

# Fourieroptik - Versuchsaufgaben

Karlsruher Institut für Technologie

17. Oktober 2023

## Vorversuch

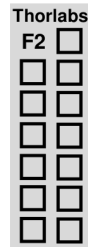
Suchen Sie sich zwei Linsen, die für den Aufbau zur Verfügung stehen, aus und bauen Sie daraus ein Mikroskop mit Unendlich-Strahlengang auf dem Breadboard auf. Statt einer Kamera können Sie hier einen Beobachtungsschirm verwenden. Als zu vergrößerndes Objekt können Sie das Target nutzen (hierzu sind z.B. Buchstaben aus der Targetbeschriftung ganz brauchbar). Welche Vergrößerung hat Ihr Mikroskop?

Bauen Sie nun noch ein „Mikroskop“ auf, das eigentlich eine Verkleinerung des Objekts bewirkt (wieder mit beliebig ausgewählten Linsen). Wie ist der Verkleinerungsfaktor?

## Aufgaben

### Aufgabe 1:

Justieren Sie den Aufbau gemäß der Anleitung in Anhang 1. Auf dem Kamerabild sollte ein Gitter (z.B.  $g = 15 \mu\text{m}$  und  $b = 6 \mu\text{m}$ , Feld F2) zu sehen sein. Die Fourier-Ebene sollte scharf auf den Schirm abgebildet werden.



### Aufgabe 2:

Welche Rolle spielen die Irisblenden? Beobachten Sie den Effekt, den das Öffnen von entweder der Feld-Iris oder Apertur-Iris auf das Bild, das Fourier-Bild und die Ausleuchtung des Objekts hat.

### Aufgabe 3:

Platzieren Sie ein Kreuzgitter (beispielsweise das Kreuzgitter mit  $15 \mu\text{m}$  Gitterkonstante, Feld F2) in der Objektebene und stellen Sie ggf. die Objektivlinse so ein, dass das Bild an der Kamera scharf ist. Positionieren Sie nun den variablen Spalt so in der Fourier-Ebene, dass der hellste Punkt mittig im Spalt liegt. Stellen Sie nun den Spalt so ein, dass nur noch

Licht in einer horizontalen Linie entlang des Hauptmaximums passieren kann. Was ergibt sich im Kamera-/Mikroskopbild und warum?

#### Aufgabe 4:

Drehen Sie den Spalt um  $90^\circ$  und lassen Sie wieder nur Licht entlang der vertikalen Linie des Hauptmaximums passieren. Was erwarten Sie für ein Kamerabild?

#### Aufgabe 5:

Drehen Sie den Spalt nun in den  $45^\circ$  Winkel und lassen Sie nur das Licht des Hauptmaximums und der entsprechenden schrägen Ordnungen passieren. Was ergibt sich für ein Bild auf der Kamera und warum?

#### Aufgabe 6:

Platzieren Sie den „Smiley hinter Gitterstäben“ in der Objektebene (Feld F9) und stellen sie ggf. das Kamerabild mit der Objektivlinse scharf. Filtern Sie nun in der Fourier-Ebene mit Hilfe des variablen Spalts so, dass der Smiley befreit wird.

#### Aufgabe 7:

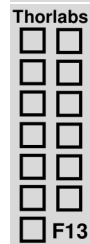
Platzieren Sie das Feld mit dem Fourier-Haus (Feld F10) in der Objektebene und stellen Sie ggf. scharf. Erklären Sie, wie das spezielle Interferenzmuster in der Fourier-Ebene zustande kommt.. Verwenden Sie den variablen Spalt entlang verschiedener Richtungen, um unterschiedliche Teile des Musters zu blockieren. Finden Sie die Orientierungen, in denen sich das Kamera-Bild der Tür, des Dachbodens, der Hausfront und des Schornsteins verändert.

#### Aufgabe 8:

Platzieren Sie die Dreiecke in der Objektebene, Feld F5. Justieren Sie Maske Nr. 2 in der Fourier-Ebene so, dass jedes zweite Maximum in allen drei Geraden der Beugungsmaxima ausgeblendet wird. Was erwarten Sie zu auf der Kamera zu sehen?

#### Aufgabe 9:

Wählen Sie auf dem Target die Struktur mit dem Titel „Babinet“ (Feld F13) und setzen Sie wieder die Masken statt des Spalts ein. Blockieren Sie die nullte Ordnung in der Fourier-Ebene mit einem der Punkte auf der Maske. Was sehen Sie auf dem Kamerabild und warum?



**Aufgabe 10:**

Wählen Sie einen Schriftzug auf dem Target aus und platzieren Sie ihn in der Objektebene. Heben Sie an einem der Buchstaben die Kanten hervor.

**Aufgabe 11:**

Zeichnen Sie das Bild des gleichen Buchstabens wie in der vorhergehenden Aufgabe weich. Positionieren Sie dazu die zweite Irisblende ID12/M in der Fourierebene. Schließen Sie die Apertur-Iris vollständig.

## Anhang 1: Aufbau und Justierung des Experiments

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau und die Justierung des Experiments.

Um ein Gefühl für das Experiment und die Funktion der Komponenten zu bekommen, ist es ratsam mit den Vorversuchen aus Abschnitt 4 zu beginnen.

Um zu verhindern, dass Komponenten, nachdem sie ihre endgültige Position eingenommen haben, nochmals verschoben werden, ist es ratsam alle Komponenten mit Klemmen und Schrauben zu fixieren. Stellen Sie die Standardeinstellungen der Kamera wieder her.

### Schritt 1: Einstellung der Höhe

- Stellen Sie die Höhe aller Komponenten unter Zuhilfenahme eines Lineals auf 10 cm ein, gemessen vom Breadboard zur Mitte des optischen Elements. Der Filterhalter sollte im zur Seite geklappten Zustand eingestellt werden.
- Die zulässigen Höhen der Komponenten bewegen sich im Bereich zwischen 9 cm und 11 cm.<sup>1</sup>

### Schritt 2: Kamera und Tubuslinse

- Stellen Sie die Kamera am rechten Ende des Breadboards mit Blick über die vierte Lochreihe auf (vom Benutzer aus gezählt) und schrauben Sie sie fest, vgl. Abbildung 1.

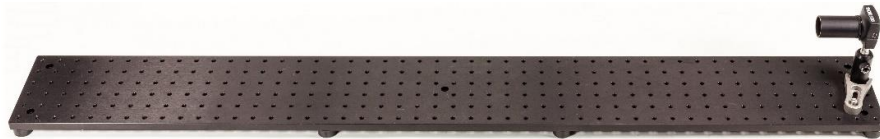


Abbildung 1: Positionierung der Kamera

- Starten Sie die Kamerasoftware Thorcam und wählen Sie den Live-Bild-Modus.
- Positionieren Sie die Tubuslinse ( $f = 150 \text{ mm}$ ) auf der Lochreihe vor der Kamera in einem ungefähren Abstand von 150 mm, vgl. Abbildung 2.
- Um die korrekte Position der Tubuslinse vor der Kamera zu ermitteln, ist es notwendig ein scharfes Bild eines weit entfernten Objektes mit der Kamera einzufangen. Achten Sie auf eine gute Ausleuchtung ihrer Räumlichkeiten um ausreichend Intensität auf die Kamera zu bringen (es ist möglich mit Hilfe der Kameraeinstellungen eine unzureichende Beleuchtung teilweise auszugleichen, das erhöht aber das Rauschen im Bild). Positionieren Sie den Strahlteiler 10 cm vor der Tubuslinse und decken Sie den Transmissionsweg mit einer Kappe ab. In diesem Fall schaut die Kamera durch den Strahlteiler im rechten Winkel zum Breadboard in den Raum. Nun können Sie den Abstand zwischen Tubuslinse und Kamera so anpassen, dass Sie auf der Kamera ein scharfes Bild eines mehr als 4 Meter entfernten Gegenstandes sehen. Befestigen Sie die Linse am Breadboard und entfernen Sie den Strahlteiler.

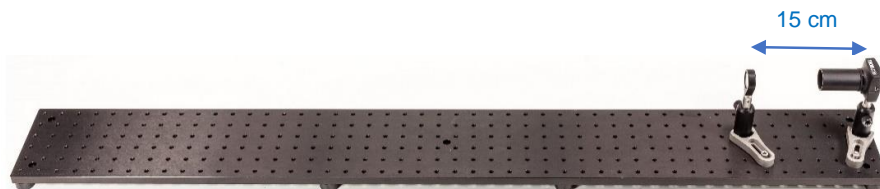
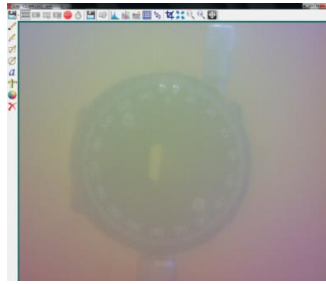


Abbildung 2: Positionierung der Tubuslinse

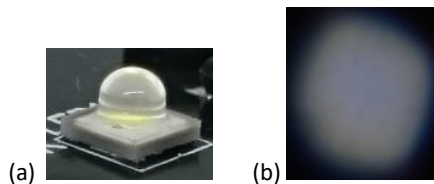
<sup>1</sup> Falls Sie sich für den Aufbau auf der optischen Bank entschieden haben, dann sollte der Abstand zwischen der Oberseite der Bank und der Mitte der optischen Elemente 7 cm betragen.



**Abbildung 3:** RSP1D-Halter in 4 Metern Entfernung von der Kamera. Die Tubuslinse wurde vor der Kamera positioniert um ein scharfes Bild zu erhalten (mit den Standardeinstellungen der Kamera).

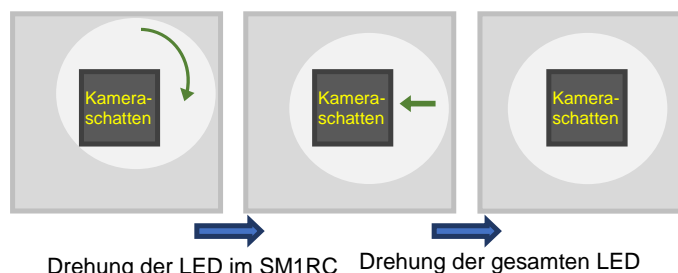
### Schritt 3: Kollimation und Ausrichtung der LED

- Richten Sie die LED auf eine Wand oder die Zimmerdecke und drehen Sie an dem variablen Tubus um die Kollimationslinse in die korrekte Position zu bringen. Bei korrekter Einstellung sehen Sie den LED-Chip (helles Quadrat mit dunklen Flecken). Regeln Sie die Intensität der LED, sodass es für Sie angenehm ist. Da der LED-Chip von einer Plastikkappe abgedeckt ist, werden Sie kein vollständig scharfes Bild des Chips erreichen.<sup>2</sup> Fixieren Sie den Tubus mit dem Feststellring.



**Abbildung 4:** (a) Nahaufnahme des LED-Chips mit der Plastikkappe, (b) Muster der schwachen, schwarzen Punkte RSP1D-Halter in 4 Metern Entfernung von der Kamera. Die Tubuslinse wurde vor der Kamera positioniert um ein scharfes Bild zu erhalten (mit den Standardeinstellungen der Kamera). Die genaue Form kann variieren.

- Positionieren Sie den Schirm hinter der Kamera.
- Positionieren Sie die LED 100 cm von der Kamera entfernt auf der Lochlinie.
- Achten sie auf den Schatten der Kamera auf dem Schirm. Es kann sein, dass der Schatten nicht in der Mitte des ausgeleuchteten Bereichs ist (dies kann passieren, wenn der LED-Chip nicht perfekt mittig im Gehäuse ist, was allerdings nur in seltenen Fällen auftritt). Sollte der Schatten nicht in der Mitte sein, *ändern Sie nicht die Höhe der Kamera oder der LED*, sondern gehen Sie wie folgend vor:
  - Drehen Sie die LED im SM1RC Halter bis die Mitte des ausgeleuchteten Bereichs rechts oder links von der Kamera ist. Durch den gelben Warnaufkleber der LED kann die Drehung sehr schwergängig sein. Fixieren Sie den SM1RC mit der Schraube.
  - Rotieren Sie nun die gesamte LED mit ihrem Halter bis der Kameraschatten in der Mitte des ausgeleuchteten Bereichs ist. Schrauben Sie die LED am Breadboard auf der Lochreihe fest.



**Abbildung 5:** Zentrierung des Lichtkegels mittels des Kamera-Schattens

<sup>2</sup> In diesem Kontext ist der Gebrauch des Wortes „Kollimation“ etwas missverständlich. Das Scharfstellen des Chips auf einer entfernten Wand oder der Zimmerdecke führt nicht zu einer ideal kollimierten Lichtquelle. Den Chip zu sehen vereinfacht aber die spätere Justierung und das Licht ist „ausreichend“ kollimiert. Weiterhin gibt es nicht *die* richtige Einstellung: die dunklen Punkte sind 1 bis 2 Umdrehungen des Tubus lang sichtbar.

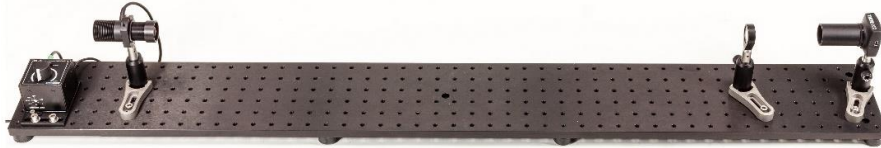


Abbildung 6: Positionierung der LED

#### Schritt 4: Objektivlinse

- Stellen Sie die Objektivlinse ( $f = 30 \text{ mm}$ ) 18 bis 20 cm entfernt von der Tubuslinse auf (Abstand zwischen den Linsen-Mitten). Die richtige Ausrichtung der Linse ist in Abbildung 7 gezeigt.
- Schrauben Sie die Klemme an der oberen Kante des Breadboards fest (vgl. Abbildung 7).
- Drehen sie den variablen Tubus, sodass die Linse in beide Richtungen beweglich ist.



Abbildung 7: Position der Objektivlinse.

#### Schritt 5: Target

- Drehen Sie die Höhenschraube im Uhrzeigersinn um das Target an den höchstmöglichen Punkt zu bewegen.
- Stellen Sie die Höhe des Stiels des XYF1(/M) so ein, dass der Siemensstern „Sector star“, unterste Reihe auf dem Target, Feld F14) auf Höhe Ihrer optischen Achse ist. Laut Schritt 1 sollten dies 10 cm sein.
- Positionieren Sie das Target einige mm von der Objektivlinse entfernt (wie in Abb. 18). Bewegen Sie das Target vor und zurück bis ein scharfes Bild des Siemenssterns auf der Kamera sichtbar wird (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). Eventuell müssen Sie die Intensität der LED oder die Exposure Time der Kamera herunterregeln um eine Überblendung der Kamera zu verhindern.
- Stellen Sie sicher, dass das Target im rechten Winkel zum Strahlengang steht und fixieren Sie alles auf dem Breadboard.
- Sollte das Kamerabild noch leicht unscharf sein, können Sie dies durch Drehen der Objektivlinse ausgleichen.
- Stellen Sie das Target mit den Schrauben des XYF1(/M) so ein, dass Sie das Feld mit den neun Häusern, F10, beleuchten. Bewegen Sie das Target so, dass Sie das mittlere der Häuser auf der Kamera sehen können.

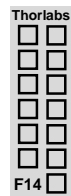


Abbildung 8: Position des XY-Halters mit dem Target

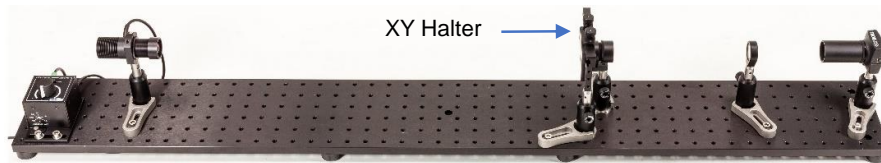


Abbildung 9: Position des XY-Halters mit dem Target, Überblicksbild.

### Schritt 6: Kondensorlinse

- Stellen Sie die Kondensorlinse ( $f = 50 \text{ mm}$ ), wie in Abbildung 10 gezeigt, in 50 mm Entfernung zum Target, gemessen vom Mittelpunkt der Linse, auf.
- Bewegen Sie die Kondensorlinse vor und zurück und betrachten Sie die Größe des Ausleuchtungsbereiches auf dem Target. Dabei kann es hilfreich sein, wie in Abbildung 13 ein Stück Papier vor das Target zu halten.
- Positionieren Sie die Kondensorlinse so, dass der Ausleuchtungsbereich den kleinstmöglichen Durchmesser hat.
- Entfernen Sie das Stück Papier aus dem Strahlengang und stellen Sie sicher, dass der Ausleuchtungsbereich das mittlere Haus der „Fourier House“-Struktur ausleuchtet (Feld F10). Sollte dies nicht der Fall sein, dann passen Sie die Linsenhöhe an.



Abbildung 10: Positionierung der Kondensorlinse.

### Schritt 7: Apertur-Iris

- Stellen Sie die Apertur-Iris (die kleinere, ID12(/M)) 50 mm entfernt von der Kondensorlinse auf, gemessen von der Iris zur Mitte der Kondensorlinse (vgl. Abbildung 11).
- Schließen Sie die Iris und stellen Sie die Höhe der Iris so ein, dass der Linsenhalter der Kondensorlinse wie in Abbildung 14 beschattet ist (das Streulicht an der unteren Kante wird im nächsten Schritt beseitigt).<sup>3</sup>

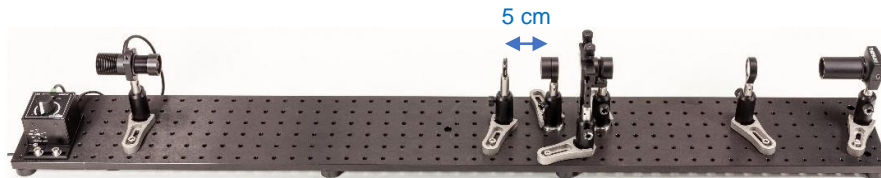
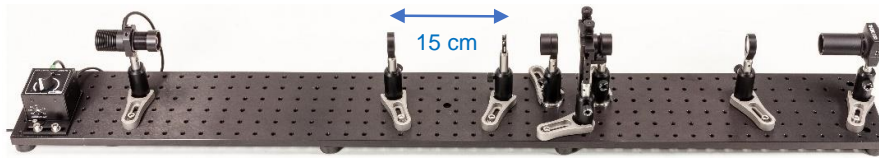


Abbildung 11: Positionierung der Apertur-Iris.

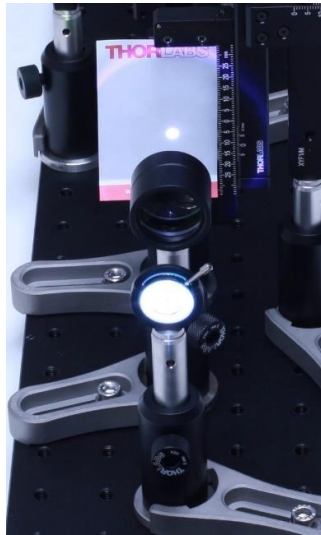
### Schritt 8: Feldlinse

- Positionieren Sie die Feldlinse ( $f = 150 \text{ mm}$ ), wie in Abbildung 12 gezeigt, in ungefähr 150 mm Abstand zur Apertur-Iris.
- Halten Sie ein Stück Papier direkt vor die Apertur-Iris.
- Verschieben Sie die Feldlinse bis der LED-Chip (helles Quadrat mit dunklen Punkten) auf dem Stück Papier zu sehen ist. Ggf. sollten Sie die Intensität der LED am Controller herunterregeln. Es ist allerdings schwierig den LED-Chip zu erkennen. Falls Sie den Chip nicht sehen können, ist es ausreichend die Feldlinse im Abstand von 150 mm zur Apertur-Iris aufzustellen.
- Korrigieren Sie falls nötig die Höhe der Feldlinse. Der Ausleuchtungsbereich sollte in der Mitte der Apertur-Iris zu sehen sein, siehe Abbildung 15.

<sup>3</sup> Wenn die Apertur-Iris komplett geschlossen ist und in der Brennebene der Kondensorlinse steht, sollte die Kondensorlinse das Licht aus der Iris perfekt kollimieren. Das können Sie leicht nachprüfen, indem Sie ein Stück Papier zwischen Kondensor- und Objektivlinse hin und her bewegen.



**Abbildung 12: Positionierung der Feldlinse**



**Abbildung 13: Ausleuchtungsbereich auf dem Target.**



**Abbildung 14: Die Apertur-Iris beschattet den Linsenhalter und die Kondensorlinse.**



**Abbildung 15: Positionierung der Feldlinse und Feld-Iris.**

### Schritt 19: Farbfilter

- Bauen Sie den Farbfilter ein, klappen Sie ihn vor den LED-Ausgang und passen Sie seine Höhe an die LED an.
- Platzieren Sie den Filter, wie in Abbildung 6 gezeigt, direkt vor der LED, um Streulicht zu verringern.



**Abbildung 26: Positionierung des Farbfilters**

### Schritt 10: Feld-Iris

- Platzieren Sie die ID25(/M) Feld-Iris ungefähr 11-12 cm von der Feldlinse entfernt, siehe Abbildung 1627.
- Überprüfen Sie die Höhe der Feld-Iris, indem Sie beim Öffnen und Schließen der Feld-Iris auf eine gleichmäßige Ausleuchtung des Halters der Feldlinse achten (Sie können dazu auch den LMR1AP auf dem Linsenhalter der Feldlinse nutzen).
- Schließen Sie die Feld-Iris fast vollständig.
- Beobachten Sie das Bild der Kamera und bewegen Sie die Feld-Iris vor und zurück, bis die Kanten der Iris im Kamera-Bild möglichst scharf dargestellt werden. Es wird allerdings nicht möglich sein, die Feld-Iris vollkommen scharf abzubilden. Ein leicht eckiges Bild wie in Abbildung 8 reicht aus.
- Sollte der Ausleuchtungsbereich nicht mittig auf der Kamera angezeigt werden, können Sie die Höhe und Position der Feld-Iris nachkorrigieren.



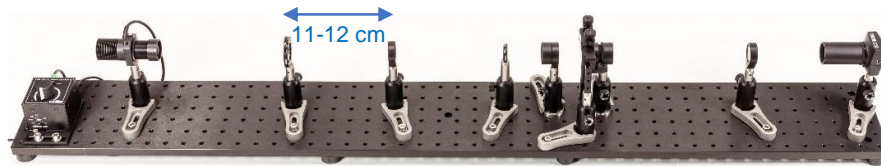


Abbildung 167: Positionierung der Feld-Iris

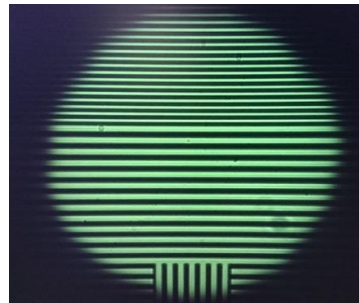


Abbildung 27 : Positionieren Sie die Feld-Iris, sodass das Kamerabild ein möglichst scharfes Bild der Iris zeigt. Es ist ausreichend einen leicht eckigen Umriss zu sehen.

**Schritt 11: Strahlteiler**

- Bewegen Sie das Target, sodass das Gitter mit  $g = 15 \mu\text{m}$  und  $b = 6 \mu\text{m}$  beleuchtet wird, Feld F2.
- Öffnen Sie die Feld-Iris zu ungefähr 3/4.
- Schließen Sie die Apertur-Iris.
- Stellen Sie den Strahlteiler zwischen Objektivlinse und Tubuslinse auf. Der Abstand des Strahlteilers zur Objektivlinse sollte 8 cm betragen, gemessen zwischen den Kanten der Gehäuse. Die korrekte Orientierung ist in Abbildung 17 gezeigt. Stellen Sie den Strahlteiler nicht zu nahe an die Objektivlinse, da sonst nicht genügend Platz zur Manipulation der Fourier-Ebene bleibt.
- Schließen Sie die Gehäuseöffnung, die zum Benutzer zeigt, mit einer SM1EC2 Plastikkappe.

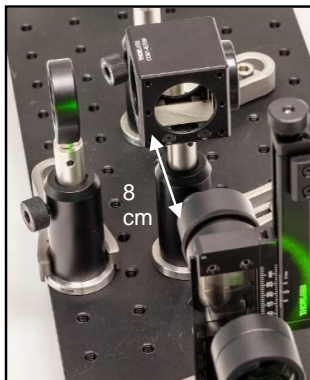


Abbildung 17: Der Halter des Strahlteilers sollte nicht beleuchtet sein.

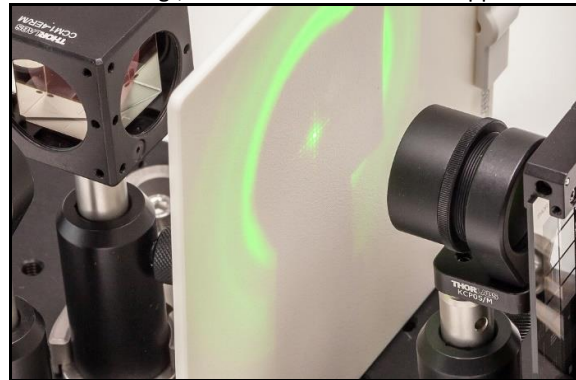


Abbildung 18: Betrachtung der Fourier-Ebene hinter der Objektivlinse mit dem Schirm.



Abbildung 19: Positionierung des Strahlteilers

### Schritt 12: Fourier-Ebene

- Stellen Sie die Intensität der LED auf das Maximum.
- Betrachten Sie die Fourier-Ebene in der hinteren Brennebene der Objektivlinse mit einem Stück Papier oder dem Schirm, vgl. Abbildung 18 (Apertur-Iris geschlossen, Feld-Iris geöffnet). Im nächsten Schritt soll die Fourier-Ebene mit Hilfe der Projektionslinse auf den Schirm abgebildet werden.

### Schritt 13: Projektionslinse und Schirm

- Stellen Sie die Projektionslinse ( $f = 75 \text{ mm}$ ) im  $90^\circ$  Winkel zur optischen Achse des Mikroskops direkt hinter den Strahlteiler und schrauben Sie sie auf das Breadboard.
- Bewegen Sie den Schirm, um die korrekte Position zu finden, an der ein scharfes Bild der Fourier-Ebene zu sehen ist.<sup>4</sup>
- Sollte es nicht möglich sein, ein scharfes Bild auf dem Schirm zu erzeugen, ist es notwendig den Abstand von Projektionslinse und Strahlteiler zu verändern.
- Allgemeine Anmerkung zur Position von Strahlteiler, Projektionslinse und Schirm: Bewegt man den Schirm weiter weg, so vergrößert sich auch das Bild der Fourier-Ebene. Allerdings muss dann gleichzeitig die Projektionslinse näher am Strahlteiler positioniert werden, damit das Bild am Schirm scharf ist. Wenn nicht mehr genügend Platz zwischen Strahlteiler und Projektionslinse ist, dann schieben Sie beide Elemente näher an die Objektivlinse heran. Bedenken Sie dabei aber, dass Sie noch Platz zur Manipulation der Fourier-Ebene brauchen.

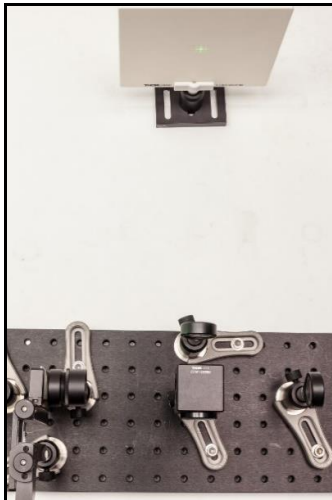
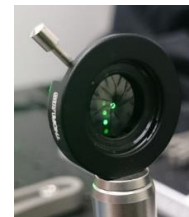


Abbildung 20: Positionierung des Strahlteilers, der Projektionslinse und des Schirms.

### Schritt 14: Korrektur der Target-Ebene

Steht das Target nicht genau rechtwinklig im Strahlengang zwischen Kondensor- und Objektivlinse, führt dies zu störenden Reflexionen am Glas und am Chrom. Diese zeigen sich als zusätzliche Punkte in der Fourier-Ebene (Doppelreflexion im Glas) und im Licht, das zur Apertur-Iris reflektiert wird.

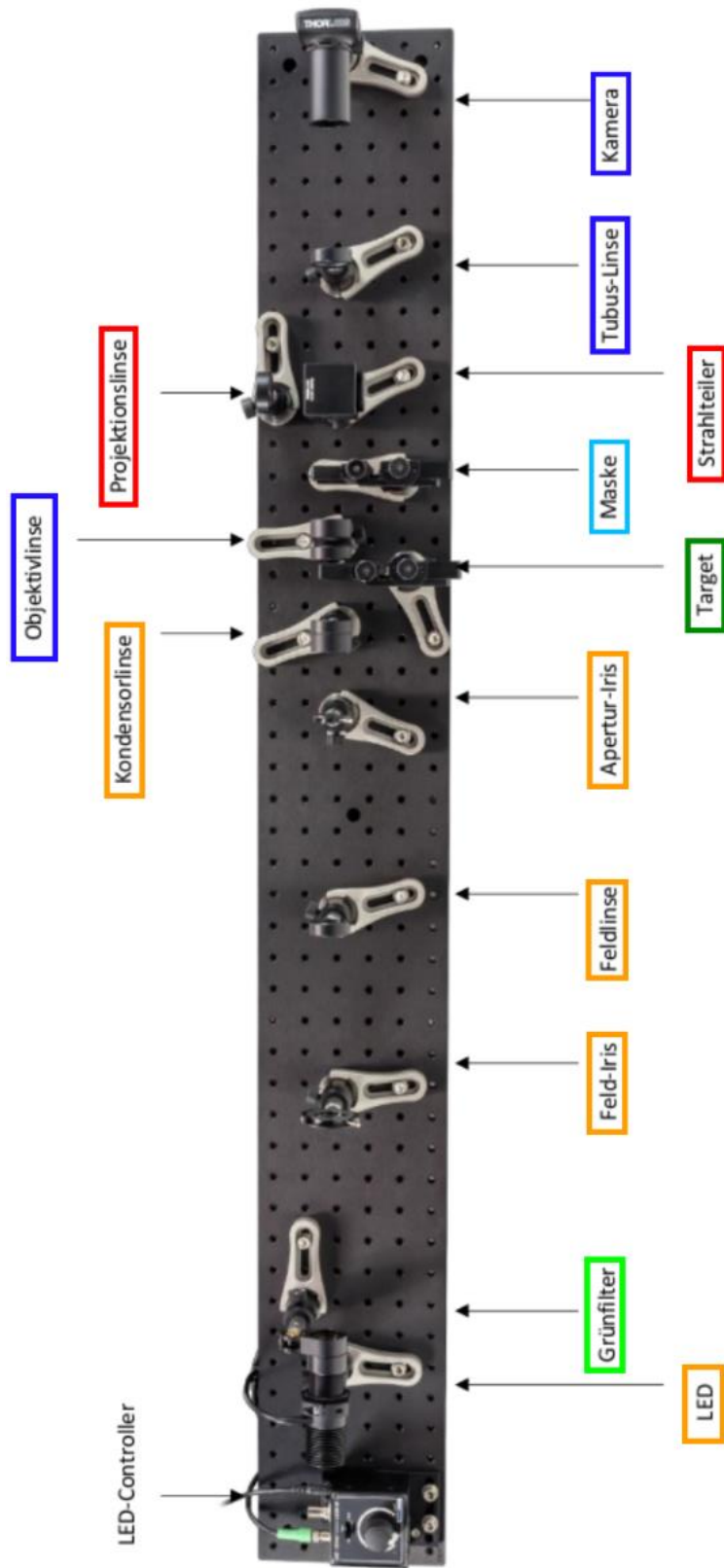
- Beobachten Sie die Seite der Apertur-Iris, die der Kondensorlinse zugewandt ist. Steht das Target nicht rechtwinklig im Strahlengang, werden Sie ein Muster auf der Iris erkennen, ähnlich zu dem im Bild rechts.
- Ist das nullte Maximum des Musters gegen die Öffnung der Apertur-Iris verschoben, sollten Sie das Target in seinem Halter drehen, bis nulltes Maximum und Öffnung zusammenfallen (bzw. auf einer vertikalen Linie sind).
- Es kann nun nötig sein, die Objektivlinse leicht nachzustellen, um wieder ein scharfes Bild auf der Kamera zu erzeugen.



Sie sollten jetzt ein scharfes Bild des Targets auf der Kamera und zusätzlich ein scharfes Bild der Fourier-Ebene auf dem Schirm sehen.

<sup>4</sup> Der Abstand, in dem ein scharfes Bild der Fourier-Ebene auf dem Schirm zu sehen ist, ist abhängig von der Brennweite  $f$  der Projektionslinse, der Gegenstandsweite  $g$  und der Bildweite  $b$ . Es gilt die Linsengleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$



Komponenten der **Köhlerbeleuchtung**

Komponenten zur **Abbildung des Target-Objekts in die Kamera**

Auf dem **Target** befinden sich die zu untersuchenden Objekte

Komponenten zur **Abbildung des Beugungsmusters in der Fourierebene auf einen Schirm** senkrecht zum Hauptstrahlengang (Schirm hier nicht im Bild)

**Die Maske (oder der Spalt)** steht in der Fourier-Ebene - hier kann das Beugungsbild manipuliert werden

Der **Grünfilter** schränkt die Bandbreite des Lichts ein

Abbildung 21: Justierter Gesamtaufbau

## Anhang 2: Zusammengefasst: Funktion der einzelnen optischen Elemente

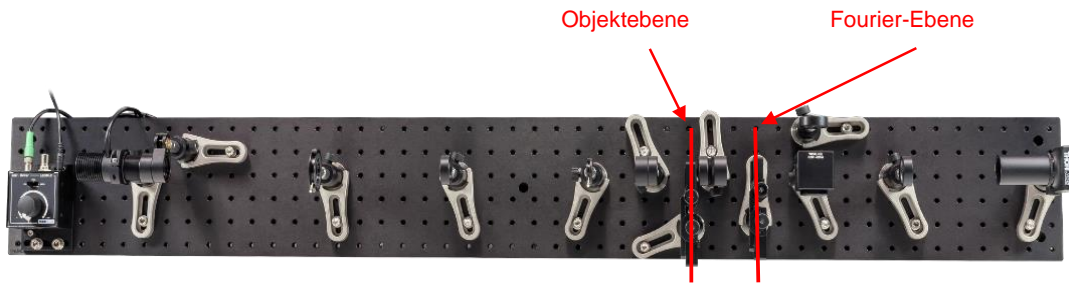


Abbildung 22: Gesamtaufbau

**Kollimationslinse:** Die Kollimationslinse ist direkt an der LED angebracht und sorgt für eine bestmögliche Parallelisierung des Lichts der LED. Dies führt zu größtmöglicher Intensität auf kleinstmöglicher Fläche.

**Lichtgebende Optik:** Die Kombination aus Feld- und Kondensorlinse, deren Brennebenen zusammenfallen, stellt prinzipiell ein Kepler-Fernrohr dar. Im idealen Fall erhält man mit den Brennweiten der Kondensor- und Feldlinse eine dreifache Vergrößerung. Da die Feldlinse zur Lichtquelle hin ausgerichtet ist und das Licht somit zuerst die Feld- und danach die Kondensorlinse passiert, hat der ausgeleuchtete Bereich hinter der Kondensorlinse nur noch ein Drittel der ursprünglichen Größe bei gleicher Gesamtintensität.

**Abbildende Optik:** Die Kombination aus Objektiv- und Tubuslinse bildet die abbildende Optik des Aufbaus. Sie bilden die Objektebene scharf in die Ebene des Kamera-Chips ab. Da das Objekt in der einen Brennebene der Objektivlinse steht, kann das Fourier-Bild des Objekts in der anderen Brennebene des Objektivs betrachtet werden. Fallen die Brennebenen der Linsen zusammen, kann eine fünffache Vergrößerung erreicht werden. In diesem Aufbau handelt es sich um ein sogenanntes unendlich-korrigiertes Mikroskop. Das bedeutet, dass das Target in der Brennebene der Objektivlinse steht und somit davon ausgegangen werden kann, dass sich hinter der Objektivlinse ein paralleles Lichtbündel ausbreitet. Daher kann die Tubuslinse in einem beliebigen Abstand von der Objektivlinse aufgestellt werden, um das Bild auf die Kamera zu bringen.

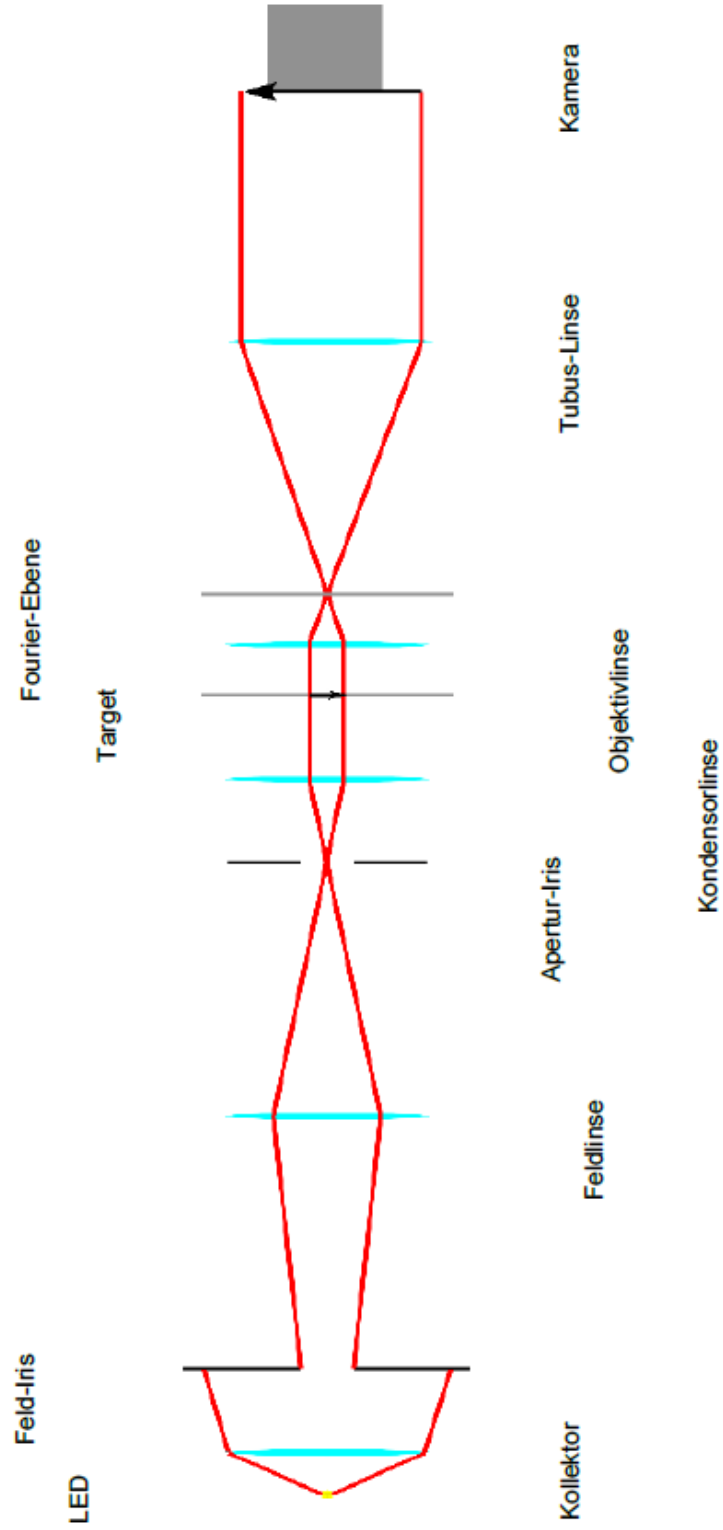
**Projektionslinse:** In der hinteren Brennebene der Objektivlinse befindet sich das Fourier-Bild. Diese Ebene (bzw. das Fourier-Bild) wird mittels der Projektionslinse über den Strahlteiler auf einen Schirm abgebildet. Die Abbildung und die Vergrößerung des Bildes folgen der Linsengleichung. Ist die Projektionslinse an einem Ort platziert, so ist das Bild am Schirm nur in einem gewissen Schirmabstand scharf. Die Vergrößerung entspricht dem Verhältnis von Bildweite zu Gegenstandsweite.

**Grünfilter:** Durch Beugung von weißem Licht an kleinen Strukturen kommt es zu einer Spektralaufspaltung des Lichts im Beugungsbild. Der Grünfilter wird benötigt, um Spektralaufspaltungen und somit die Ausdehnung der Beugungsmaxima im Fourier-Bild zu verhindern. Durch die Verkleinerung der Ausdehnung der Beugungsmaxima fällt die Filterung des Fourier-Bildes leichter. Es sei aber angemerkt, dass alle hier gezeigten Beugungseffekte auch mit weißem Licht auftreten.

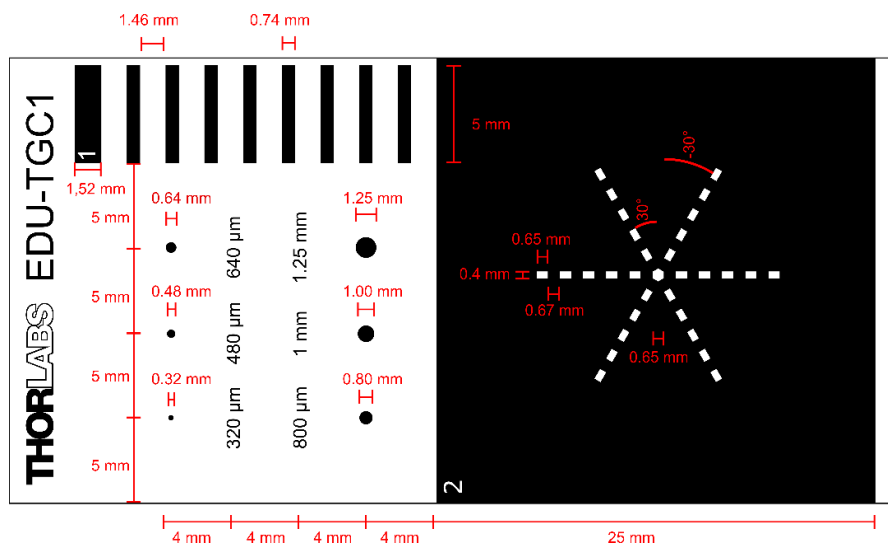
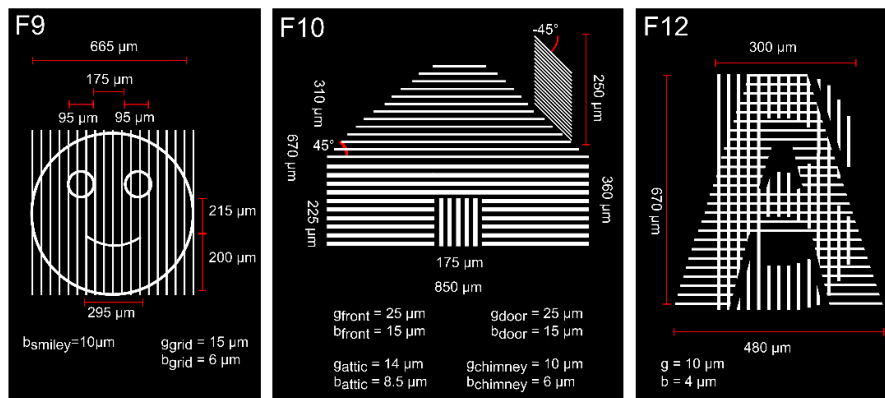
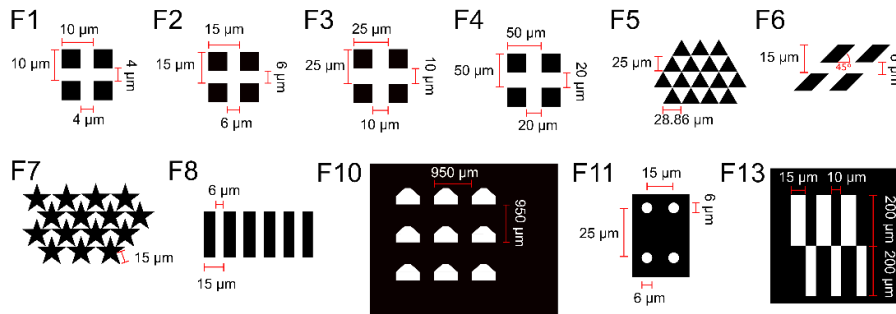
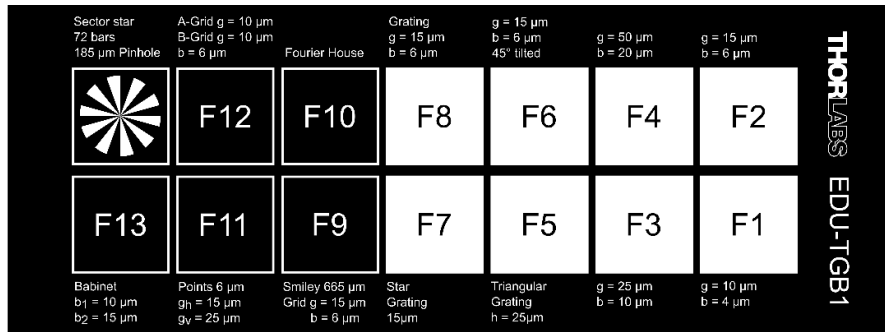
**Feld-Iris:** Öffnen und Schließen der Feld-Iris führt zur Vergrößerung bzw. Verkleinerung des ausgeleuchteten Bereichs auf dem Objekt hinter der Kondensorlinse. Dies liegt daran, dass das Kepler-Fernrohr, bestehend aus Feld- und Kondensorlinse, so platziert ist, dass es die Feld-Iris scharf in die Objektebene abbildet. Des Weiteren können Veränderungen an der Öffnung der Feld-Iris zu Helligkeitsänderungen im Fourier-Bild führen: Beleuchtet man beispielsweise ein Kreuzgitter, so führt eine Öffnung der Feld-Iris dazu, dass mehr Spalte ausgeleuchtet werden. Dies führt wiederum dazu, dass mehr Licht zur Ausbildung des Fourier-Bildes beiträgt.

**Apertur-Iris:** Mit der Apertur-Iris kann der Ausleuchtungsbereich der Kondensorlinse direkt gesteuert werden. Das bedeutet, dass ein Öffnen der Apertur-Iris zu zunehmender Intensität auf dem Objekt führt, weil mehr Licht auf das Linsenglas der Kondensorlinse fällt. Außerdem wird die Apertur-Iris durch die Kombination aus Kondensor- und Objektivlinse in die Fourier-Ebene abgebildet. Das Fourier-Bild ist also eine Überlagerung aus dem Bild der Apertur-Iris und dem Beugungsbild des Objekts. Das heißt, dass die Öffnung der Apertur-Iris mit der Ausdehnung der Intensitätsmaxima im Fourier-Bild korreliert ist.

Anhang 3a: Skizze des Lichtwegs im Mikroskop:



## Anhang 3b: Skizze des Targets und der Maske:



## Anhang 4: Aufbauanleitung in Stichpunkten

1. Stellen Sie die Höhe aller Komponenten auf 10 cm ein, gemessen vom Breadboard bis zur Mitte der optischen Komponente.
2. Stellen Sie die Kamera am rechten Ende des Breadboards entlang der vierten Lochreihe auf und positionieren Sie die Tubuslinse ( $f = 150 \text{ mm}$ ) in ca. 150 mm Entfernung von der Kamera. Erzeugen Sie mit der Tubuslinse ein scharfes Bild eines mehr als 4 Meter entfernten Gegenstandes auf dem Kamerachip.
3. Strahlen Sie mit der LED an eine Wand oder die Zimmerdecke und nutzen Sie die variablen Linsenhalter um die Kollektorlinse in die korrekte Position zu bringen. Sie sollten den LED-Chip (dunkle Punkte auf hellem Rechteck) sehen können. Positionieren Sie die LED 100 cm entfernt von der Kamera (Abstand Stiel zu Stiel).
4. Stellen Sie die Objektivlinse ( $f = 30 \text{ mm}$ ) 18 bis 20 cm entfernt von der Tubuslinse auf, gemessen von den Mitten der Linsen.
5. Stellen Sie das Target mit Hilfe der Höhenschraube am Halter auf die höchstmögliche Position ein. Stellen Sie die Höhe des Stiels so ein, dass die unterste Struktur (Siemensstern) auf Höhe der optischen Achse ist. Stellen Sie das Target 2 cm entfernt von der Objektivlinse auf und bewegen Sie es langsam auf die Objektivlinse zu, bis ein scharfes Bild des Targets auf der Kamera zu sehen ist. Feineinstellungen bezüglich der Schärfe können durch Verstellen des variablen Linsenhalters der Objektivlinse erfolgen. Wählen Sie nun das mittlere Fourier-Haus als Struktur aus.
6. Stellen Sie die Kondensorlinse ( $f = 50 \text{ mm}$ ) in 50 mm Entfernung zum Target auf. Bewegen Sie die Kondensorlinse, bis der Ausleuchtungsbereich auf dem Target minimal wird. Stellen Sie sicher, dass das mittlere der Häuser ausgeleuchtet wird. Passen Sie dafür ggf. die Linsenhöhe an.
7. Positionieren Sie die geschlossene Apertur-Iris (die kleinere, ID12(/M)) 50 mm entfernt von der Kondensorlinse. Der Linsenhalter sollte gleichmäßig beschattet sein.
8. Stellen Sie die Feldlinse ( $f = 150 \text{ mm}$ ) in einer Entfernung von 150 mm zur Apertur-Iris auf. Bewegen Sie die Feldlinse, bis Sie ein Bild des LED-Chips auf der Apertur-Iris sehen können.
9. Stellen Sie die fast vollständig geschlossene Feld-Iris 150 mm entfernt von der Feldlinse auf. Bewegen Sie die Feld-Iris vor und zurück, bis ein leicht eckiges Bild der Iris mit der Kamera zu sehen ist (schwer zu sehen, effektiv reicht eine Abweichung von der Kreisform).
10. Positionieren Sie den Farbfilter direkt vor der LED.
11. Öffnen Sie die Feld-Iris (zu 3/4) und stellen Sie den Strahlteiler ungefähr 8 cm entfernt von der Objektivlinse auf.
12. Stellen Sie die Projektionslinse ( $f = 75 \text{ mm}$ ) im  $90^\circ$  Winkel zur optischen Achse direkt hinter dem Strahlteiler auf und suchen Sie mit dem Schirm ein scharfes Bild der Fourier-Ebene.
13. Schauen Sie auf die dem Target zugewandte Seite der Apertur-Iris. Sollte das Target nicht rechtwinklig im Aufbau stehen, ist dort ein zur Irisöffnung verschobenes Interferenzmuster zu sehen. Rotieren Sie das Target, bis die nullte Ordnung des Interferenzmusters und die Irisöffnung in einer Linie stehen.