

## Zielstellung

Aufbau eines Mikroskops mit Projektiv; Vermessung sehr kleiner Längen im Objekt unter Zuhilfenahme eines Kalibriermaßstabs; Untersuchung des Einflusses von Beugung auf die Bildentstehung.

## Experimenteller Ablauf

**Achtung! Nicht direkt in den Laserstrahl schauen. Beim Experimentieren keine reflektierenden Gegenstände (z.B. Schmuck) an den Händen tragen!**

**Bitte befestigen Sie am Schirm ein Blatt Papier, um Markierungen vorzunehmen und Abstände im Nachhinein mit dem Lineal zu messen. Notieren Sie sich Positionen aller Komponenten auf der optischen Bank und halten Sie anhand geeigneter Skizzen fest, was Sie beobachten und was Sie genau messen.**

1. Das Beleuchtungssystem (He-Ne-Laser mit  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ), Sammellinse 1 mit  $f = 5 \text{ mm}$ , Sammellinse 2 mit  $f = 50 \text{ mm}$ ) wird durch Verschieben der Sammellinse 2 so eingestellt, dass ein aufgeweitetes Parallelstrahlenbündel (Durchmesser  $10 \dots 15 \text{ mm}$ ) über die gesamte Länge der optischen Bank auf einer Höhe zur Verfügung steht. Die Sammellinse 1 darf aus sicherheitstechnischen Gründen nicht verändert werden!
2. Im Folgenden erstellen Sie das Mikroskop:
  - a) Realisieren Sie zunächst die erste Abbildungsstufe. Positionieren Sie das Objekt (Testobjekt „Baum“) auf die Position  $z_{\text{obj}} = 400 \text{ mm}$  und den Schirm auf  $z_{\text{s},1} = 700 \text{ mm}$ . Verschieben Sie das Objektiv ( $f_{\text{obj}} = 50 \text{ mm}$ ), sodass ein fokussiertes Bild auf dem Schirm entsteht. Als Fokussierhilfe sollte ein Diffuser in den Strahlengang eingebracht werden. Stellen Sie anschließend den Schirm in die hintere Brennebene des Objektivs, entfernen Sie den Diffuser und überzeugen Sie sich, dass ein Beugungsbild zu sehen ist.
  - b) Realisieren Sie nun die zweistufige Abbildung. Bringen Sie den Schirm auf die Position  $z_{\text{s},2} = 1900 \text{ mm}$  und fokussieren das Abbild der Objektebene mithilfe der Projektivlinse ( $f_{\text{proj}} = 100 \text{ mm}$ ). Ermitteln Sie die Kästchenbreite der Teststruktur in der Bildebene. Berechnen Sie die Mikroskopvergrößerung aus den gemessenen Positionen von Objekt, Linsen und Schirm (eine Behandlung der Messunsicherheiten entfällt in diesem Schritt).
  - c) Verschieben Sie die Projektivlinse, sodass Sie das Beugungsbild erhalten. Bestimmen Sie den Abstand zwischen Nullstrahl und dem Interferenzmaximum erster Ordnung in diagonaler Richtung. Dieser entspricht der reziproken Länge der Diagonalen eines Kästchens im Objekt. Notieren Sie die höchste sichtbare Beugungsordnung.
3. Kalibrieren Sie nun die Bildebene sowohl für die Abbildung des Objekts, als auch für das Beugungsbild:
  - a) Verschieben Sie zunächst die Projektivlinse auf die ursprüngliche Position (2b). Ersetzen Sie dann das Objekt durch den vorliegenden Kalibrierungsmaßstab (0,1 mm Teilung, 1% systematische Unsicherheit) und verschieben Sie diesen, bis der Maßstab im Fokus ist.

Messen Sie die Länge der minimalen Skalenteilung im Bild und bestimmen daraus die Vergrößerung des Mikroskops. Wiederholen Sie die Scharfstellung und Messung mindestens dreimal und schätzen Sie daraus die statistische Messunsicherheit der Vergrößerung ab.

- b) Für die Kalibrierung des Beugungsbildes nutzen Sie das Beugungsbild des Maßstabs (s. Aufg. 2c). Vergleichen Sie zunächst die Beugungsbilder von zwei verschiedenen Maßstäben (z. B. mit Teilungen von 0,1 mm und 0,01 mm), um sich davon zu überzeugen, dass der Abstand von der nullten zur ersten Ordnung im Beugungsmuster umgekehrt proportional zur kleinsten Skalenteilung ist. Notieren Sie die höchste sichtbare Beugungsordnung für beide Maßstäbe. Ermitteln Sie anschließend anhand des Maßstabs mit 0,1 mm Teilung den entsprechenden Proportionalitätskoeffizienten. Wiederholen Sie die Scharfstellung und Messung mindestens dreimal und ermitteln Sie daraus die statistische Messunsicherheit dieser Kalibrierung.
4. Ermitteln Sie die Kästchenbreite im Objekt mit drei unabhängigen Methoden:
- aus der Kästchenbreite im Bild (2b) und der direkt kalibrierten Vergrößerung (3a), mit Ermittlung der Unsicherheiten;
  - aus dem Abstand der Beugungsreflexe (2c) unter Einbeziehung der jeweiligen Kalibrierung des Beugungsbildes (3b), mit Ermittlung der Unsicherheiten;
  - aus der Kästchenbreite im Bild (2b) und der berechneten Vergrößerung (2b), Ermittlung der Unsicherheiten entfällt.

Vergleichen Sie diese drei Ergebnisse in einer Tabelle und geben Sie dabei die statistischen und systematischen Messunsicherheiten an (nur bei a und b). Welche Methode liefert Ihrer Meinung nach das genaueste Ergebnis und warum?

5. Ermitteln Sie den Aperturwinkel  $\alpha$  des Objektivs aus dem
- Durchmesser der Objektivlinse und der Gegenstandsweite.
  - Winkel der höchsten Beugungsordnung  $\varphi_k$ .

Stimmen die beiden Ergebnisse überein?

6. Stellen Sie das Projektiv wieder an die Position, bei der der Gegenstand scharf auf dem Schirm abgebildet wird (s. Aufg. 2b). Bringen Sie die Schlitzblende des Fourier-Periskops in die bildseitige Brennebene der Objektivlinse (Abb. 2). Dabei sollen Sie sowohl die Abbildung als auch das Beugungsbild gleichzeitig auf dem Schirm sehen können. Nun haben Sie die Möglichkeit die Schlitzblende zu verschieben, zu drehen und die Öffnung zu verstehen. Wie verändert sich das Bild des Schachbrettmusters, wenn die Blendenöffnung verringert wird? Wie verändert sich das Bild, wenn Sie die Blende seitlich verschieben und der Nullstrahl nicht mehr zur Abbildung beiträgt? Was ist zu sehen, wenn der Nullstrahl und die Beugung erster Ordnung abgedeckt werden, sodass nur die Beugungsmaxima zweiter und höherer Ordnungen übrig bleiben? Drehen Sie die Schlitzblende um  $45^\circ$  damit nur Beugungsmaxima in einer Richtung durchgelassen werden. Was beobachten Sie? Skizzieren Sie für mind. drei verschiedene Situationen die Lage der Blende in der hinteren Brennebene und die Auswirkungen auf das Bild. Erklären Sie Ihre Beobachtungen!

## Hinweise zur Aufgabenstellung

Zu 1. Überlegen Sie sich eine genaue Vorgehensweise, die zum Ziel hat einen Strahl zu erhalten, der sowohl in sich als auch bezüglich der optischen Bank parallel verläuft. Bevor Sie Linsen in den Strahlengang einbauen, sollten diese bezüglich ihrer Höhe ausgerichtet werden.

- Zu 2. Beachten Sie, dass die Kriterien für den Fokus in der ersten und zweiten Abbildungsstufe unterschiedlich sind. Während im ersten Fall Beugungssäume aufgrund der geringen Vergrößerung nicht sichtbar sind, sind diese für den zweiten Fall ein sehr nützliches Hilfsmittel.
- Zu 3. Überlegen Sie sich, wie Sie am günstigsten das Ortsraumbild und das Beugungsbild kalibrieren. Beachten Sie, dass sich Abstände im Beugungsbild reziprok zu Abständen im Ortsraum verhalten.
- Zu 4. Zum Abbildungsmaßstab für das Beugungsbild sollten die folgenden Überlegungen angestellt werden: Für die am Gitter gebeugten Strahlen, die konstruktiv interferieren, gilt für den Beugungswinkel erster Ordnung ( $k = 1$ ):

$$\tan \varphi_1 = \frac{s_{\text{obj}}}{f_{\text{obj}}} \quad \text{und} \quad \sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{d}$$

wobei  $s_{\text{obj}}$  den Abstand des Reflexes erster Ordnung vom Nullstrahl in der Brennebene der Objektivlinse bezeichnet. Für kleine Beugungswinkel  $\varphi_1$  ergibt sich folglich der Gitterabstand im Objekt zu

$$d = \lambda \cdot \frac{f_{\text{obj}}}{s_{\text{obj}}} \quad \text{mit} \quad s_{\text{obj}} = \frac{s_{\text{proj}}}{\beta'_{\text{proj}}}.$$

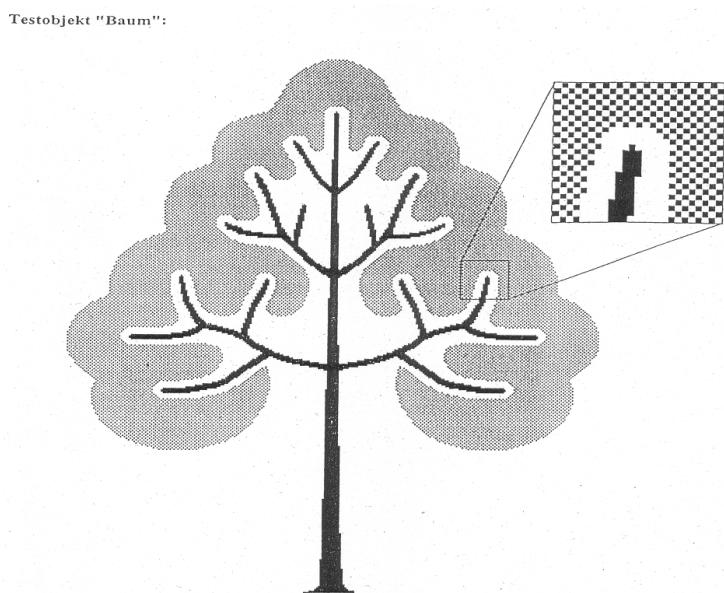
Verwenden Sie den nominellen Wert für  $f_{\text{obj}}$ .

- Zu 5. Für das Beugungsmaximum  $k$ -ter Ordnung gilt:

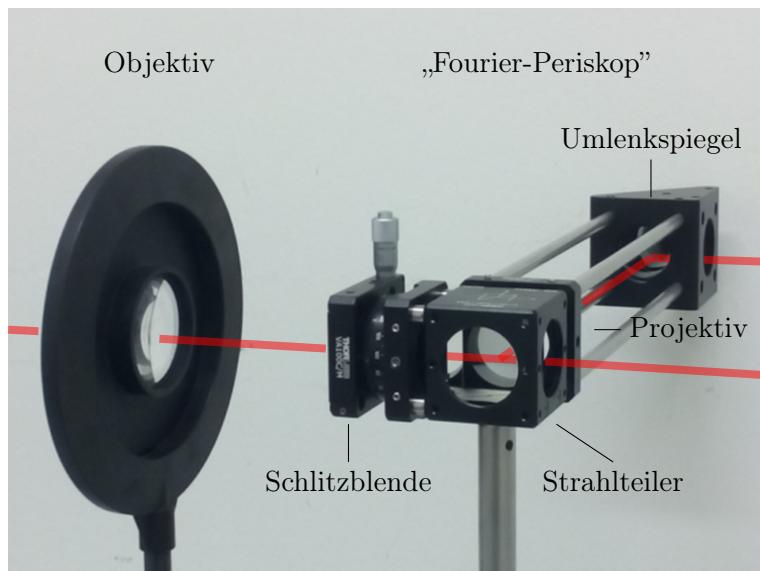
$$\sin \varphi_k = k \cdot \frac{\lambda}{d}.$$

- Zu 6. Die Aperturblende liegt dann exakt in der „Beugungsebene“ des Objektivs, wenn sowohl Blende als auch Beugungsbild scharf abgebildet werden. Zentrieren Sie die Blende exakt zum Nullstrahl, sodass beim Zuziehen der Blende die Beugungsreflexe symmetrisch zum Nullstrahl ausgebündet werden.

**Beim Experimentieren muss z.T. vollständig abgedunkelt werden!**



**Abb. 1:** Test-Objekt mit periodischen und nicht-periodischen Strukturen



**Abb. 2:** Fourier-Periskop bestehend aus Strahlteiler, Schlitzblende, Projektivlinse und Spiegel ermöglicht die parallele Betrachtung von Bildebene und hinterer Brennebene. Dazu wird die verstellbare Schlitzblende in die hintere Brennebene der Objektivlinse positioniert.