



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
INSTITUT FÜR PHYSIK

22S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM 2 LU
678 Bachelorstudium Physik, UG2002/2021W

IV. Advanced Microscopy

Michael Bitzan Fabian Michael Dixer
12014662 12005188
Gruppe 19

Betreut von
Assoz. Prof. Mag. Dr.rer.nat Georg KOLLER

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	2
2 Vorraussetzung und Grundlagen	2
2.1 Sammellinse	2
2.1.1 Brennweite mittels Lupeneffekt	2
2.1.2 Brennweite mittels Linsengleichung	2
2.1.3 Brennweite mittels Bessel-Verfahren	3
2.2 Mikroskopie [1] [3]	3
2.2.1 1-Linsen-Mikroskop nach van Leeuwenhoek	3
2.2.2 Hellfeld-Transmissionsmikroskop	3
2.2.3 Dunkelfeld-Mikroskop	4
3 Beschreibung der Versuchsanordnung	5
3.1 Aufbau Sammellinse	5
3.2 Aufbau Ein-Linsen-Mikroskop nach van Leeuwenhoek	6
3.3 Aufbau Hellfeld-Transmissionsmikroskop	7
3.4 Aufbau Dunkelfeld-Mikroskop	8
4 Geräteliste	9
5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse	10
5.1 Versuchsdurchführung Sammellinse	10
5.1.1 Versuchsdurchführung und Messergebnisse - Lupeneffekt	10
5.1.2 Versuchsdurchführung und Messergebnisse - Linsengleichung	10
5.1.3 Versuchsdurchführung und Messergebnisse - Bessel-Verfahren	10
5.2 Versuchsdurchführung van Leeuwenhoek Mikroskop	11
5.3 Versuchsdurchführung Hellfeld-Mikroskop	12
5.4 Versuchsdurchführung Dunkelfeld-Mikroskop	15
6 Auswertung	16
6.1 Auswertung - Sammellinse	16
6.1.1 Brennweite mittles Lupeneffekt	16
6.1.2 Brennweite mittels Linsengleichung	16
6.1.3 Brennweite mittels Bessel-Verfahren	16
6.2 Auswertung - Van Leeuwenhoek Mikroskop	17
6.3 Auswertung - Hellfeld-Transmissionsmikroskop	17
6.4 Auswertung - Dunkelfeld-Mikroskop	18
7 Diskussion	19
7.1 Diskussion - Sammellinsen	19
7.2 Diskussion - van Leeuwenhoek	19
7.3 Diskussion - Hell- und Dunkelfeld	19
8 Zusammenfassung	21
Literaturverzeichnis	21

1 Aufgabenstellung

1. Abbildung durch eine Sammellinse

Bestimmen der Brennweite einer Sammellinse über:

- Den Lupeneffekt.
- Die Linsengleichung.
- Das Besselverfahren.

2. Ein-Linsen-Mikroskop nach Van Leeuwenhoek:

- Erstellen des Ein-Linsen-Mikroskops mit zwei verschiedenen Kugeln (Linsen).
- Untersuchen einer Probe mit den beiden Linsen.

3. Hellfeld-Transmissionsmikroskop

- Selbstständiger Aufbau des Mikroskops.
- Bestimmen der Vergrößerung und des Auflösungsvermögens.
- Untersuchen des Einflusses von Kohärenz, sphärischer und chromatischer Aberration.

4. Dunkelfeld-Mikroskop

- Selbstständiger Aufbau des Mikroskops.
- Vergleich mit dem Hellfeld-Mikroskop.

2 Voraussetzung und Grundlagen

2.1 Sammellinse

Im Allgemeinen werden Linsen für die optische Abbildung von Objekten benötigt. Hierbei ordnen diese jedem Gegenstandspunkt einen Bildpunkt zu, wodurch die optische Abbildung entsteht. Der Zusammenhang zwischen der Brennweite f , welche eine Linseneigenschaft ist, der Gegenstandsweite g , welche den Abstand zwischen dem Gegenstand und der Hauptebene der Linse angibt, und der Bildweite b , welche den Abstand zwischen der Hauptebene der Linse und dem Bild/Abbildung angibt, ist die Abbildungsgleichung von Laplace (Herleitung in [1]):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (1)$$

Wichtig hierbei ist die Definition der Abstände welche sich auf die Hauptebene der Linse beziehen, dies ist bei Linsen deren Hauptebene nicht in der Mitte liegt (dicke Linse = zwei Hauptebenen, plankonvex = Hauptebene leicht verschoben) in der Messung oder dem Messfehler zu berücksichtigen.

2.1.1 Brennweite mittels Lupeneffekt

Die Brennweite von optischen Linsen kann über unterschiedliche Verfahren bestimmt werden. Ein erstes Verfahren hierzu ist das Nutzen des sogenannten Lupeneffekts. Dieser nutzt die scharfe Abbildung eines sehr weit entfernten Objekts $g \gg f$ oder weit entfernten Schirms $b \gg f$. Dies kann als Näherung der Linsengleichung aufgefasst werden:

$$f \approx b \text{ für } g \gg f \text{ bzw. } f \approx g \text{ für } b \gg f \quad (2)$$

2.1.2 Brennweite mittels Linsengleichung

Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus der oben beschriebenen Linsengleichung, hierzu misst man die Gegenstandsweite g und Bildweite b bei denen eine scharfe Abbildung entsteht. Anschließend kann die Brennweite nach Umformung der Linsengleichung wie folgt berechnet werden:

$$f = \frac{bg}{b+g} \quad (3)$$

2.1.3 Brennweite mittels Bessel-Verfahren

Das Bessel-Verfahren (Herleitung in [1]) ist eine weitere Möglichkeit die Brennweite zu bestimmen. Es ist insbesondere interessant, da hierbei die Position der Hauptebenen vernachlässigt werden kann. Für die Bestimmung der Brennweite wird ein Gegenstand scharf abgebildet, wird anschließend die Position des Bilds (Schirms) und des Gegenstands nicht verändert, kann mittels verschieben der Linse eine zweite Position gefunden werden bei welcher ein scharfes Bild entsteht. Allerdings gilt dies nur unter der Voraussetzung $g + b > 4f$. Um anschließend die Brennweite f berechnen zu können muss der Abstand zwischen Gegenstand und Bild ($= l$) und der Abstand der beiden Linsenpositionen ($= \omega$) gemessen werden.

$$f = \frac{l^2 - \omega^2}{4l} \quad (4)$$

2.2 Mikroskopie [1] [3]

Ein Mikroskop ist ein optisches Gerät, welches eine deutlich stärke Vergrößerung eines Gegenstandes erzielen kann als eine einfache Lupe. Ein typisches Mikroskop besteht aus zwei Linsen, die erste wird Objektiv genannt und erstellt ein reelles Zwischenbild B des Gegenstandes G , welches im Idealfall genau in der Brennebene des Okulars (zweite Linse) liegt. Somit entstehen parallele Strahlenbündel, welche im Unendlichen ein scharfes Bild des Gegenstandes darstellen und für den Beobachter sichtbar wird. Mikroskope lassen sich durch zusätzliche Elemente variieren und verbessern, somit gibt es viele verschiedene Ausführungen, wobei in diesem Experiment drei Mikroskope angewandt werden. Ein Beispiel für einen schematischen Aufbau eines Mikroskops ist in Abbildung 1 dargestellt.

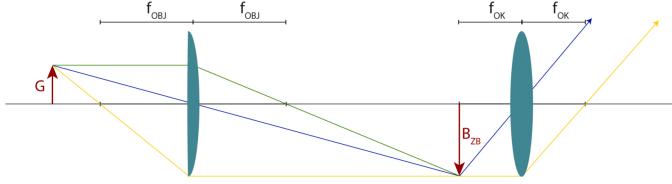


Abbildung 1: Skizze des Strahlenganges bei einem Mikroskop. G ... Gegenstand, B_{ZB} ... Zwischenbild, f_{OBJ} ... Brennweite des Objektivs, f_{OK} ... Brennweite des Okulars. [3]

2.2.1 1-Linsen-Mikroskop nach van Leeuwenhoek

Wie der Name verrät ist das Mikroskop nach van Leeuwenhoek eine besondere Ausführung, da es nur eine Linse besitzt. Diese wird in Form einer kleinen Glaskugel realisiert und ist somit einer Lupe sehr ähnlich. Mit dieser Konstruktion ist eine Vergrößerung bis 270 möglich, wobei die Lupenvergrößerung M indirekt proportional zur effektiven Fokuslänge f_{eff} ist:

$$M = \frac{250 \text{ mm}}{f_{eff}} \quad (5)$$

Die 250 mm ist die kleinste Entfernung von der Linse zum Auge, bei der das Auge noch scharf abbilden kann. Die effektive Fokuslänge f_{eff} hängt vom Durchmesser d und der Brechzahl der Linse n ab:

$$f_{eff} = \frac{nd}{4(n-1)} \quad (6)$$

2.2.2 Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Eine weitere und eine der bekanntesten Ausführungen des Mikroskops ist das Hellfeld-Transmissionsmikroskop. Hierbei wird das Mikroskop von hinten mit einer Halogenlampe beleuchtet, so dass immer ein helles Bild entsteht. Das zu untersuchende Objekt befindet sich im Strahlengang und transmittiert nur den Teil der Beleuchtung, welcher nicht von der Probe abgedeckt wird. Somit erscheint das Testobjekt nach zwei weiteren

Linsen zur Vergrößerung dunkel auf der Kamera. Das Zwischenbild liegt auch hier wieder im Brennpunkt des Okulars, um ein scharfes Bild im Unendlichen zu erstellen. Der Abstand vom hinteren Brennpunkt des Objektivs f_{OBJ} bis zum vorderen Brennpunkt des Okulars f_{OK} wird optische Tubuslänge t_o genannt. Mit ihr lässt sich der Objektiv-Abbildungsmaßstab A_{OBJ} berechnen:

$$A_{\text{OBJ}} = -\frac{t_o}{f_{\text{OBJ}}} \quad (7)$$

Zusammen mit der Okularvergrößerung V_{OK} (beziehungsweise der Lupenvergrößerung M):

$$M = V_{\text{OK}} = \frac{250 \text{ mm}}{f_{\text{OK}}} \quad (8)$$

lässt sich die Normalvergrößerung V_{MIK} des Mikroskopes bestimmen:

$$V_{\text{MIK}} = A_{\text{OBJ}} V_{\text{OK}} \quad (9)$$

Eine weitere wichtige Größe bei Mikroskopen ist das Auflösungsvermögen x_{\min} . Es gibt die kleinste Größe an, bei der zwei Objekte noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können, dies wird durch die Abb'sche Abbildungstheorie beschrieben. In diesem Experiment lässt sich dies über die Balken und Gruppen Nummer des *1951 – USAF Resolution Test Chart – (USAF – Chart)* berechnen. Hierbei kann die räumliche Frequenz f_r aus der Probe bestimmt werden:

$$f_r = 2^{G \text{ruppe} + \frac{E \text{lement} - 1}{6}} \quad (10)$$

Der Kehrwert der räumlichen Frequenz f_r ist das Auflösungsvermögen x_{\min} :

$$x_{\min} = \frac{1}{f_r} \quad (11)$$

2.2.3 Dunkelfeld-Mikroskop

Zuletzt wird noch das Dunkelfeld-Mikroskop betrachtet. Der Unterschied zum Hellfeld-Mikroskop ist hierbei, dass das Licht aus der Quelle nicht direkt an der Kamera ankommt sondern vorbeischeint. Somit ist das Bild ohne Objekt im Strahlengang dunkel. Das Testobjekt im Strahlengang streut das Licht, so dass die Probe hell an der Kamera erscheint. Dies ist genau der invertierte Effekt wie beim Hellfeld-Mikroskop. Vorteilhaft ist hierbei, dass transparente und dünne Objekte viel höheren Kontrast aufweisen als beim Hellfeld. Ein Vergleich der beiden Varianten ist grafisch in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Links: Hellfeld. Das Licht scheint direkt auf die Kamera, transmittiert wird nur das Licht was nicht von der Probe absorbiert oder gestreut wird (dunkles Objekt am Schirm). Rechts: Dunkelfeld: Das transmittierte Licht geht an der Kamera vorbei, angezeigt wird nur das gestreute Licht der Probe (helles Objekt am Schirm). Die Lichtstrahlen sind rot dargestellt. [3]

Auch das Dunkelfeld-Mikroskop kann im Auflicht Modus konstruiert werden. Hier wird das Licht von der selben Seite eingespeist, von der auch beobachtet wird. Vorteil ist hierbei ein effizienterer Aufbau des Gerätes. Eine Skizze der Auflicht Variante des Dunkelfeld-Mikroskops ist in Abbildung 3 dargestellt.

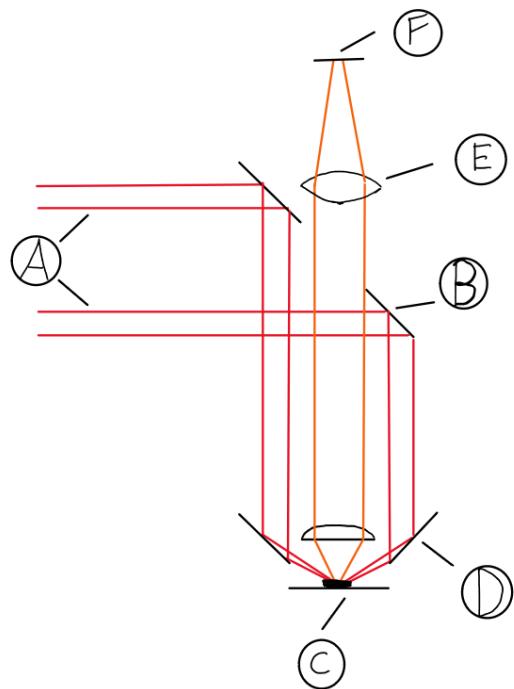


Abbildung 3: Skizze der Auflicht Variante des Dunkelfeld-Mikroskops. A ... Lichtquelle, B ... Ring-Spiegel, C ... Objekt, D ... Spiegel, E ... Linse, F ... Kamera oder Schirm.

3 Beschreibung der Versuchsanordnung

Im folgenden Kapitel werden nacheinander die Versuchsanordnungen der vier Experimente beschrieben. Zu beachten ist bei allen Aufbauten, dass die Komponenten alle gerade und in derselben Höhe platziert werden, um ein korrektes Ergebnis zu erhalten. Beim Einsetzen der Probe muss besonders darauf geachtet werden, dass diese nicht zerbricht. Auch bei der Halogen-Lampe muss man aufpassen, dass man sich beim Bewegen dieser nicht verbrennt.

3.1 Aufbau Sammellinse

Im ersten Teil des Experimentes wird von einer plankonvexen Linse die unbekannte Brennweite über drei unterschiedliche Methoden bestimmt. Hierbei kann für die Bestimmung mittels Lupeneffekts, Linsengleichung und Bessel-Verfahren jeweils der gleiche Aufbau verwendet werden. Der Aufbau besteht aus einer Lichtquelle L (Halogen-Lampe (rechter Rand)) gefolgt von einem Diffusor D, der Probe P, der unbekannten Linse LI und einer Kamera K als Schirm. Für die unterschiedlichen Methoden wird die Position des Gegenstands, der Linse und des Schirms variiert. Der Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Von rechts nach links: L ... Halogen-Lampe, D ... Diffusor, P ... Probe, LI ... Linse, K ... Kamera

3.2 Aufbau Ein-Linsen-Mikroskop nach van Leeuwenhoek

Im zweiten Teil des Experimentes wird eine moderne Variante des van Leeuwenhoek Mikroskops gebaut. Dieses Mikroskop wird aus einigen Bauteilen zusammengesetzt, daher werden diese kompakt in der unten angeführten Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Bauteile van Leeuwenhoek Mikroskop

Bauteil	Beschreibung
Linsenhalterung	3D-Druck
Objekthalter	3D-Druck
LED	weiß
Batterie	Knopfzelle
Büroklammer	-
Feststellschraube	-
Schraubenmutter	-
Glaskugellinse	$d = 6,35 \text{ mm} \pm 1\%$
Glaskugellinse	$d = 2,50 \text{ mm} \pm 1\%$

Zuerst wird der Linsenhalter mittels Feststellschraube und Schraubenmutter am Objekthalter angebracht. Anschließend werden die beiden Glaskugellinsen in den Linsenhalter eingesetzt und festgedrückt, hier ist Vorsicht geboten, da vor allem die kleinere Linse leicht verloren gehen kann. An der Unterseite des Objekthalters befindet sich ein Batteriefach in welches die Knopfzelle geschoben und anschließend die LED dazugeklemmt wird. Hier ist auf die richtige Polung zu achten. Die LED wird als Beleuchtung für das Objekt verwendet. Die Büroklammer dient als Fixierung für die Objekte am Objekthalter. Der vollständige Aufbau ist in Abbildung 5 zu sehen.



Abbildung 5: Aufbau des 1-Linsen Mikroskops nach Van Leeuwenhoek.

3.3 Aufbau Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Im dritten Teil des Experimentes wird das 2-Linsen Hellfeld-Mikroskop konstruiert. Hierfür werden die bereitgestellten Komponenten verwendet und auf der Bank aufgebaut. Als erstes wird am rechten Rand die Lichtquelle L aufgebaut, welche hier als Halogen-Lampe mit Infrarot-Filter realisiert ist. Im späteren Versuch wird diese auch durch eine rote beziehungsweise blaue LED ausgetauscht. Dicht danach wird ein Diffusor D platziert, welcher das Licht der Quelle streut. Die Probe P wird anschließend mit einem Probehalter in den Strahlengang gesetzt, direkt dahinter befindet sich das Objektiv OBJ. Da es sich beim Objektiv um eine plankonvexe Linse handelt, muss diese so eingebaut werden, dass die Flache Seite zur Probe weist. Danach wird das Okular OK platziert, gefolgt von der Kamera K inklusive zusätzlicher Linse (siehe Abbildung 6).

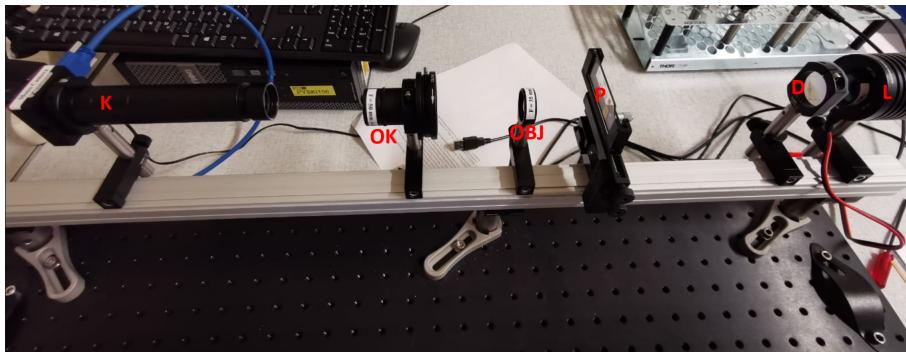


Abbildung 6: Von rechts nach links: L ... Lampe, D ... Diffusor, P ... Probe, OBJ ... Objektiv ($f = 35 \text{ mm}$), OK ... Okular ($f = 50 \text{ mm}$), K ... Kamera mit Linse ($f = 150 \text{ mm}$).

Wie bereits in Kapitel Mikroskopie [1] [3] erklärt, sollten die Linsen an bestimmten Positionen platziert werden. Um mit dem Objektiv eine Vergrößerung zu erhalten, muss die Beziehung $2f > g > f$ zwischen Gegenstand und Brennweite erfüllt sein. Das Okular muss anschließend so platziert werden, dass der Brennpunkt genau mit dem Zwischenbild in einem Punkt zusammenfällt. Die Kamera wird danach so platziert, dass das Bild scharf erscheint.

3.4 Aufbau Dunkelfeld-Mikroskop

Als letztes wird die stark vereinfachte Version des Dunkelfeld-Mikroskops aufgebaut. Die Lichtquelle L kann für diesen Aufbau weiterverwendet werden, der Diffusor wird nicht mehr benötigt. Die Probe P wird nun circa 20 cm von der Lampe auf der Bank platziert, dazwischen wird nun ein Nikon Objektiv NO zur Beleuchtung der Probe befestigt. Dieses hat einen Arbeitsabstand von 6,2 mm und muss somit bis knapp vor die Probe geschoben werden. Direkt vor das Nikon Objektiv wird zusätzlich eine Dunkelfeld-Blende DB gesetzt. Bei diesem Aufbau des Dunkelfeld-Mikroskops wird nur eine achromatische Linse LI mit Blende benötigt, welche hinter der Probe platziert wird. Abschließend befindet sich die Kamera K ohne Zusatzelemente auf der Bank, welche so weit verschoben wird, bis das Bild scharf erscheint (siehe Abbildung 7).

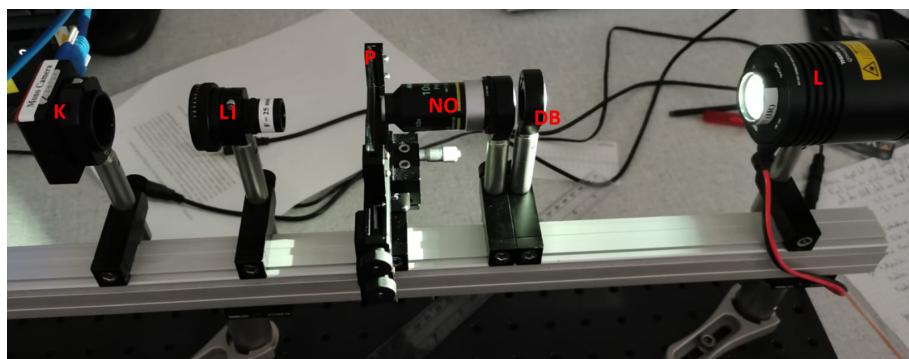


Abbildung 7: Von rechts nach links: L ... Lampe, DB ... Dunkelfeldblende, NO ... Nikon Objektiv, P ... Probe, L ... achromatische Linse ($f = 25$ mm), K ... Kamera.

Bei diesem Aufbau muss besonders darauf geachtet werden, dass die Komponenten alle gerade zueinander stehen, da jede kleinste Veränderung das Bild verschwinden lässt.

4 Geräteliste

Die Geräte, welche im gesamten Experiment verwendet werden, sind in Tabelle 2 aufgelistet. Um die Kamera zu Bedienen wurde der zur Verfügung gestellte Computer im Labor mit dem Programm *ThorCam* verwendet. Für die Brennweiten der Linsen f wird eine Unsicherheit von $\pm 1\%$ angenommen.

Tabelle 2: Verwendete Geräte. f ... Brennweite der Linse.

Gerät	Hersteller	Typ	Seriennummer	Wert
Hg-Lampe	Thorlabs	QTH10/M	FGB37 (IR)	-
Plan-Konvexlinse	Thorlabs	LMR1/M	-	-
Diffusor	Thorlabs	SM1RC/M	-	-
Halterungen	Thorlabs	XT34TR1/M	-	-
Objektiv und Blende	Thorlabs	SM1RC1/M	SM2D25	$f = 50 \text{ mm} \pm 1\%$
Blaue LED	Thorlabs	SMR05/M	-	-
Rote LED	Thorlabs	SMR05/M	-	-
Okular Tube	Thorlabs	SM1L05	-	-
Okular Linse	Thorlabs	SM1V10	-	$f = 150 \text{ mm} \pm 1\%$
Konvex Linse	Thorlabs	LMR1/M	-	$f = 35 \text{ mm} \pm 1\%$
Lineal	Westcott	JQ0D	No. 36	0-12 cm
Optik Bank	Thorlabs	XT34HD/M	-	-
Kamera	Zerlux	C5165MU/M	13527	-
Dunkelfeld-Blende	Thorlabs	-	-	-
Nikon Objektiv	Nikon	10x/0.25	-	6,2 mm
Probe	Thorlabs	R1L3S11P	-	-
Objektiv Blende	Nikon	D-C Ph1	-	$f = 25 \text{ mm} \pm 1\%$
Leeuwenhoek Mikroscop	Selbsterstellt	-	-	-

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Für alle Experimente wird zur besseren Visualisierung das Licht im Raum ausgeschaltet. Die erforderlichen Aufgaben werden nacheinander abgearbeitet.

5.1 Versuchsdurchführung Sammellinse

Als erstes wird der Versuchsaufbau wie in 3.1 Aufbau Sammellinse aufgebaut und die Kamera mit dem PC verbunden. Um in weiterer Folge bei den Experimenten die Kamera richtig nutzen zu können müssen nach dem Start Einstellung gesetzt werden. Hierzu wird am PC die Kamerasoftware *ThorCam* gestartet. Anschließend nach erfolgreichem Start der Software die erkannte Kamera ausgewählt. Über die Kameraeinstellungen kann die Funktion Auto-Exposure aktiviert werden, welche ebenso wie die über die Anzeigeeinstellungen zu aktivierende Funktion Continuous Auto-Scale, eingeschalten wird.

5.1.1 Versuchsdurchführung und Messergebnisse - Lupeneffekt

Um die Abschätzung laut Lupeneffekt durchführen zu können, wird die im Aufbau befindliche Linse sehr nahe dem Objekt und die Kamera am linken Rand des Versuchsaufbaus platziert, sprich sehr weit von Linse/Gegenstand entfernt. Anschließend wird die Position der Linse noch soviel angepasst bis das Bild auf der Kamera scharf erscheint. Der Abstand zwischen dem Gegenstand und der Linse heißt Gegenstandsweite g und wird gemessen. Diese Länge wird mit einem Lineal abgemessen, da die Linse und der Gegenstand in Halterungen sind und eine Ableseunsicherheit von $\Delta g = 2$ mm angenommen. Zusätzlich werden zu dieser Unsicherheit weitere $\Delta = 2$ mm angenommen, da das Scharfstellen auf einer Abschätzung mit dem freien Auge beruht und die Kamera entsprechend weit entfernt ist. Die Messung für die Gegenstandsweite g ergibt:

$$g = (22 \pm 4) \text{ mm}$$

5.1.2 Versuchsdurchführung und Messergebnisse - Linsengleichung

Als zweitens wird die Messung für die Linsengleichung durchgeführt. Die Position der Kamera wird verändert um die Bildweite besser messen zu können, deshalb wird diese näher zur Linse gebracht. Nun wird für zwei unterschiedliche Gegenstandsweiten g die jeweils zugehörige Bildweite b gemessen. Im Unterschied zur Messung mittels Lupeneffekt wird hierbei über die Positionierung der Kamera scharf gestellt. Die Messungen erfolgen wieder mittels Lineal daher wird die Unsicherheit von $\Delta = 2$ mm beibehalten und zusätzlich um $\Delta = 1$ mm erhöht, da die Verschiebung der Hauptebene berücksichtigt werden muss. Die Ergebnisse der beiden Gegenstands- bzw. Bildweiten sind in Tabelle 3 eingetragen.

Tabelle 3: Messergebnisse Linsengleichung.

Bildweite b inklusive Unsicherheit $\Delta b = 3$ mm

Gegenstandsweite g inklusive Unsicherheit $\Delta g = 3$ mm

#	g / mm	b / mm
1	25	85
2	50	32

5.1.3 Versuchsdurchführung und Messergebnisse - Bessel-Verfahren

Im dritten Teil zur Bestimmung der Brennweite einer plankonvexen Linse mittels Bessel-Verfahren wurde die Kamera in einem Abstand $l = (110 \pm 2)$ mm zum Gegenstandstand platziert, da dies unter Einbeziehung der Schätzung vom Lupeneffekt der Voraussetzung $b + g > 4f$ genügt. Die angegebene Unsicherheit folgt wiederum aus der Tatsache dass der Abstand mit dem Lineal gemessen/eingestellt wird. Anschließend wird die Position der Linse verändert und so das Bild scharf gestellt. Hierbei gibt es zwei Linsenpositionen (pos_1 und pos_2), eine gegenstandsnahe und eine Schirmnahe (Kameranahe), bei denen eine scharfe Abbildung erfolgt. Diese Positionen werden notiert um in weiterer Folge den Abstand zwischen diesen beiden Positionen

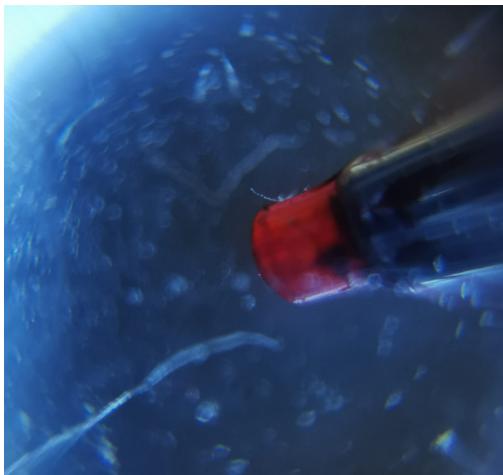
berechnen zu können. Die dabei angegebene Unsicherheit folgt wieder aus der Tatsache das mit dem Lineal gemessen wird.

$$pos_1 = (25 \pm 2) \text{ mm}$$

$$pos_2 = (84 \pm 2) \text{ mm}$$

5.2 Versuchsdurchführung van Leeuwenhoek Mikroskop

Das Mikroskop wird wie in Kapitel 3.2 beschrieben aufgebaut. Anschließend können unterschiedliche Objekte hiermit untersucht und die Beobachtungen festgehalten werden. Hierzu wird die LED entsprechend einge-klemmt, sodass diese zu leuchten beginnt und anschließend die zu untersuchenden Objekte auf dem Objekthalter platziert. Zwei Dias und Alltagsgegenstände (Fineliner, Papier, ...) können somit untersucht werden. Dies geschieht in der Regel mit dem freien Auge, jedoch kann die Kamera eines Smartphones genutzt werden um die Ergebnisse festhalten zu können, dies ist jedoch nur für die größere Glaskugellinse möglich. Die Kleinere lässt sich mit der Kamera nur schwer/gar nicht auflösen. In Abbildung 8 sind vergrößerte Objekte mit der großen Linsen dargestellt.



(a) Vergrößerte Fineliner-Spitze.



(b) Vergrößertes Salzkorn.



(c) Vergrößerte Blumenerde.

Abbildung 8: Vergrößerte Darstellung von Objekten mit dem Leeuwenhoek Mikroskop.

5.3 Versuchsdurchführung Hellfeld-Mikroskop

Als nächstes wird der Versuch mit dem Hellfeld-Transmissionsmikroskop, wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, aufgebaut. Für das Objektiv ($f_{OBJ} = (35,0 \pm 0,4)$ mm) wird ein Abstand von $g_{OBJ} = (50,0 \pm 1,0)$ mm gewählt. Die Unsicherheit des Gegenstandes ergibt sich aus der Kombination von Messgerät- und Ableseunsicherheit, bei den Linsen wird eine Unsicherheit von $\pm 1\%$ angenommen. Mithilfe der Glg. (1) kann der Abstand für das Zwischenbild b berechnet werden. Die Unsicherheit ergibt sich aus der Größtfehlermethode.

$$b = (116 \pm 10) \text{ mm}$$

$$\Delta b = \left| \Delta f \frac{g^2}{(f-g)^2} \right| + \left| \Delta g \frac{-f^2}{(g-f)^2} \right|$$

Addiert man auf die Bildweite b die Brennweite des Okulars f_{OK} erhält man die Position der zweiten Linse:

$$a_{OK} = b + f_{OK} = (166 \pm 11) \text{ mm}$$

Die Unsicherheit von b wird mit der Unsicherheit der Brennweite der Linse von 1% ($\Delta f_{OK} = 0,5$ mm) addiert. Nachdem die Linsen richtig platziert sind, wird die Kamera so eingestellt, dass ein scharfes Bild des Objektes erscheint. Auch mit der Mikrometerschraube am Probenhalter kann der Aufbau genau eingestellt werden.

Anschließend wird auf der Kamera die Probe mittels Hellfeld-Technik angezeigt (siehe Abbildung 9).

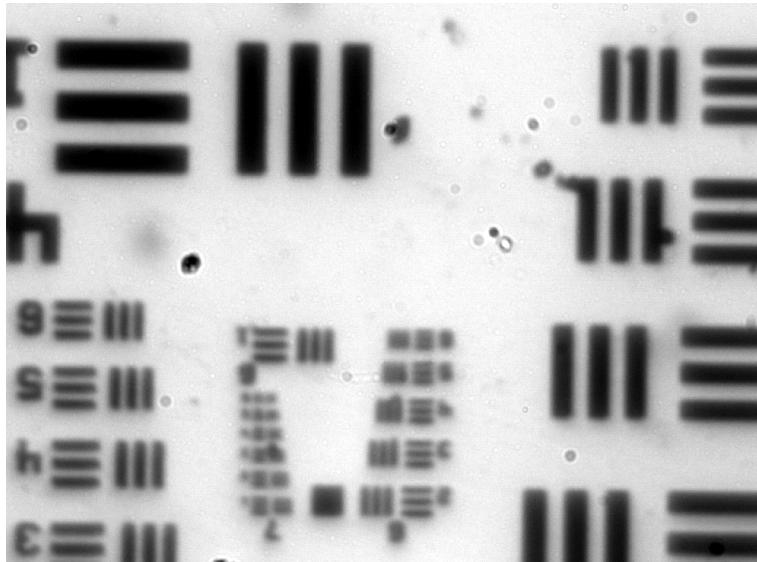


Abbildung 9: Aufnahme der Probe mit dem Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Hier kann sofort erkannt werden, dass eine Vergrößerung im Vergleich zur normalen Linse stattfindet. Diese Vergrößerung V_{MIK} wird zuerst theoretisch und anschließend experimentell bestimmt. Für die theoretische Berechnung muss die optische Tubuslänge t_o aus dem Aufbau bestimmt werden. Dies entspricht dem Abstand vom hinteren Brennpunkt des Objektivs und dem vorderen Brennpunkt des Okulars. Somit ergibt sich:

$$t_o = b - f_{OBJ} - g = (31 \pm 11) \text{ mm}$$

Die Unsicherheiten werden in diesem Fall wieder addiert.

Für die experimentelle Bestimmung der Vergrößerung muss zuerst ein Referenzbild der Probe aufgenommen werden. Hierfür wird der Aufbau aus Kapitel 3.1 übernommen, wobei die Linsen so platziert werden, dass der Abbildungsmaßstab $A = 1$ ist. Um dies zu erreichen wird die Bildweite b gleich der Gegenstandsweite g gesetzt.

$$b = g = 2f$$

Mit der Kamera wird nun ein Objekt ausgewählt, bei dem die Größe gut messbar durch das Lineal-Tool in *ThorLabs* ist. Anschließend wird das selbe Objekt mit dem Hellfeld-Mikroskop betrachtet und die Größe ebenfalls gemessen. Die aufgenommenen Bilder sind in Abbildung 10 dargestellt.

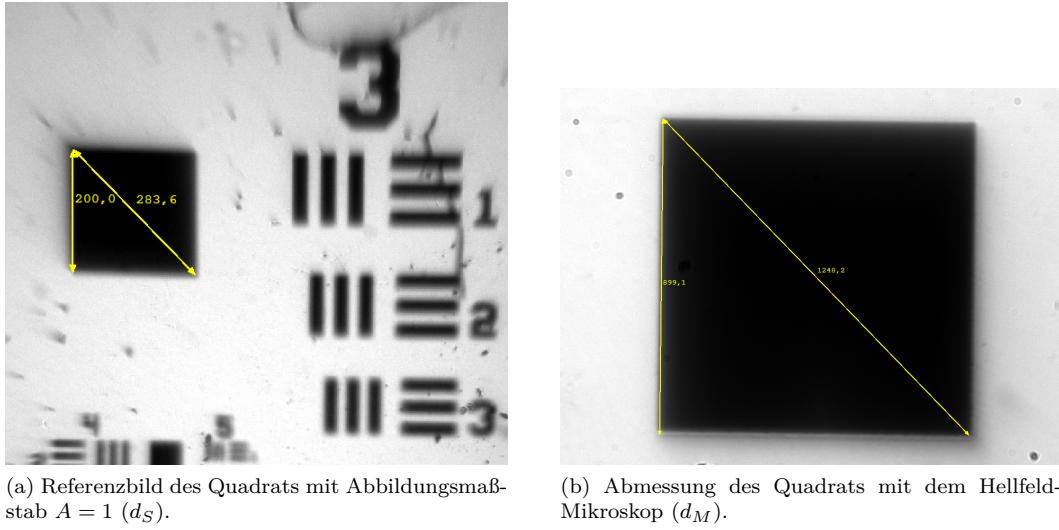


Abbildung 10: Experimentelle Bestimmung der Vergrößerung beim Hellfeld-Mikroskop.

Für die Diagonalen d ergeben sich folgende Werte, wobei hier eine Ableseunsicherheit von ± 5 angenommen wird. Die Abmessungen besitzen keine physikalische Einheit, da es für die Berechnung des Verhältnisses irrelevant ist.

$$d_S = 284 \pm 5 \quad d_M = 1248 \pm 5$$

Außerdem muss das Auflösungsvermögen x_{min} des Mikroskops berechnet werden. Dies geschieht über die räumliche Frequenz f_r , welche über die Balken und Gruppen des *USAFResolutionTestCharts* bestimmt werden kann. Mit der Kamera wird das kleinstmögliche Element der Probe aufgenommen, hier eignet sich besonders der mittlere Teil, da hier die Balken und Gruppen sehr klein sind. Daraufhin wird die Gruppe bestimmt, bei der die Balken gerade noch getrennt voneinander wahrnehmbar sind (siehe rote Markierung in Abbildung 11). Die Gruppe und Nummer wird anschließend notiert.

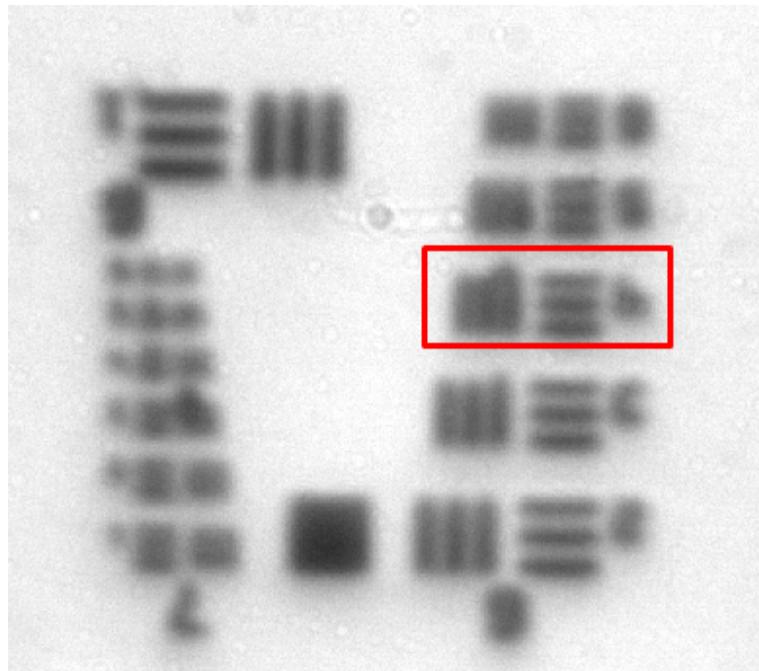


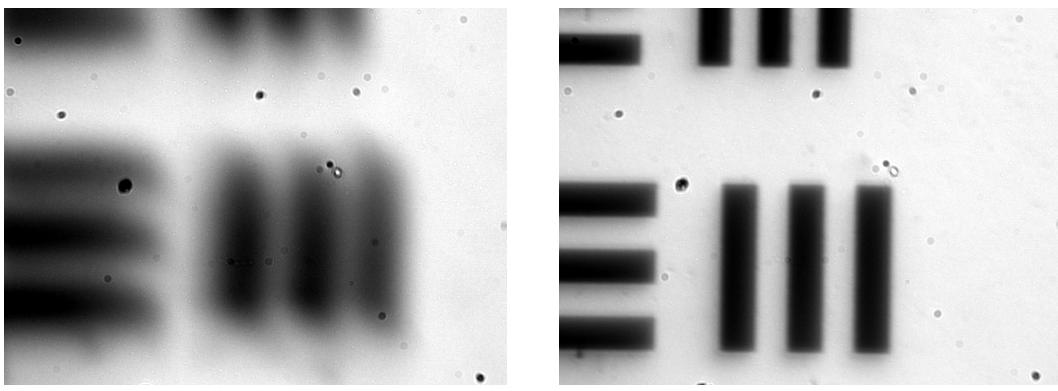
Abbildung 11: Auflösungsvermögen mit dem Hellfeld-Transmissionsmikroskop.

Die Messung ergibt:

$$\text{Gruppe } G = 6 \quad \text{Nummer } N = 4,0 \pm 0,5$$

Als Unsicherheit wird eine halbe Nummer festgelegt, da es nicht ganz klar ist, welche Balken als letztes getrennt voneinander wahrgenommen werden können.

Weiters soll der Einfluss von optischen Fehler auf das Ergebnisbild untersucht werden. Als erstes wird die sphärische Aberration experimentell dargestellt. Hierfür muss lediglich die plankonvexe Linse umgedreht werden, so dass die flache Seite von der Probe abgewandt ist. Durch diesen Schritt verschiebt sich die Hauptebene der Linse, wodurch das Bild unscharf wird. Mit der Bügelmessschraube wird die Poisiton der Probe solange adaptiert, bis das Bild auf der Kamera wieder scharf erscheint. Es ergibt sich hier ein Unterschied von $\Delta g = 0,5$ mm. Ein Vergleich vor und nach anpassen ist in Abbildung 12 dargestellt.

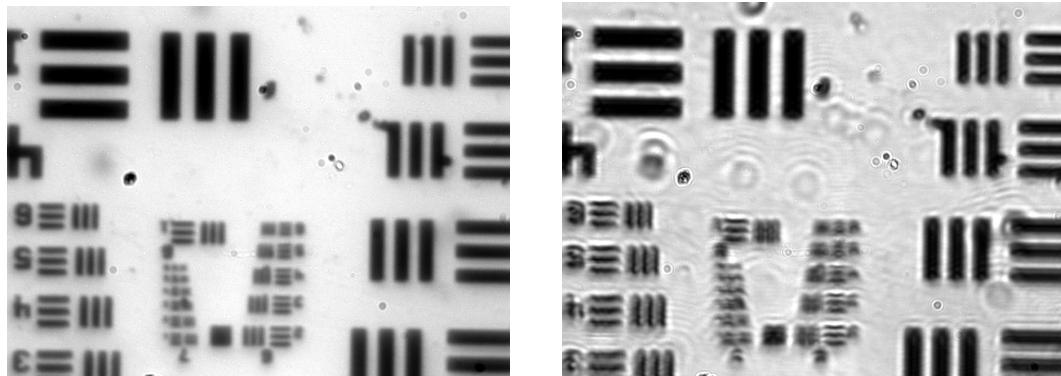


(a) Bild, nachdem die Linse umgedreht wird.
(b) Bild, nachdem die Gegenstandsweite g angepasst wird.

Abbildung 12: Visualisierung der sphärische Aberration bei dem Hellfeld-Mikroskop.

Als nächstes wird die Kohärenz der Lichtquelle untersucht, hierfür wird der Diffusor aus dem Strahlengang

entfernt. Es wird wieder davor und danach ein Bild aufgenommen, die Gegenüberstellung ist in Abbildung 13 dargestellt.



(a) Lichtquelle mit Diffusor.

(b) Lichtquelle ohne Diffusor.

Abbildung 13: Visualisierung der Kohärenz der Lichtquelle.

Zuletzt wird noch die chromatische Aberration untersucht. Die Halogen-Lampe wird zuerst durch eine blaue und danach durch eine rote LED ersetzt. Das entstandene Bild ist wieder unscharf und muss mit der Mikrometerschraube angepasst werden. Hierfür ergeben sich folgende Werte:

$$\Delta g_{blau} = -1,54 \text{ mm} \quad \Delta g_{rot} = 1,01 \text{ mm}$$

Das korrigierte Bild der blauen LED ist in Abbildung 14 dargestellt. Die rote LED zeigt ein äquivalentes Ergebnis.

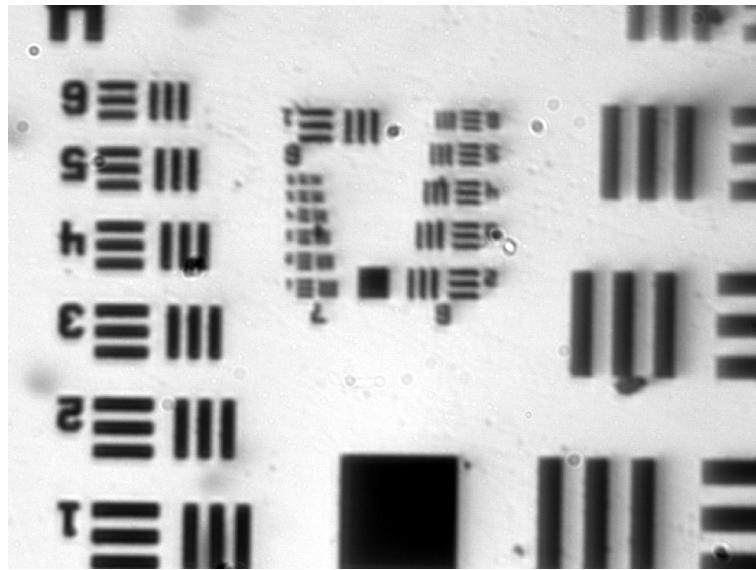


Abbildung 14: Anpassung des Bildes bei chromatischer Aberration.

5.4 Versuchsdurchführung Dunkelfeld-Mikroskop

Als letztes wird das Dunkelfeld-Mikroskop nach Aufbau in Abbildung 7 realisiert. Das Mikroskop ist sehr empfindlich, dies bedeutet, dass bei jeder kleinen Abweichung des Aufbaus kein Bild mehr entsteht. Somit muss genau darauf geachtet werden, dass die Komponenten alle gerade auf der Bank stehen und auf der gleichen Höhe sind. Auch von außen sollte nicht viel Licht auf den Messaufbau gelangen, da die Kamera eine

sehr lange Belichtungszeit hat. Auch der Aufbau durch Messschrauben ist sehr fragil. Nach erfolgreichen Aufbau werden verschiedene Elemente der Probe untersucht, diese sind in Abbildung 15 dargestellt. Auf den Bildern sind die Testobjekte der Probe teilweise nur schlecht zu erkennen, da die Verhältnisse im Labor (Bewegungen, Licht von außen) die Messung beeinflussen.

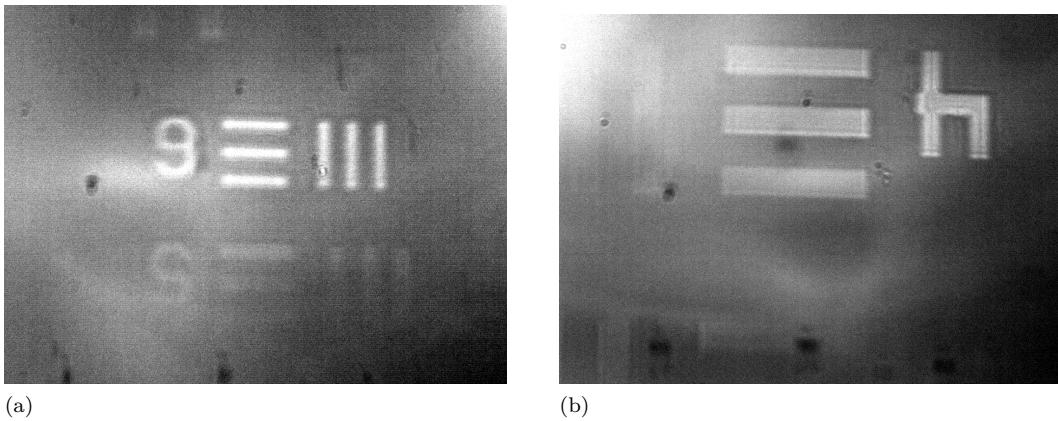


Abbildung 15: Aufnahmen der Probe mit dem Dunkelfeld-Mikroskop.

6 Auswertung

In diesem Abschnitt werden nacheinander alle Messergebnisse aus Kapitel 5 ausgewertet. Die Werte werden immer ungerundet bis zu dem Endergebnis verwendet, um möglichst viel Genauigkeit beizubehalten. Sie werden nur zur besseren Darstellung gerundet und inklusive Unsicherheit, welche mit der Größtfehlermethode berechnet wird, angegeben.

6.1 Auswertung - Sammellinse

6.1.1 Brennweite mittels Lupeneffekt

Der Zusammenhang in Glg.(2) zeigt, dass die Brennweite f_{Lupe} aus Näherung der gemessenen Gegenstandsweite g resultiert und ergibt somit inklusive der selben Unsicherheit:

$$f_{Lupe} = (22 \pm 4) \text{ mm}$$

6.1.2 Brennweite mittels Linsengleichung

Um die Brennweite mittels Linsengleichung Glg.(3) zu berechnen, werden die in Kapitel 5.1.2 festgehaltenen Messergebnisse in die Formel eingesetzt. Die angegebene Unsicherheit folgt aus der Größtfehlermethode.

$$\Delta f = \left| \frac{b^2}{(g+b)^2} \cdot \Delta g \right| + \left| \frac{g^2}{(g+b)^2} \cdot \Delta b \right| \quad (12)$$

Dadurch ergeben sich für die beiden Messungen die Brennweiten $f_{1,Linse}$ und $f_{2,Linse}$:

$$f_{1,Linse} = (19,3 \pm 1,9) \text{ mm}$$

$$f_{2,Linse} = (19,5 \pm 1,6) \text{ mm}$$

6.1.3 Brennweite mittels Bessel-Verfahren

Für das Bessel-Verfahren werden laut Glg.(4) die Abstände l und ω benötigt. Der Abstand l , welcher die Länge zwischen dem Gegenstand und der Kamera repräsentiert, konnte direkt gemessen werden (siehe Kapitel

5.1.3). Um den Abstand ω zu erhalten, muss die Differenz der beiden gemessenen Linsenpositionen berechnet werden. Die angegebene Unsicherheit folgt hier aus einer Addition der beiden Unsicherheiten.

$$\omega = |pos_1 - pos_2| = (59 \pm 4) \text{ mm} \quad \Delta\omega = \Delta pos_1 + \Delta pos_2$$

Nun kann mittels Glg.(4) die Brennweite f_{Bessel} bestimmt werden, die angegebene Unsicherheit folgt wieder aus der Größtfehlermethode.

$$f_{Bessel} = (19,6 \pm 1,8) \text{ mm} \quad \Delta\omega = \left| \frac{l^2 + \omega^2}{4l^2} \cdot \Delta l \right| + \left| \frac{\omega}{2l} \cdot \Delta\omega \right|$$

6.2 Auswertung - Van Leeuwenhoek Mikroskop

Für das Mikroskop nach van Leeuwenhoek soll neben dem Festhalten der Beobachtungen auch die theoretische Vergrößerung berechnet werden. Hierzu muss aus den in Tabelle 1 angegebenen Durchmessern und aus der in der Angabe ([3]) gegebenen Brechungsindex für Glas $n = 1,518$ zuerst die effektive Fokuslänge f_{eff} je Kugel laut Glg.(6) berechnet werden. Die zugehörige Unsicherheit folgt aus der Größtfehlermethode. Wobei f_{eff1} dem kleineren Durchmesser zugehörig ist und dementsprechend f_{eff2} dem Größeren.

$$f_{eff1} = (1,832 \pm 0,019) \text{ mm} \quad \Delta f_{eff} = \frac{n}{4(n-1)} \cdot \Delta d$$

$$f_{eff2} = (4,65 \pm 0,05) \text{ mm}$$

Anschließend kann mittels Glg.(5) die Vergrößerung je Kugel berechnet werden. Die angegebene Unsicherheit folgt wiederum aus der Größtfehlermethode.

$$V_1 = (136,5 \pm 1,5) \quad \Delta V = \frac{250 \text{ mm}}{f_{eff}^2} \cdot \Delta f_{eff}$$

$$V_2 = (53,8 \pm 0,6)$$

Neben dieser theoretischen Berechnung der Vergrößerung, sind noch die Beobachtungen der in Kapitel 5.2 dargestellten Abbildungen interessant. Als erstes kann festgestellt werden, dass tatsächlich eine relativ große Vergrößerung stattfindet. Auch ist ein Unterschied zwischen der größeren und kleineren Kugellinse mit dem Auge erkennbar, leider ist dies nicht mit der Kamera festzuhalten. Zusätzlich zu der Vergößerung können auch einige Linsenfehler beobachtet werden. Hier sind die Bildfeldwölbung, welche eine Unschärfe an den Rändern hervorruft, und die späherische Aberration, welche eine Verzerrung der Darstellung zur Folge hat, zu erwähnen da diese deutlich erkennbar sind.

6.3 Auswertung - Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Zunächst wird die Vergrößerung V_{MIK} des Mikroskops theoretisch berechnet. Dies geschieht unter anderem über den Objektiv-Abbildungsmaßstab laut Glg. (7), welcher sich aus der bereits bestimmten Tubuslänge $t_o = (31 \pm 19) \text{ mm}$ (aus Kapitel 5.3) und der Brennweite des Objektives $f_{OBJ} = (35,0 \pm 0,4) \text{ mm}$ zusammensetzt. Die Unsicherheiten werden wieder mit der Größtfehlermethode berechnet.

$$A_{OBJ} = -(0,9 \pm 0,4) \text{ mm} \quad \Delta A_{OBJ} = \left| -\frac{1}{f_{OBJ}} \Delta t_o \right| + \left| \frac{t_o}{f_{OBJ}^2} \Delta f_{OBJ} \right|$$

Zusätzlich wird auch die Lupenvergrößerung M beziehungsweise Okularvergrößerung V_{OK} laut Glg. (8) bestimmt.

$$M = V_{OK} = (5,00 \pm 0,05) \text{ mm} \quad \Delta V_{OK} = \left| -\frac{250 \text{ mm} \Delta f_{OK}}{V_{OK}^2} \right|$$

Daraus ergibt sich die theoretisch berechnete Vergrößerung $V_{MIK,th}$ aus Glg. (9):

$$V_{MIK,th} = -4,4 \pm 1,7 \quad \Delta V_{MIK,th} = \left| \Delta A_{OBJ} V_{OK} \right| + \left| A_{OBJ} \Delta V_{OK} \right|$$

Um für diesen Wert einen Vergleich zu erhalten, wird nun die Vergrößerung $V_{MIK,ex}$ aus der experimentellen Messung berechnet. Diese ist lediglich das Verhältnis der Diagonalen d der beiden Quadrate, welche in Kapitel 5.3 mit der Kamera aufgenommen und abgemessen wurden.

$$V_{MIK,ex} = \frac{d_M}{d_S} = 4,394 \pm 0,018 \quad \Delta V_{MIK,ex} = \left| -\frac{1}{d_S} \Delta d_M \right| + \left| \frac{d_M}{d_S^2} \Delta d_S \right|$$

Als nächstes wird das Auflösungsvermögen des aufgebauten Mikroskops x_{min} bestimmt. Dies wird mit Glg. (10) berechnet, wobei die gemessene Gruppe $G = 6$ und Nummer $N = 4$ aus dem *USAF-Chart* hergenommen wird. Daraus wird sofort der Kehrwert berechnet (Glg. (11)) um das Auflösungsvermögen x_{min} zu erhalten. Es ergibt sich:

$$x_{min} = (11,0 \pm 0,7) \text{ } \mu\text{m} \quad \Delta x_{min} = \frac{1}{\Delta f_r} \quad \Delta f_r = \frac{\Delta N}{12} 2^{\frac{N}{6}+G+\frac{5}{6}} \ln 2$$

Weiters werden die Ergebnisse der optischen Fehler diskutiert. In Abbildung 12 ist die Linse verkehrt im Aufbau, so dass die Flache Seite von der Probe wegzeigt. Wie im Bild (a) zu erkennen ist, sind die Balken nur mehr sehr unscharf erkennbar. Dies ist aufgrund der sphärischen Aberration, die durch das Drehen der Linse entsteht. Bei einer plankonvexen Linse befindet sich die Hauptebene nicht in der Mitte (wie bei dünnen Linsen) sondern in Richtung der Krümmung versetzt. Nach dem Drehen ist die Hauptebene genau auf der anderen Seite wie davor, dies bedeutet, dass die achsenfernen Strahlen auf der gekrümmten Seite stärker brechen als auf der Flächen. Dies bedeutet, dass die Strahlen nicht mehr alle in einem Brennpunkt zusammenfallen, was eine Unschärfe des Bildes produziert. Somit muss die Probe mit der Mikrometerschraube weiter nach vorne gestellt werden, um die Brechung bei der richtigen Hauptebene und somit ein scharfes Bild zu erzielen. Das korrigierte Bild ist in Abbildung 12 (b) ersichtlich.

In Abbildung 13 (b) ist die Probe ohne Diffusor im Strahlengang abgebildet. Auch hier ist zu erkennen, dass das Bild unscharf im Vergleich zur Lichtquelle mit Diffusor (a) ist. Zu erkennen ist außerdem, dass im Bild ohne Diffusor ein grauer Film sichtbar wird, was auf einen schlechteren Kontrast schließen lässt. Der Diffusor streut das Licht und erstellt so ein schatten- und kontrastarmes Bild, da er die Quelle somit inkohärent macht. Befindet sich kein Diffusor im Strahlengang, ist die Lichtquelle kohärent und es kommt zu destruktiver und konstruktiver Interferenz. Dies verfälscht das Bild, wie es in (b) gut zu erkennen ist.

Abbildung 14 zeigt die Probe, bei der die Lichtquelle zuerst durch eine rote und anschließend durch eine blaue LED ersetzt wird. Man erkennt, dass die Abbildung nicht mehr perfekt scharf ist sondern Abweichungen aufweist. Dies ist auf die chromatische Aberration zurückzuführen: Licht verschiedener Wellenlänge bricht verschieden stark, wobei kurzwelliges Licht (blau) aufgrund der Dispersion stärker bricht als langwelliges (rot). Somit ist die Brennweite der Linse bei blauen Licht etwas kleiner als bei weißem. Als Korrektur wird die Gegenstandsweite g um 1,54 mm verringert, um das Bild wieder scharf darstellen zu können. Nun ist in Abbildung 14 zu erkennen, dass das Bild schärfer ist als bei der Halogen-Lampe. Dieser Effekt stimmt mit der Theorie überein, da bei weißem Licht (breites Spektrum an sichtbaren Wellenlängen) die verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich brechen und sich somit interferieren. Die einzelnen Farben besitzen nun einen verschobenen Brennpunkt, was zu der beobachteten Unschärfe führt.

Bei der roten LED wird ein ähnlicher Effekt sichtbar. Dieses mal muss jedoch die Probe nach vorne und somit die Gegenstandsweite g um 1,01 mm erhöht werden. Auch hier ist das Ergebnisbild wieder schärfer als das der Halogen-Lampe.

6.4 Auswertung - Dunkelfeld-Mikroskop

In Abbildung 15 kann erkannt werden, dass der Aufbau des Dunkelfeld-Mikroskops korrekt durchgeführt wurde. Die Probe erscheint auf der Kamera weiß, wo hingegen der Hintergrund dunkel beziehungsweise schwarz ist. Aufgrund des Aufbaus und äußerer Einflüsse im Labor konnte mit dem Dunkelfeld-Mikroskop keine genaueren Aufnahmen erzielt werden. Jedoch ist vor allem in Grafik (b) eine Vergrößerung festzustellen. Zusätzlich kann in Grafik (b) auch erkannt werden, dass die Ränder der Balken einen stärkeren Kontrast im Vergleich zum Hellfeld-Mikroskop aufweisen, was auf die Beugung des Lichtes hinweist. Auch die Ecken der Balken erscheinen kantiger.

7 Diskussion

7.1 Diskussion - Sammellinsen

Die gemessenen bzw. berechneten Werte für alle drei Verfahren (Lupeneffekt $f_{Lupe} = (22 \pm 4)$ mm, Linsengleichung $f_{1,Linse} = (19,3 \pm 1,9)$ mm und $f_{2,Linse} = (19,5 \pm 1,6)$ mm, und Besselverfahren $f_{Bessel} = (19,6 \pm 1,8)$ mm) befinden sich alle rund um den Wert $f = 20$ mm. Nachdem kein Literaturwert bekannt ist kann nur aufgrund der Ähnlichkeit der Ergebnisse der drei Methoden darauf geschlossen werden, dass es sich bei der verwendeten unbekannten Linse um eine mit einer Brennweite von $f = 20$ mm handelt. Vergleicht man anschließend noch die Unsicherheit der unterschiedlichen Verfahren, stellt man fest, dass die Schätzung mittels Lupenverfahren die ungenaueste Messung ist, dies liegt vor allem an der größeren Entfernung zwischen Schirm und Objekt, da hier eine genaue Position des Scharfstellens nur abgeschätzt werden konnte. Die beiden anderen Verfahren liefern hier genauere Ergebnisse. Doch auch bei diesen Ergebnissen ist die Unsicherheit noch relativ groß (ca. 5-10% des Messwertes), dies liegt auf der einen Seite am Messinstrument (Lineal), welches keine feinere Unterteilung hat und daran, dass nicht alle Positionierungen (Kamera und Linse) mit einer Feinstellschraube noch angepasst werden können.

7.2 Diskussion - van Leeuwenhoek

Der Zusammenbau des Mikroskops ist bis auf das Einsetzen der Kugellinsen problemlos, einzig beim Festdrücken der Linsen ist darauf zu achten diese nicht zu verlieren. Der Unterschied der Vergrößerungen welche theoretisch berechnet wurden, ist auch mit dem freien Auge gut zu erkennen, jedoch ist das Festhalten der Ergebnisse vor allem bei der kleineren Linse äußerst schwierig. Die beobachteten Linsenfehler, spärlicher Aberration und Bildfeldwölbung, sind in der Theorie mit der Geometrie bzw. starken Krümmung zu begründen und daher eine Folge davon, dass Kugellinsen für dieses Mikroskop verwendet werden. Unter Berücksichtigung dieser gewonnen Erfahrung, haben Sammellinsen gegenüber Kugellinsen den Vorteil, dass diese weniger stark gekrümmt sind und daher die Beobachteten Linsenfehler nicht so verstärkt auftreten. Des Weiteren ist die Frage ab welchen Brechungsindex n der Fokuspunkt nicht mehr außerhalb der Kugellinse liegt, in der Angabe [3] gestellt worden. Dies kann mittels Umformung der Glg. 6 und setzen der Fokuslänge auf $f_{eff} = \frac{d}{2}$ (da $\frac{d}{2}$ dem Radius der Kugellinse entspricht) theoretisch bestimmt werden:

$$\begin{aligned}\frac{d}{2} &= \frac{nd}{4(n-1)} \\ 4n-4 &= \frac{nd}{\frac{d}{2}} \\ 4n-4 &= 2n \\ 2n &= 4 \\ n &= 2\end{aligned}$$

Somit ist ab einem Brechungsindex von $n = 2$ der Fokuspunkt nicht mehr außerhalb der Kugellinse.

7.3 Diskussion - Hell- und Dunkelfeld

Beim Hellfeld-Mikroskop wurde die Vergrößerung V_{MIK} experimentell und theoretisch bestimmt. Vergleicht man diese beiden Werte

$$V_{MIK,th} = -4,4 \pm 1,7 \quad V_{MIK,ex} = 4,394 \pm 0,018$$

kann sofort erkannt werden, dass diese nicht signifikant voneinander abweichen. Der negative Wert bei der theoretischen Berechnung bedeutet hier nur, dass das Bild höhenverkehrt dargestellt wird. Dies wurde bei der experimentellen Bestimmung nicht direkt beachtet, da es bei einem Quadrat irrelevant ist. Somit kann auch der experimentelle Wert negativ hergenommen werden, um die Werte besser vergleichen zu können. Auffällig ist jedoch der im Vergleich große Messfehler bei der theoretischen Methode. Dies ist auf die schlechte Messung der Bildweite b mit dem Lineal zurückzuführen. Auch bei den Brennweiten f der Linsen wurde eine Unsicherheit angenommen, da keine genaue Information über die Präzision des Wertes der Brennweite

bekannt ist. Genauere Informationen über die Linsen und die Verwendung eines Messschiebers würde den Messfehler verringern. Eine größere Vergrößerung könnte mit einer höheren Tubuslänge t_o und somit leicht veränderte Position der Linsen erzielt werden.

Das Auflösungsvermögen beim Hellfeld-Mikroskop beträgt $x_{min} = (11,0 \pm 0,7) \mu\text{m}$. Aus Erfahrung aus vergangenen Experimenten (Abbe-Theorie Experiment in Laborübung 2) kann darauf geschlossen werden, dass dieser Wert in passender Größenordnung liegt, was auch auf eine korrekte Durchführung des Experimentes deutet. Eine Untersuchung des Auflösungsvermögens mit blauen LED als Lichtquelle würde laut der Abbe-Theorie einen genaueren Wert erzielen, da das Auflösungsvermögen direkt proportional zur Wellenlänge ist und bei blauen Licht somit einen kleineren Wert liefert.

Beim Experiment konnten folgende optische Fehler beobachtet werden:

Durch das Drehen der plankonvexen Linse konnte die sphärische Aberration beobachtet werden (Abbildung 12). Zeigt die konvexe Seite zur Beleuchtung, bricht das Licht auf einer früheren Hauptebene, was zur Verschiebung des Brennpunktes führt. Auch achsenferne Strahlen brechen stärker als achsennahe Strahlen, wodurch die Strahlen alle nicht mehr in einem Punkt zusammenfallen. Die sphärische Aberration tritt jedoch bei allen Arten von Linsen auf, und kann somit nur durch spezielle Kombination von Linsen vermieden werden.

Nach Entfernen des Diffusors wird die Lichtquelle kohärent, was zu Interferenzen des Lichtes und somit eine schlechtere Darstellung des Bildes führt (Abbildung 13). Der Kontrast wird zwar erhöht, dies jedoch auf Kosten der Schärfe und Qualität des Bildes.

Wird die Halogen-Lampe durch eine LED ausgetauscht, kann der Unterschied des Bildes über die chromatische Aberration erklärt werden (Abbildung 14). Nach anpassen der Bildweite b erscheint das Bild mit der blauen beziehungsweise roten LED schärfer als mit der Halogen-Lampe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das weiße Licht eine große Anzahl an Wellenlängen besitzt, die an der plankonvexen Linse verschieden stark brechen und somit nicht den selben Brennpunkt besitzen. Somit sollte für genaue Messungen des Auflösungsvermögen monochromatisches Licht verwendet werden, um ein schärferes Bild zu erhalten. Auch die Verwendung von Linsen aus Gläsern verschiedener Dispersion vermindern die chromatische Aberration.

Bei Abbildung 11 kann auch erkannt werden, dass die vertikalen Balken schlechter dargestellt werden als die Horizontalen. Dieser Effekt wird durch Astigmatismus beziehungsweise auch Koma beschrieben, welcher durch das schiefe Einfallen der Lichtstrahlen durch die Komponenten hervorgerufen wird. Dieser Effekt lässt sich jedoch schwer vermeiden, da mit dem optischen Aufbau auf der Bank schwer zu erkennen ist, ob die Linsen schief oder in einer Linie stehen. In Abbildung 10 kann auch eine Bildfeldwölbung erkannt werden, da das Bild in der Mitte schärfer erscheint als am Rand. Auch hier würde eine gerade Anordnung der Komponenten den Fehler vermindern.

Die experimentelle Beobachtung aller optischen Fehler stimmt mit der Theorie überein, was auf eine korrekte Durchführung des Experimentes schließen lässt.

Vergleicht man das Bild des Dunkelfeld-Mikroskop (Abbildung 15) mit dem Hellfeld-Transmissionsmikroskop (Abbildung 9) kann sofort der dunkel-hell Unterschied erkannt werden. Aufgrund der Empfindlichkeit und benötigten Präzision des Dunkelfeld-Mikroskops können die Bilder nicht so scharf aufgelöst werden wie beim Hellfeld-Mikroskop. Jedoch ist bei den Aufnahmen aus Abbildung 15 die Vorteile des Dunkelfeld-Mikroskops, wie zum Beispiel höherer Kontrast oder schärfere Kanten, zu erkennen.

8 Zusammenfassung

Bei der Brennweitenbestimmung einer unbekannten Sammellinse wurden über die drei Verfahren folgende Werte gemessen bzw. berechnet.

Lupeneffekt:

$$f_{Lupe} = (22 \pm 4) \text{ mm}$$

Linsengleichung:

$$f_{1,Linse} = (19,3 \pm 1,9) \text{ mm} \quad f_{2,Linse} = (19,5 \pm 1,6) \text{ mm}$$

Besselverfahren:

$$f_{Bessel} = (19,6 \pm 1,8) \text{ mm}$$

Für das Mikroskop nach van Leeuwenhoek wurden die effektiven Fokuslängen (f_{eff1} zugehörig zum kleinen Durchmesser und f_{eff2} zugehörig zu dem großen Durchmesser) und die theoretischen Vergrößerungen der beiden Kugellinsen (V_1 und V_2) berechnet.

$$f_{eff1} = (1,832 \pm 0,019) \text{ mm} \quad f_{eff2} = (4,65 \pm 0,05) \text{ mm}$$

$$V_1 = (136,5 \pm 1,5) \quad V_2 = (53,8 \pm 0,6)$$

Zusätzlich wurde noch der Grenzberechnungsindex n bei welchem der Fokuspunkt nicht mehr außerhalb der Kugel liegt theoretisch berechnet.

$$n = 2$$

Beim Hellfeld-Mikroskop wurde die Vergrößerung V_{MIK} theoretisch über die Turbuslänge t_o und experimentell mit der Messung eines Objektes auf der Probe bestimmt.

$$V_{MIK,th} = -4,4 \pm 1,7 \quad V_{MIK,ex} = 4,394 \pm 0,018$$

Weiters wurde auch das Auflösungsvermögen x_{min} des Mikroskopes mittels dem *USAF – Chart* bestimmt.

$$x_{min} = (11,0 \pm 0,7) \mu\text{m}$$

Zusätzlich wurden verschiedene optische Fehler wie die chromatische und sphärische Aberration, Astigmatismus oder die Kohärenz der Lichtquelle genauer untersucht.

Abschließend wurde ein Dunkelfeld-Mikroskop konstruiert, und dessen aufgenommenes Bild mit dem des Hellfeld-Mikroskops verglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017.
- [2] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017.
- [3] Peter Banzer. Advanced microscopy lab. https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1753452/mod_resource/content/3/Microscopy_Advanced_Lab_2021_v1_02.pdf, 2021. Accessed: 2022-05-06.