 1892.

A luz incidente é dividida em dois feixes parciais pelo divisor de feixe, que viajam por caminhos diferentes até um segundo divisor de feixe, onde são novamente sobrepostos, levando à interferência (anulação ou amplificação) por conta das distâncias óticas diferentes.

Com comprimento de onda de luz conhecido, um interferômetro pode ser usado para a medição de trechos muito curtos, o que é importante, entre outros, para a verificação da qualidade da superfície de componentes óticos.

Com o interferômetro de Mach-Zehnder, podem ser executados, entre outros, os experimentos a seguir:

1. Análise da alteração da direção de polarização no divisor de feixe e no espelho de superfície
2. Qualidade da superfície de componentes óticos (qualitativamente, não quantitativamente) \*
3. Determinação do índice de refração da luz \*\*
4. Experimento de analogia ao apagador quântico (“analogia”, pois o experimento descrito aqui não é executado com fótons individuais.)
5. Interferência em luz branca \*\*\*

\* com conjunto de aparelhos complementares (1002652)

\*\* com conjunto de aparelhos complementares (1002652) e bomba manual de vácuo (1012856)

\*\*\*com lâmpada ótica com diafragma perfurado (1017284)

Graças às posições pré-estabelecidas dos componentes, uma conversão rápida para execução dos diferentes experimentos é possível.

O conjunto de aparelhos do interferômetro de Mach-Zehnder é constituído de dois divisores de feixe, dois espelhos de superfície, duas telas de observação e quatro filtros de polarização. Os componentes de alta qualidade dispostos sobre placa de base pesada e rígida, garantem medições precisas e reproduzíveis. Os componentes óticos grandes permitem a obtenção de imagens de interferência claras e nítidas, que podem ser observadas também à luz do dia, pois as duas telas refletivas de observação têm inclinação ajustável. Por conta de posições pré-estabelecidas dos componentes, uma conversão rápida para execução dos diferentes experimentos é possível e,

com isso, um tempo de preparação do experimento extremamente curto é assegurado.

Inclui caixa resistente de plástico para armazenamento do interferômetro montado e ajustado, assim como placa de suporte para o laser.

### 4. Dados técnicos

#### Divisor de feixe:

Diâmetro:	40 mm
Plano:	$\lambda/10$ (parte frontal), $\lambda/4$ (parte traseira)

#### Espelhos de superfície:

Dimensões:	40x40 mm <sup>2</sup>
Plano:	$<\lambda/2$

#### Filtros de polarização:

Diâmetro:	30 mm
Ajuste:	$\pm 105^\circ$
Material:	Vidro (2x), lâmina (2x)
Divisão de ângulos:	3°, 15°

#### Placa de base:

Massa:	5,5 kg
Dimensões:	245x330x25 mm <sup>3</sup>

### 5. Operação

#### 5.1 Montagem do laser

- Montar o laser sobre o suporte para laser.

Uma vez que o suporte para laser é projetado para diferentes lasers, ele possui três furos para parafusos de embutir (M5 ou M6), dos quais, normalmente, apenas um é necessário. O furo certo para cada laser é determinado pelo centro de gravidade do laser e por suas possibilidades de fixação. Após a montagem, o centro de gravidade do laser deverá estar, aproximadamente, sobre o furo central.

A altura necessária do feixe de laser sobre a placa de trabalho é de 60-62 mm. Caso o ajuste dos parafusos serrilhados não seja suficiente, um anel distanciador ou similar deve ser montado sob o laser.

O comprimento do parafuso de fixação deve ser escolhido de forma a não destruir a carcaça ou componentes internos do laser.

- Para tanto, é conveniente determinar primeiramente a profundidade máxima possível de entrada do parafuso no suporte do laser e então escolher um parafuso cuja rosca esteja a aprox. 2 mm menos para fora do suporte do laser (um parafuso e uma porca quadrada que cabem em ranhuras convencionais estão inclusos).

## 5.2 Divisor de feixe

O vidro do divisor de feixe é espelhado em um dos lados e possui revestimento com transparência de 50% no outro lado, marcado com um triângulo que também se encontra nas montagens de experimentos desenhadas.

## 5.3 Montagem, ajustes básicos

A montagem dos componentes sobre a placa de base está mostrada na Figura 1. Na descrição seguinte da montagem, parte-se do princípio de que todos os ajustes básicos tenham que ser feitos.

- 1. Parafusar o divisor de feixe (observar o símbolo  $\nabla$ ) sem apertar e colocar ferramenta de montagem e apertar (vide Figura 2). Os espelhos agora devem poder ser deslocados minimamente em conjunto sobre a placa de base. Ao fixar os espelhos, controlar se não se forma uma fresta entre o suporte do espelho e a ferramenta. Retirar ferramenta.



Fig. 2 Ferramenta de montagem para divisor de feixe

- 2. Ajustar a fresta entre suporte do espelho e parede traseira em toda a volta em 4 mm para ambos os espelhos de superfície (vide Figura 3).
- Como auxílio de ajuste, podem ser usadas 2 moedas de 10 centavos de euro. Parafusar os espelhos na placa de base sem apertar. Durante o aperto dos parafusos, os espelhos devem ser apertados para fora de forma que a folga nos furos não leve a uma torção dos espelhos em relação aos divisores de feixe.



Fig. 3 Ajuste básico dos espelhos de superfície

- 3. Montar telas.
- 4. Parafusar a lente sem apertar e ajustar a mesma paralelamente à placa de base.
- 5. Ligar o laser e ajustar o mesmo em relação à lente e à placa de base de forma que em ambas as telas surja um ponto de luz no centro.
- 6. Girar a lente aprox.  $90^\circ$  em sentido anti-horário para fora do curso do feixe.

Agora, são visíveis 2 pontos de luz claros e vários pontos de luz mais fracos nas telas (no caso de ajuste ideal por acaso, aparecerá apenas 1 ponto claro).

- Os pontos de luz claros devem ser sobrepostos por torção dos parafusos serrilhados nos espelhos de superfície.

Com a sobreposição ideal, eventualmente uma tremulação (interferência) ficará visível.

- Girar a lente de volta para o curso do feixe.

Com alguma sorte, já podem ser visíveis faixas de interferência. Se não for o caso, esquadrihar conforme segue:

- Girar o parafuso serrilhado inferior de um dos espelhos lentamente por aprox.  $+90^\circ$ , retornar, girar lentamente por aprox.  $-90^\circ$  e retornar novamente a  $0^\circ$ .
- Caso isto também não ocasione o aparecimento de faixas de interferência, girar o parafuso serrilhado superior por, no máximo,  $+30^\circ$  (= distância de 2 giros do parafuso serrilhado) e girar lentamente o parafuso serrilhado inferior novamente por  $\pm 90^\circ$ . Repetir este procedimento com  $-30^\circ$ ,  $+60^\circ$  e  $-60^\circ$  do parafuso serrilhado superior, interrompendo o processo de esquadrihar quando surgirem faixas de interferência. Caso contrário, reiniciar a montagem dos divisores de feixe.
- Após o surgimento das faixas de interferência, ajustar os parafusos serrilhados  muito lentamente , enquanto as faixas ficam cada vez mais largas e o centro do padrão de interferência é finalmente alcançado.

Como ambos os caminhos dos feixes são quase igualmente longos neste procedimento, o centro do padrão de interferência aparecerá como uma grande mancha clara ou escura. Nisto é interessante observar que o padrão em ambas as telas é complementar.

7. Para obter um padrão de interferência com anéis “bonitos”, os caminhos dos feixes têm que ter comprimentos diferentes.

- Para tanto, apertar os 3 parafusos do espelho de superfície traseiro por 1,5 volta respectivamente (= caminho mais longo da luz) e soltar os 3 parafusos do espelho

dianteiro por 1,5 volta respectivamente (= caminho mais curto da luz).

- 8. Retirar a lente divergente do feixe.

A interferência, agora, não aparece mais com a sobreposição dos dois pontos claros, mas com uma distância de aprox. 6 - 7 mm, onde o ponto do espelho dianteiro se encontra na tela traseira à esquerda (na tela da direita, ele aparece à direita).

- Para encontrar o padrão de interferência, é necessário esquadrihar como descrito no item 6.

Com isto, o ajuste básico está encerrado.

**Alternativa 1:** O comprimento dos caminhos óticos também pode ser alterado com a colocação da ampola de vácuo (posição conforme Figura 7). Os passos 7. e 8. das instruções acima não são necessários neste caso.

**Alternativa 2:** Após execução dos passos de ajuste 1. até 5., a lente divergente pode também ser montada na saída do feixe. O laser, conforme o caso, é reajustado até que surjam 1 – 2 pontos de luz na tela da direita. Os pontos de luz podem ser levados facilmente à interferência por meio do ajuste dos parafusos serrilhados dos espelhos de superfície. Um padrão de anéis, no entanto, não é possível de ser obtido com esta montagem.



Fig. 4 Alternativa 2

#### 5.4 Limpeza dos componentes óticos

- Os espelhos de superfície, o divisor de feixe, o filtro de polarização de vidro, a lente divergente e os vidros da ampola de vácuo devem ser limpos cuidadosamente com um pano macio que poderá ser embebido em etanol (álcool).
- Não friccionar com pressão! O melhor é trabalhar com muito etanol e pouca força.
- A placa de vidro sobre o suporte (12) só deve ser limpa a seco (se for o caso, embaçar com

o hálito), caso contrário a fita adesiva poderá se soltar.

- O filtro de polarização de lâmina deve ser somente soprado, na medida do possível.

## 6. Exemplos de experimentos

### 6.1 Experimentos com polarização

Estes experimentos prévios podem ser prescindidos, porém são úteis na interpretação de efeitos inesperados em experimentos de interferência com filtros de polarização.

#### Polarização do laser utilizado

Quando um laser com direção de polarização indicada (geralmente horizontal ou vertical) é utilizado, as relações são claras. Frequentemente, porém, a direção de polarização é indicada com "random" ("aleatória"), o que, no entanto, não é definido de forma clara. Deve-se diferenciar entre os casos a seguir:

1. O laser tem exatamente uma direção de polarização, que não foi observada na montagem (laser de diodos sempre têm apenas um nível de polarização).
2. O laser tem duas direções de polarização, que geralmente são dispostas de forma ortogonal uma em relação à outra, mas que não são emitidas com intensidade temporal constante.
3. O laser tem mais de duas direções de polarização. Isto, porém, parece surgir apenas com tubos muito compridos de laser, que não se enquadram mais na classe 2 de laser.

A determinação da direção de polarização do laser utilizado é possível de forma simples com um dos dois filtros de polarização de vidro, vide montagem de experimento na Figura 7, porém sem a placa de vidro e com apenas um filtro de polarização. O que é determinado é o ângulo em que a luz do laser é escurecida ao máximo. Em relação a este ângulo, o nível de polarização é girado em 90°.

Recomenda-se um laser de hélio-néon ou um laser estabilizado de diodos, pois diodos simples de laser, dependendo da temperatura, emitem comprimentos de onda levemente diferentes e estes surgem eventualmente ao mesmo tempo, o que leva a não ser possível ver padrões claros de interferência (dica: leve aquecimento com a mão pode ajudar a resolver isto).

### Polarização da luz com reflexão no divisor de feixe

- Montar experimento conforme Figura 5.
- Colocar os filtros de polarização de vidro nas posições 1 e 2 e a lente divergente na posição 4, que, aqui, só interrompe o curso do feixe.
- Ajustar o ângulo  $\alpha$  do feixe incidente no primeiro filtro de polarização.
- Agora, girar o filtro de polarização atrás do divisor de feixe até que os pontos de luz na tela apresentem luminosidade mínima. Anotar o ângulo pertencente  $\gamma$ .

A direção principal de polarização da luz refletida  $\beta$  está desviada em relação a  $\gamma$  por  $90^\circ$ .

Resultados típicos de experimento estão resumidos na tabela a seguir:

Ângulo de polarização $\alpha$ , Entrada	Ângulo de polarização $\gamma$ , Saída, escuro	Ângulo de polarização $\beta$ , Saída = $\gamma - 90^\circ$
$0^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$
$15^\circ$	$81^\circ$	$-9^\circ$
$30^\circ$	$69^\circ$	$-21^\circ$
$45^\circ$	$57^\circ$	$-33^\circ$
$60^\circ$	$39^\circ$	$-51^\circ$
$75^\circ$	$18^\circ$	$-72^\circ$
$90^\circ$	$0^\circ$	$-90^\circ$

### Polarização da luz na passagem pelo divisor de feixe

- Ambos os divisores de feixe devem agora ser colocados nas posições 1 e 3 conforme Figura 5 e a lente deve ser colocada na posição 2, para interromper o caminho superior da luz.

### Polarização da luz com reflexão no espelho

- Para este experimento, ambos os divisores de feixe de vidro devem ser colocados nas posições 3 e 4. A lente divergente permanece na posição 2.

Os resultados de medição dos 3 experimentos estão resumidos na Figura 6. Pode-se ver que o componente horizontal é espelhado na reflexão, enquanto o componente vertical é mantido. A intensidade das duas curvas dos divisores de feixe indica leve atividade ótica.

### Refração dupla da fita adesiva transparente

Um experimento interessante sobre a refração dupla ainda é possível neste contexto, se a "placa de vidro sobre suporte" do conjunto de acessórios estiver disponível. A montagem de experimento é mostrada na Figura 7.

- Ajustar os dois filtros polares em  $45^\circ$  e  $-45^\circ$ , de forma que praticamente nenhuma luz alcance a tela de observação sem a placa de vidro.

Se a placa de vidro com a fita adesiva for empurrada para o feixe, surge um ponto de luz na tela. Na combinação de ângulos de  $90^\circ$  no primeiro divisor de feixe e de  $0^\circ$  no segundo, a tela fica escura também com a fita adesiva no feixe (combinação de ângulos perpendicular um ao outro, mas em conjunto com aprox.  $\pm 10^\circ$  por tolerâncias da fita adesiva).

A refração dupla da fita adesiva se dá da seguinte forma: Na fabricação, o material de suporte é fortemente expandido em uma direção, através do que as cadeias de hidrocarbonetos são esticadas e orientadas naquela direção. Desta forma, o índice de refração é variado, dependendo se o Vetor E da onda de luz oscila paralelamente ou perpendicularmente à direção da expansão.

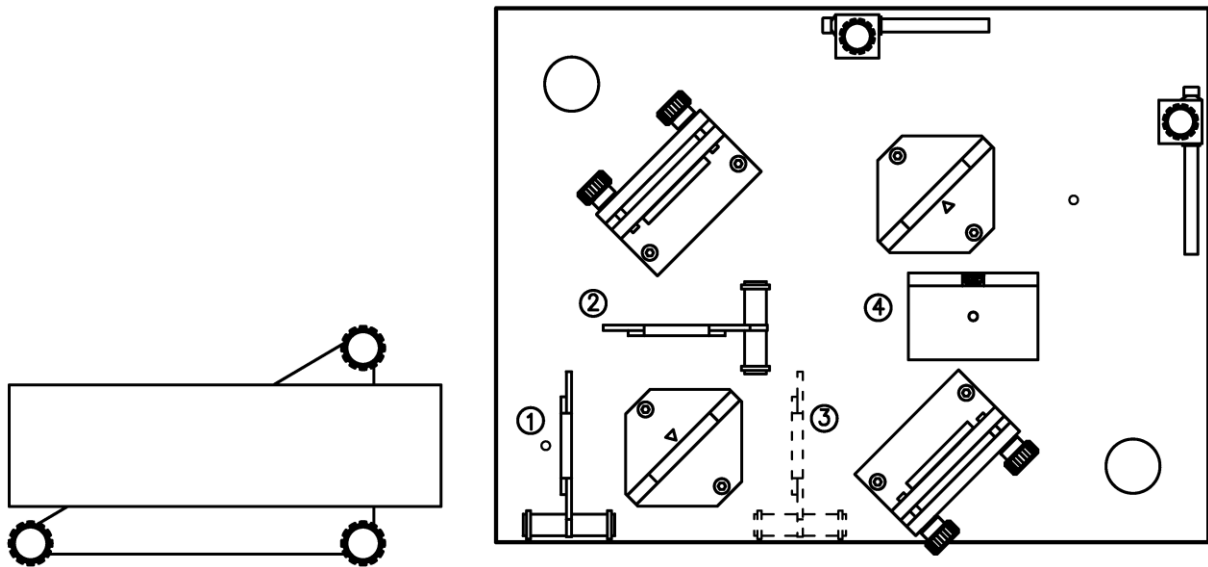


Fig. 5 Montagem de experimento para análises de polarização. A lente divergente, aqui, somente se destina à interrupção do curso do feixe

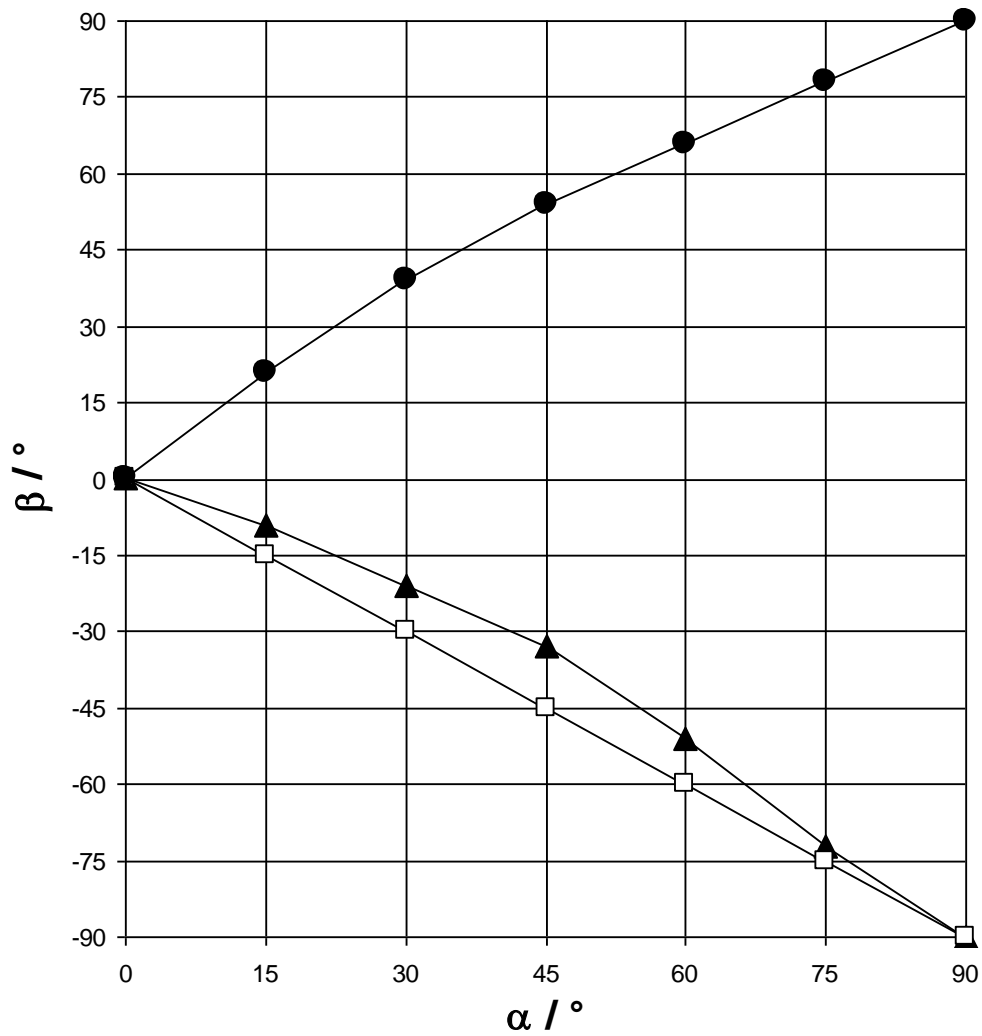


Fig. 6 Resultados dos experimentos de polarização. Círculos = passagem pelo divisor de feixe, triângulos = reflexão no divisor de feixe, quadrados abertos = reflexão no espelho de superfície

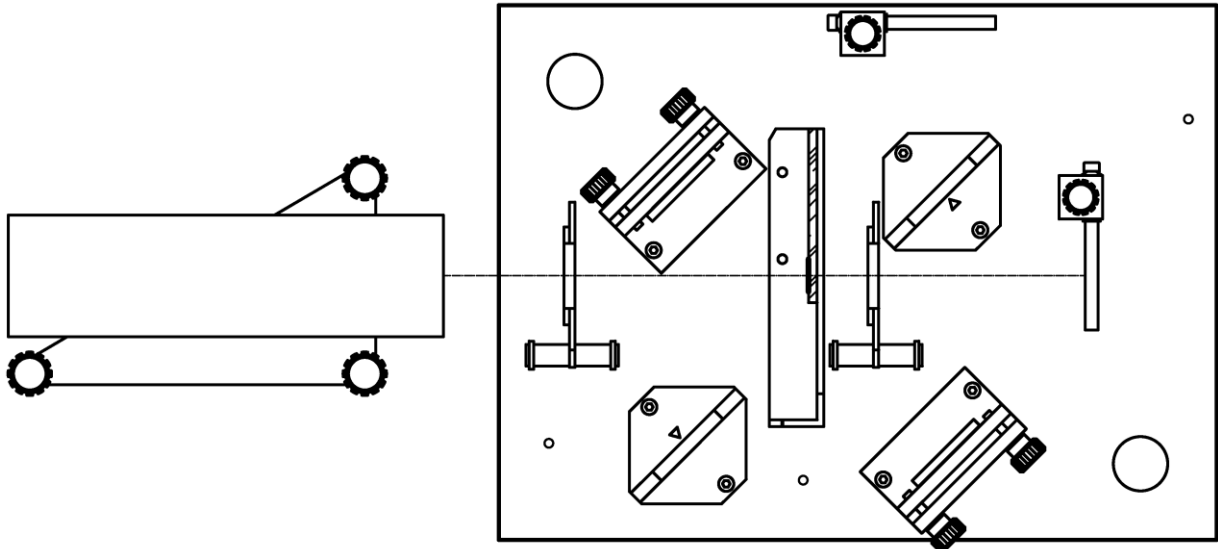


Fig. 7 Montagem de experimento para análise da refração dupla da fita adesiva transparente

### 6.2 Qualidade da superfície de componentes óticos

Com este experimento, pode-se avaliar qualitativamente a qualidade da superfície de componentes óticos. Normalmente, estas medições são feitas com interferômetros de Twyman-Green, em que o feixe de luz (laser) é alargado e paralelo. Para a compreensão qualitativa do princípio da função, contudo, também pode ser usada luz alargada, não paralela.

Como exemplo para uma superfície ótica ruim, é usada uma fita adesiva transparente colada sobre uma placa de vidro e que, olhada normalmente, aparenta ser totalmente homogênea.

- Montar experimento conforme Figura 8.
- Depois que os ajustes básicos conforme item 5 tiverem sido executados e os anéis de interferência forem visíveis em ambas as telas, a placa de vidro com o suporte deve ser empurrada para o feixe parcial da direita.

Quando a fita adesiva entra no feixe, os anéis de interferência se apresentam desfiados e pontos claros aparecem parcialmente em regiões normalmente escuras e vice-versa. Isto se deve à superfície irregular e ondulada da fita adesiva, pois até as menores alterações de densidade de camada são perceptíveis por deslocamento dos anéis de interferência.

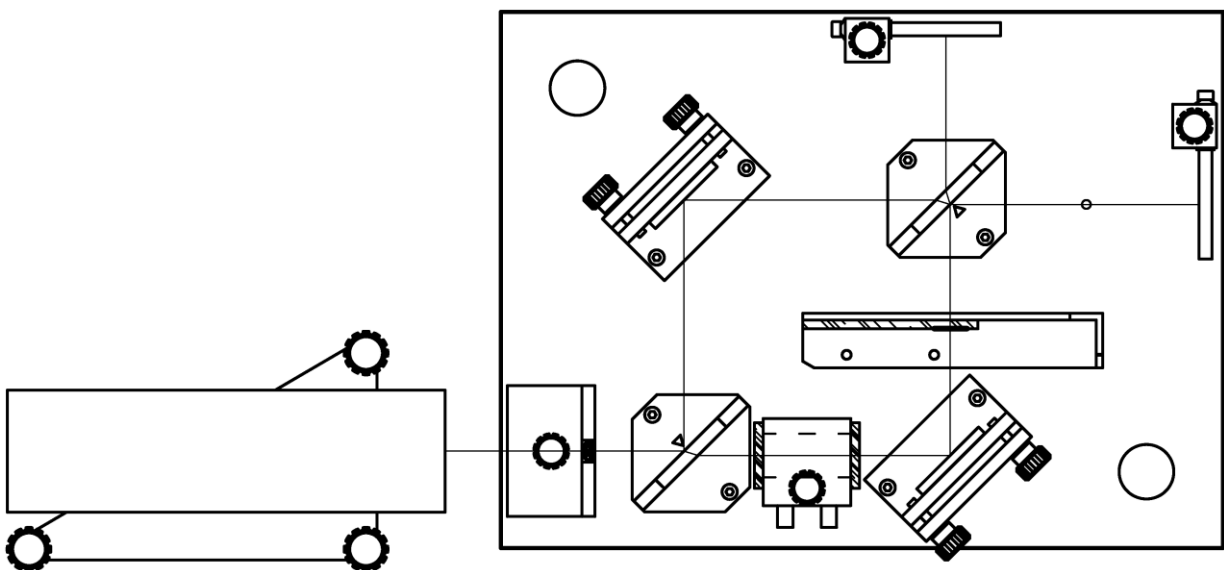


Fig. 8 Montagem de experimento para medição da qualidade da superfície de componentes óticos (sem ampola de vácuo) e montagem de experimento para medição do índice de refração do ar (sem placa de vidro sobre suporte)



### 6.3 Índice de refração do ar

#### Montagem do experimento

- Montar experimento conforme Figura 8.
- Depois que os ajustes básicos conforme item 5 tiverem sido executados e os anéis de interferência forem visíveis em ambas as telas, a ampola de vácuo deve ser colocada no feixe parcial inferior e parafusada.
- Eventualmente, pode-se ajustar minimamente mais um espelho de superfície, para obter os anéis de interferência no centro da tela traseira.

#### Execução

- Conectar a ampola de vácuo na bomba manual de vácuo e anotar a pressão indicada  $p$ .
- Então, evacuar lentamente a ampola e contar a quantidade  $m$  dos anéis que se formarem.
- Anotar, em intervalos regulares, a pressão e a quantidade correspondente.
- Quando for alcançada a pressão mínima (com a bomba manual simples, aprox. 10 kPa), encher a ampola de vácuo novamente com ar.
- Agora, executar nova série de medições com sobrepressão (até, no máximo, 200 kPa, correspondente a 1 bar de sobrepressão).

#### Avaliação

Com a pressão  $p = 0$ , o índice de refração  $n(p = 0) = 1$ . Com o aumento da pressão, o índice de refração aumenta conforme

$$n(p) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta p} p$$

Para verificação do índice de refração com pressão normal, deve-se então determinar, a princípio, o aumento  $\Delta n / \Delta p$ . Em primeira aproximação, vale:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{\lambda}{l_z} \left| \frac{\Delta m}{\Delta p} \right|$$

Sendo  $m$  o número dos anéis que aparecem ou desaparecem,  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz e  $l_z$  é o comprimento interno da ampola de vácuo (aqui, 41 mm). Caso também tenha sido determinado, por exemplo, numa queda de pressão de  $\Delta p = 80$  kPa o  $\Delta m = 14$  correspondente, então resultará  $\Delta n / \Delta p = 2,7 \cdot 10^{-9}$  1/Pa. Assim, o índice de refração do ar em pressão ambiente (100 kPa) será de  $n = 1,00027$ . Na literatura, só se encontra  $n = 1,00029$ . (H. Stöcker, Taschenbuch der Physik [Manual da Física], Deutsch, 1998)

### 6.4 Experimento de analogia ao apagador quântico

- Montar experimento conforme Figura 9.
- Depois que os ajustes básicos conforme item 5 tiverem sido executados e os anéis de interferência forem visíveis no centro de ambas as telas, ajustar um filtro de polarização de lâmina em  $45^\circ$  e colocá-lo entre a lente divergente e o primeiro divisor de feixe.

Isto é necessário, pois o nível de polarização de lasers geralmente não está ajustado para  $45^\circ$  e a polarização adicional em  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  levaria a intensidades de luz muito desiguais dos dois feixes parciais.

Os anéis de interferência nas telas estão um pouco enfraquecidos, porém continuam bastante nítidos. Caso surjam reflexões indesejadas do filtro de polarização na direção do laser, uma leve inclinação do filtro pode resolver o problema.

- A seguir, posicionar os dois filtros de polarização de vidro nos dois feixes parciais.

A intensidade de luz ideal para este experimento é obtida quando o filtro da esquerda está ajustado a  $0^\circ$  e o da direita, a  $90^\circ$  (vide Figura 6: atrás do divisor de feixe, o feixe refletido é girado um pouco na direção  $0^\circ$ , enquanto o feixe que atravessa é girado levemente na direção  $90^\circ$ ).

Os anéis de interferência nas telas agora desapareceram, pois ondas ortogonais não podem se sobrepor ou anular.

- Agora ainda ajustar o segundo filtro de polarização em  $45^\circ$  e posicioná-lo entre o divisor de feixe traseiro e a tela.

Agora, os anéis de interferência passam a ser novamente visíveis. A informação do caminho dos quantas da luz está apagada.

De acordo com a teoria de ondas, isto não é surpreendente. Contudo, na mecânica quântica, os fótons são considerados objetos quânticos indivisíveis e somente o apagamento da informação de caminho antes disponível a princípio (polarização) através do último divisor de feixe deve levar a que os fótons voltem a apresentar interferência e até mesmo com laser extremamente fraco – quando praticamente há somente fótons individuais no interferômetro – interferem consigo mesmos, apesar da indivisibilidade e, portanto, da impossibilidade de passar por ambos os caminhos. Com tais situações, Erwin Schrödinger também teve problemas – ele disse, em 1926: “Se deve ficar nestes malditos saltos quânticos, então lamento ter me dedicado à teoria quântica de início.”

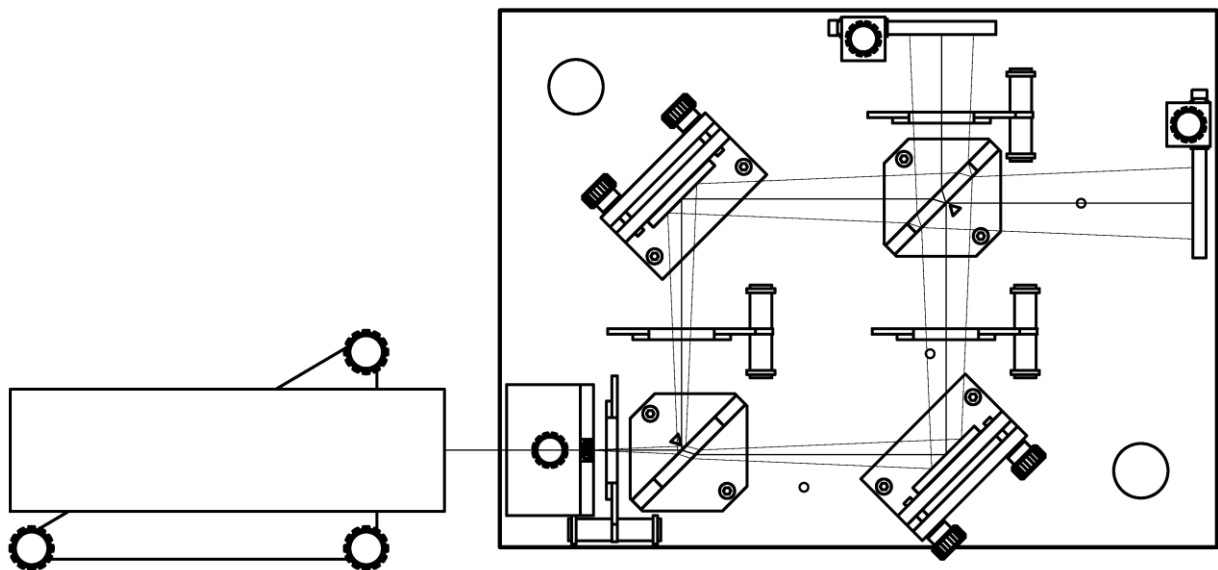


Fig. 9 Montagem do experimento de analogia ao apagador quântico. O caminho do feixe vale para o caso de caminhos iguais da luz em ambos os feixes parciais e não corresponde à descrição do experimento com anéis de interferência.

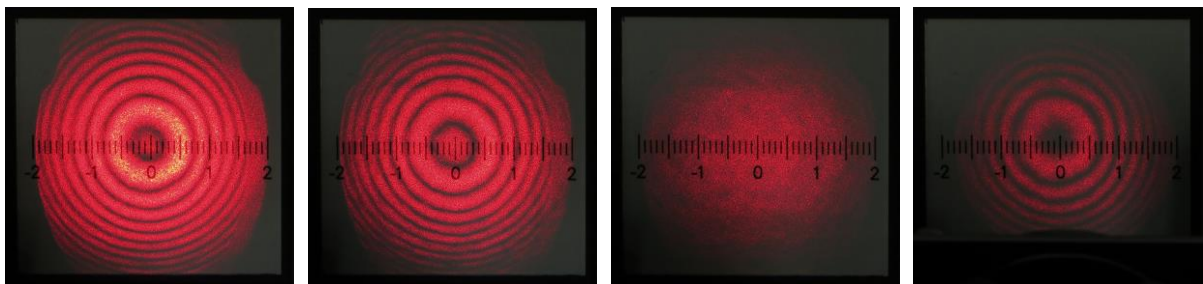


Fig. 10 da esquerda para a direita: 1. sem filtro de polarização, 2. um filtro de polarização ( $45^\circ$ ) entre lente e divisor de feixe, 3. dois outros filtros de polarização ( $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ) em ambos os feixes parciais, 4. quarto filtro de polarização ( $45^\circ$ ) entre divisor de feixe e tela

### 6.5 Interferência em luz branca

A luz branca, por conta de seu amplo espectro, tem comprimento de coerência muito curto. Portanto, ambos os caminhos da luz precisam, para a observação de interferências, ser quase exatamente do mesmo comprimento. Esta exigência é possível de ser atendida, a princípio, com um interferômetro de Mach-Zehnder, porém a instalação exige paciência e sensibilidade.

**Montagem do experimento:** A montagem de experimento é mostrada na Figura 11. A lente divergente é montada primeiramente ainda entre o laser e o primeiro divisor de feixe.

- Executar os ajustes básicos com a luz laser conforme item 5.3, Passos 1 até 6. Durante esta etapa, atentar para que a fenda de 4 mm de largura entre o suporte do espelho e a parede traseira seja ajustada de forma muito precisa.

- Ajustar também a altura do Laser cuidadosamente.

Após os ajustes básicos, o centro dos anéis de interferência pode ser visto como grande mancha clara ou escura nas telas.

- Agora, rebater a tela traseira e projetar o padrão em tela adicional a uma distância mínima de 0,5 m (folha de papel, parede branca).

A distância maior evita interpretações equivocadas por cortes abrasivos nos ajustes a seguir, que devem ser feitos no espelho de superfície **anterior**:

- 1. Retirar a lente da trajetória do feixe.
- 2. Girar o parafuso serrilhado do espelho em ambas as direções. Se o ponto viajante de luz ficar à direita do outro, então o parafuso sextavado interior deve ser rosqueado para fora, até que o ponto que

até então viajava para a esquerda esteja à mesma distância à esquerda do outro que estava anteriormente à direita (ignorar desvios de altura).

- 3. Trazer ambos os pontos de volta à congruência, reposicionar a lente e voltar a centralizar os anéis de interferência.
- 4. Executar os passos 1 até 3 até que não possa ser obtida qualquer melhora adicional.
- Agora, no lugar do laser, colocar a luminária ótica com diafragma à distância de cerca de 25 cm da placa de base, alinhando os cantos dianteiros da placa de base e do suporte da luminária.
- Girar o diafragma até que o orifício com diâmetro de 0,7 mm esteja diante do LED.
- Retirar a lente da trajetória do feixe, levantar novamente a tela traseira e colocar os filtros de polarização conforme Figura 11, posicionando-os de forma que as sombras na tela traseira estejam em 1 cm.

As bordas das sombras facilitam o ajuste fino a seguir:

- A. Girar o parafuso inferior do espelho dianteiro muito lentamente em ambas as direções, fazendo a borda correspondente

de sombra movimentar-se cerca de 1-2 mm para a direita ou para a esquerda.

- B. Quando não houver faixas de transferência visíveis, então girar o parafuso inferior do espelho traseiro cerca de 1/50 de volta (corresponde a 1 mm do perímetro da cabeça serrilhada ou aprox. a largura da depressão do serrilhado) no sentido horário e repetir o passo A. Se, depois de algumas tentativas, não for obtido êxito no sentido horário, então deve-se tentar no sentido anti-horário.
- C. Pode ser necessário verificar os ajustes com luz laser. Atentar especialmente ao ajuste vertical, pois os parafusos serrilhados superiores dos espelhos podem ter se movimentado levemente neste meio tempo.
- D. Caso seja visível pelo menos um padrão de interferência de luz branca muito estreito, então montar a lente divergente para aumento conforme Figura 11.

**Dica:** Caso um filtro de cor com largura estreita de passagem seja colocado diante da luminária ótica, um padrão de interferência já ficará visível com ajuste um pouco menos preciso.

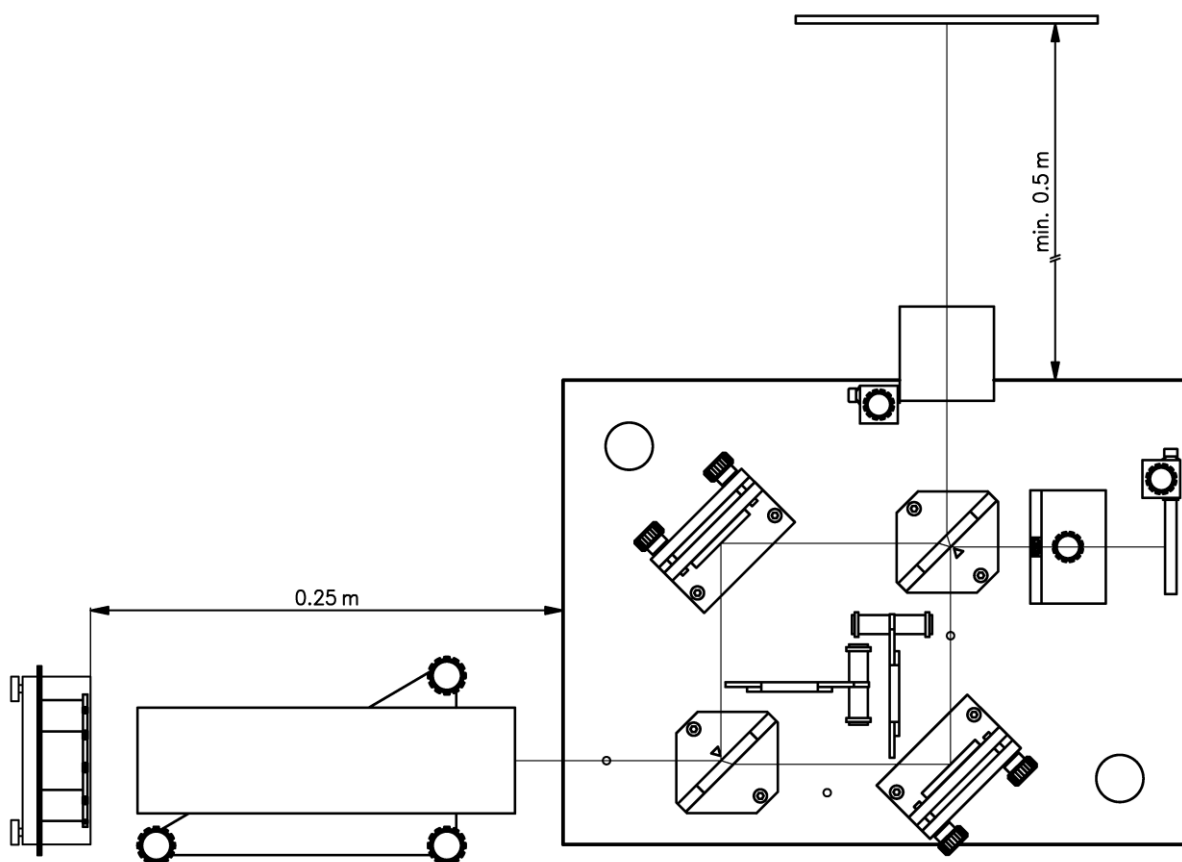


Fig. 11 Montagem do experimento de interferência em luz branca

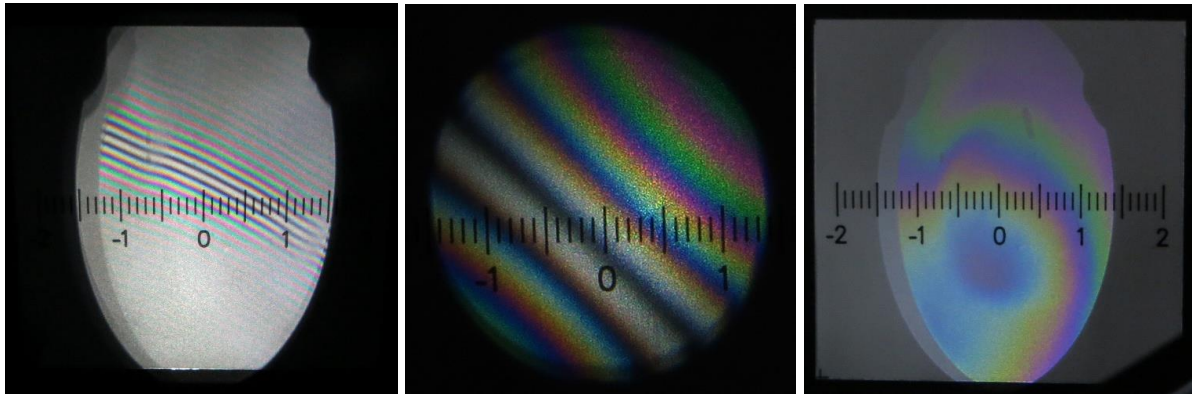


Fig. 12 Padrão de interferência em luz branca. A figura à esquerda mostra faixas com ajuste ainda não perfeito na tela traseira. Uma seção ampliada por lente divergente está demonstrada ao centro. A figura da direita mostra novamente a tela traseira, porém com ajuste melhor.