



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
INSTITUT FÜR PHYSIK

23S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM 2
678 Bachelorstudium Physik, UG2002/2021W

IV. Advanced Microscopy

WACHMANN Elias	ZACH Andreas
12004232	12004790
Gruppe 12	

Betreut von
Dr. Georg KOLLER

31.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen und Grundlagen	3
2.1	Abbildung durch eine Sammellinse	3
2.2	Das Ein-Linsen-Mikroskop nach van Leeuwenhoek	5
2.3	Hellfeld-Transmissionsmikroskop	6
2.4	Dunkelfeldmikroskop	8
2.5	Unsicherheitsanalyse	9
3	Versuchsanordnung	9
3.1	Brennweite der Sammellinse	9
3.2	Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	10
3.3	Hellfeld-Transmissionsmikroskop	10
3.4	Dunkelfeldmikroskop	11
4	Geräteliste	13
5	Versuchsdurchführung und Messergebnisse	13
5.1	Brennweite einer Sammellinse	13
5.2	Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	15
5.3	Hellfeld-Transmissionsmikroskop	15
5.4	Dunkelfeldmikroskop	20
6	Auswertung	21
6.1	Brennweite einer Sammellinse	21
6.2	Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	21
6.3	Hellfeld-Transmissionsmikroskop	22
6.4	Dunkelfeldmikroskop	22
7	Diskussion	23
7.1	Brennweite einer Sammellinse	23
7.2	Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	23
7.3	Hellfeld-Transmissionsmikroskop	23
7.4	Dunkelfeldmikroskop	25
8	Zusammenfassung	25

1 Aufgabenstellung [1]

Der vorliegende Laborversuch teilt sich in Unterversuche, welche wie folgt gegeben sind:

- Bestimmung der Brennweite einer Sammellinse
 - Mittels Lupeneffekt
 - Mittels Abbildungsgleichung
 - Mittels Bessel-Verfahren
- Das Ein-Linsen-Mikroskop nach VAN LEEUWENHOEK
 - Aufbau des Mikroskops
 - Qualitatives Betrachten von Objekten
 - Bestimmung der effektiven Fokusslänge
 - Bestimmung des Brechungsindex, ab welchem der Fokuspunkt innerhalb der Kugellinse liegt
- Hellfeld-Transmissionsmikroskop
 - Aufbau des Mikroskops und Einrichtung
 - Aberrationen
 - * Linsenorientierung (Objektiv) und sphärische Aberration
 - * Kohärenz der Beleuchtung
 - * Wellenlängenabhängigkeit und chromatische Aberration
 - Charakteristika des Mikroskops
 - * Gesamtvergrößerung
 - * Auflösungsvermögen
- Dunkelfeldmikroskop
 - Aufbau des Mikroskops und Einrichtung
 - Vergleich mit dem Hellfeld-Transmissionsmikroskop

2 Voraussetzungen und Grundlagen [1]

2.1 Abbildung durch eine Sammellinse

Für den vorliegenden Versuch soll die Fokusslänge/Brennweite f der Sammellinse bestimmt werden. Dazu werden drei verschiedene Methoden angewendet:

Methode 1. Zuerst soll die Brennweite über den „Lupeneffekt“ bestimmt werden, indem ein sehr weit entferntes Objekt (Abstand zur Linse $\gg f$) scharf abgebildet wird.

Methode 2. Die Brennweite kann auch aus der Linsengleichung

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

experimentell bestimmt werden (g Gegenstandsweite, b Bildweite, G Gegenstandsgröße, B Bildgröße; siehe auch Abbildung 2.1). Als Beleuchtung wird eine Halogenlampe und als Objekte zur Verfügung stehende Proben verwendet. Die entsprechenden Abstände b und g werden mittels Lineal und die Größen B und G mittels Kamera gemessen.

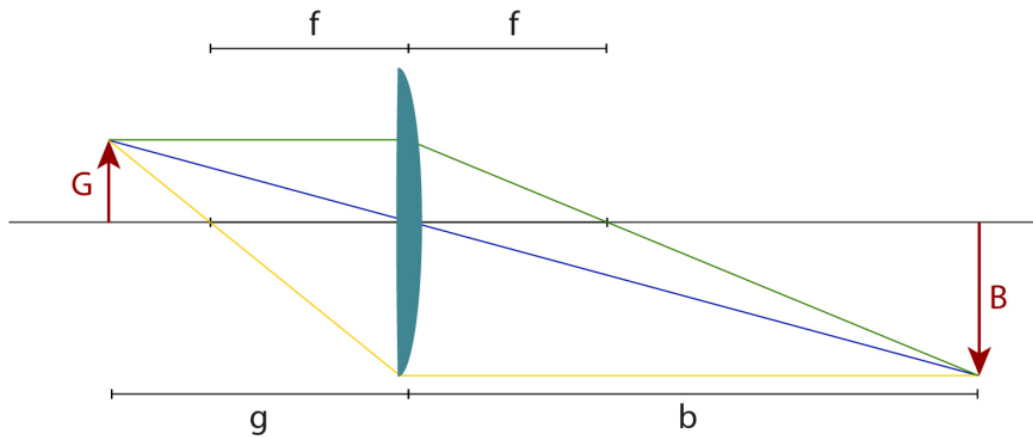


Abbildung 2.1: Strahlengang zur Abbildung mithilfe einer einzelnen Sammellinse zusammen mit den wichtigsten Parametern. Konstruktion eines Bilds: Parallelstrahl wird zum Brennpunktstrahl (grün) und Brennpunktstrahl zum Parallelstrahl (gelb). Schnittpunkt mit Mittelpunktstrahl (blau) definiert Bildweite b und Bildgröße B .

Methode 3. Zuletzt wird zur Bestimmung der Brennweite das sogenannte *Bessel-Verfahren* oder *Bessel'sches Verschiebungsverfahren* verwendet. Hierzu wird wieder ein Gegenstand im Versuchsaufbau mit der Linse scharf abgebildet. Bei festem Abstand l von Gegenstand und Position des scharf abgebildeten Bildes ($l = b + g = \text{const.}$) lässt sich eine zweite Position der Linse finden, für die eine scharfe Abbildung möglich ist ($l = b_1 + g_1 = b_2 + g_2$). Aus dem Gesamtabstand l und dem Abstand w zwischen beiden Linsenpositionen lässt sich letztendlich die Brennweite f bestimmen. Dazu gilt folgende Gleichung unter der Annahme dünner Linsen:

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

2.2 Das Ein-Linsen-Mikroskop nach van Leeuwenhoek

Antonie VAN LEEUWENHOEK (1632-1723) gilt als einer der ersten erfolgreichen Konstrukteure von einfachen Mikroskopen mit (bis zu seiner Zeit) unerreicht hohen Vergrößerungen und beeindruckender Bildqualität. Durch die hohe Qualität der Linsen und die clevere Konstruktion seiner Ein-Linsen-Mikroskope, die teils eher an sehr starke Lupen erinnern, konnte er Auflösungen im Mikrometerbereich erreichen und Mikroorganismen abbilden (und diese dabei auch erstmals nachweisen!). Aufgrund dieser Erfolge wird er auch als Vater der Mikrobakteriologie bzw. Mikrobiologie bezeichnet. Um die genauen Methoden seiner mikroskopischen Messungen ranken sich viele Mythen und Interpretationsversuche, da er die Details bzgl. der Messprozedur sowie der genauen Vorgehensweise zur Herstellung von Linsen, das Kernstück seiner Geräte, stets geheim hielt.

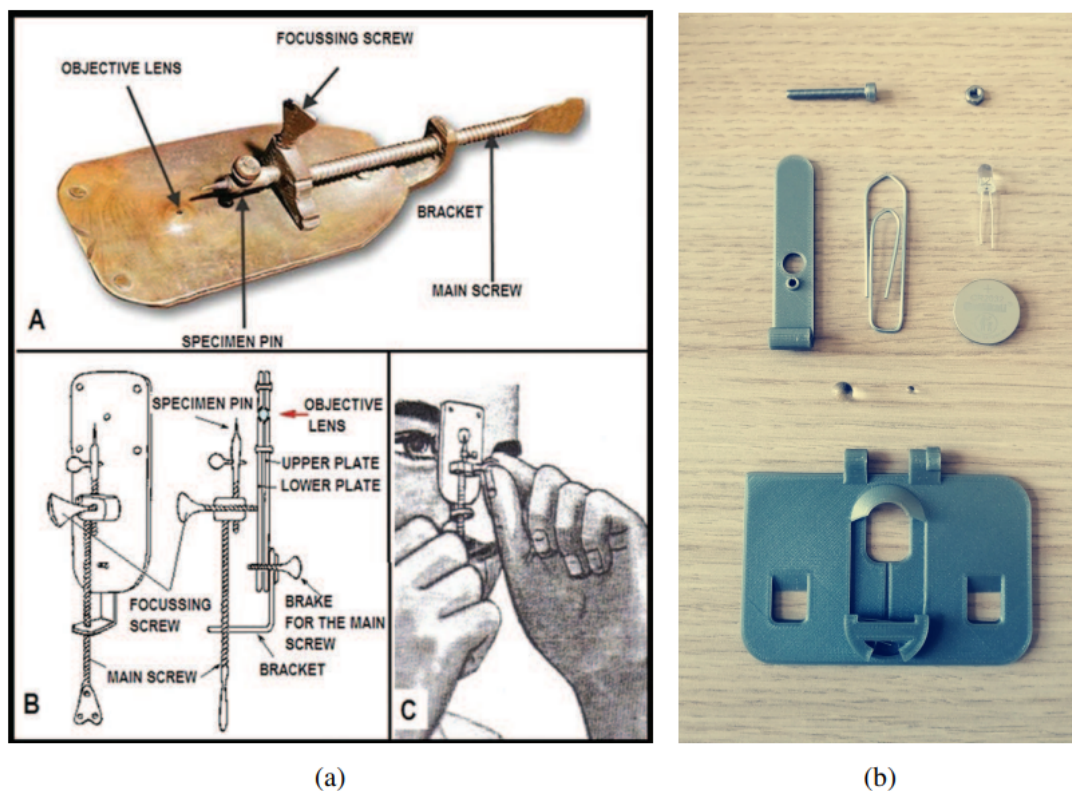


Abbildung 2.2: (a) Bild eines einfachen Mikroskops von van Leeuwenhoek mit Beschreibung der einzelnen Bauteile. (b) Einzelteile des Selbstbau-Ein-Linsen-Mikroskops angelehnt an van Leeuwenhoek. Auf dem Bild zu sehen sind die 3D-gedruckten Bauteile zur Halterung von Probe, Linsen und Beleuchtung sowie weitere Elemente (Batterie, LED, Schraube, Klammer, Kugellinsen). (c) Fertiggestelltes Selbstbau-Ein-Linsen-Mikroskop.

Im Folgenden findet sich eine Liste der Bauteile (siehe auch Abbildung 2.2):

- 2 Glaskugeln verschiedenen Durchmessers (2,5 mm und 6,35 mm) als Linsen mit Brechungsindex $n = 1,518$
- 1 Halterung für beide Linsen
- 1 Weißlicht-LED als Beleuchtung
- 1 Batterie (Knopfzelle CR2032)
- 2 Papierklammern (Probenbefestigung)
- 1 Trägerplatte zur Befestigung der Probenhalterung
- 1 Schraube zur Befestigung des Linsenhalters an der Trägerplatte

Zur Bestimmung der geforderten Größen, der Lupenvergrößerung M sowie der effektiven Fokusslänge f , werden noch die folgenden Gleichungen benötigt:

$$M = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (3)$$

$$f = \frac{n \cdot d}{4(n - 1)} \quad (4)$$

Dabei steht d für den Durchmesser der Kugellinse und n bezeichnet die Brechzahl der Linse.

2.3 Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Ein konventionelles Mikroskop (griechisch *mikros*: klein, *skopein*: betrachten) besteht in der Regel aus mindestens zwei Linsen und erlaubt – wie der Name schon vermuten lässt – die Betrachtung bzw. Vergrößerung von Objekten, die sich mit dem bloßen Auge eben nicht erkennen/auflösen lassen. Im einfachsten Falle kommen also zwei Linsen zum Einsatz (siehe Abbildung 2.3), wobei eine davon als Objektiv (nahe dem Objekt) und die andere als Okular (nahe dem Auge, lateinisch *oculus*) fungiert. Das Objektiv erzeugt dabei ein vergrößertes Zwischenbild des Objekts, welches seinerseits durch das Okular weiter vergrößert wird (wie durch eine zusätzliche Lupe). Es ergibt sich eine Gesamtvergrößerung des Objekts durch das System. Fallen die Position des Zwischenbilds und des vorderen Brennpunkts des Okulars zusammen, so entsteht ein Bild im Unendlichen (siehe Abbildung 2.3), welches durch die entspannte Augenlinse auf der Netzhaut zu einem scharfen gesamtvergrößerten Bild wird. Befände sich das Zwischenbild näher am Okular, so entstünde ein virtuelles Zwischenbild, welches für das angespannte Auge in einer effektiven Bezugssehweite von etwa 25 cm liegt. Es gibt unzählige Arten von Mikroskopen, die alle Vor- und Nachteile mit sich bringen und die finale Wahl der Methode hängt meist vom abzubildenden System ab.

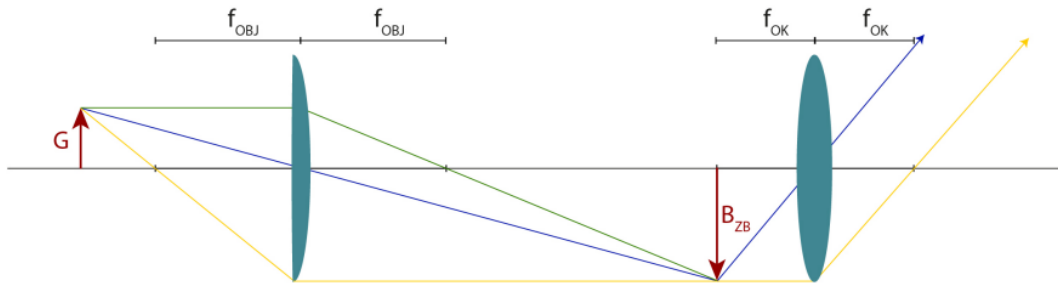


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau und Bildkonstruktion eines Mikroskops bestehend aus Gegenstand/Objekt, Objektivlinse und Okularlinse. Die entsprechenden Brennweiten und weitere Parameter sind im Bild vermerkt. Das Okular ist hier so platziert, dass dessen Brennpunkt und die Position des Zwischenbildes (ZB) zusammenfallen. Dadurch entsteht ein Bild im Unendlichen. Mithilfe der (entspannten auf Unendlich akkommodierten) Augenlinse oder eben einer Kameralinse entsteht letztendlich ein scharfes, gesamtvergrößertes Bild (hier nicht eingezeichnet). Auch die Beleuchtung des Gegenstandes ist nicht eingezeichnet. Den Abstand zwischen hinterem Brennpunkt des Objektivs und vorderem Brennpunkt des Okulars nennt man optische Tubuslänge t_o .

Fallen Zwischenbild und vorderer Brennpunkt des Okulars zusammen, so ist die Vergrößerung V_{MIK} des Systems definiert als das Produkt des Objektiv-Abbildungsmaßstabs A_{obj} und der Okularvergrößerung V_{oku} (vgl. Gleichung 3).

$$A_{\text{obj}} = -\frac{t_o}{f_{\text{obj}}} \quad (5)$$

$$V_{\text{oku}} = \frac{25 \text{ cm}}{f_{\text{oku}}} \quad (6)$$

$$V_{\text{MIK}} = A_{\text{obj}} \cdot V_{\text{oku}} \quad (7)$$

Eine wichtige Größe bei Mikroskopen ist deren Auflösungsvermögen x_{min} . Es beschreibt den kleinsten Abstand, bei welchem zwei Objekte noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können, dies ist das Ergebnis der Abbe'schen Abbildungstheorie.

Im zentralen Bereich der Probe befinden sich verschiedene Gruppen G , welche jeweils aus mehreren Elementen E aufgebaut sind. Jede Gruppe (Nummerierung jeweils oben) besteht aus sechs Elementen (Nummerierung seitlich). Jedes Element besteht dabei aus drei horizontalen und drei vertikalen Balken. Je höher die Nummerierung, desto kleiner die Balken.

In diesem Experiment lässt sich das Auflösungsvermögen über die Balken- und Gruppennummer der Probe berechnen. Hierbei kann die Ortsfrequenz f_r folgendermaßen bestimmt werden:

$$f_r = 2^{G + \frac{E-1}{6}} \quad (8)$$

Die Einheit der Ortsfrequenz ist hierbei die Anzahl der Linienpaare pro Millimeter (LP/mm). G beschreibt die Gruppennummer und E die Elementnummer. Das Auflösungsvermögen lässt sich schließlich über den Kehrwert der Ortsfrequenz berechnen:

$$x_{\min} = \frac{1}{f_r} \quad (9)$$

2.4 Dunkelfeldmikroskop

Wie im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben spielt die Art der Beleuchtung eine große Rolle. Dabei sind die Wellenlänge oder auch die spektrale Breite, die Homogenität und der Winkelbereich der Beleuchtung von großer Wichtigkeit. Nun sollen diese Aspekte erneut in Bezug auf Dunkelfeld-Beleuchtung bzw. -Mikroskope aufgegriffen werden. Erste Ansätze in Richtung dieser Methode werden VAN LEEUWENHOEK, HOOKE und HUYGENS zugeschrieben. Im Vergleich zu einem Hellfeld-Mikroskop, bei dem die Strukturen einer Probe vor einem hellen Hintergrund erscheinen und sich vor allem durch Absorption und durch Streuung verloren gegangenes Licht von diesem abheben, wird beim Dunkelfeld-Prinzip nur dort Licht aufgesammelt, wo die Probe Licht in eine Aufsammeleoptik (Linse/Objektiv) hineinstreut. Bereiche, in denen es zu keiner Streuung kommt, erscheinen im Bild also schwarz. Dies kann bei wenig absorbierenden Proben von großem Vorteil in Sachen Bildkontrast sein. In Abbildung 2.4 ist ein Vergleich aus Hellfeld- und Dunkelfeld-Beleuchtung gezeigt. Man sieht deutlich, wie im Falle einer Hellfeld-Beleuchtung (Abbildung 2.4, links) die Probe ausgeleuchtet und das transmittierte Licht gemessen wird. Wird Licht vom Objekt reflektiert, absorbiert oder so gestreut, dass es die Aufsammeleoptik nicht erreicht, so wird dort im Bild die Intensität geringer sein, als an Orten, an denen das Licht nahezu ungehindert die Probe durchlaufen konnte. Das Bild erscheint also als dunklerer Bereich auf hellem Hintergrund. Findet wenig Absorption, Streuung oder Reflexion statt, ist der Kontrast (Helligkeitsunterschied) sehr gering. Wenn hingegen Abbildung 2.4 (rechts) betrachtet wird, so sieht man deutlich, dass die Dunkelfeld-Beleuchtung zu einer vollkommen anderen Bilderzeugung führt, deren Kontrastmechanismus auch stark von der Hellfeld-Methode abweicht. Das Licht, welches die Probe nahezu ungehindert durchläuft, liegt außerhalb des Winkelbereichs der Aufsammeleoptik (streifender Einfall der Beleuchtung). Entsprechende Bereiche werden im Bild als Hintergrund also schwarz/dunkel erscheinen. Werden aber Teile des Lichts in Bereiche des Objekts gestreut und dabei so umgelenkt, dass sie aufgesammelt werden können, so zeichnen sich diese Bereiche also hell ab. Es entsteht ein entsprechender Kontrast. Die Absorption spielt hierbei eine untergeordnete Rolle.

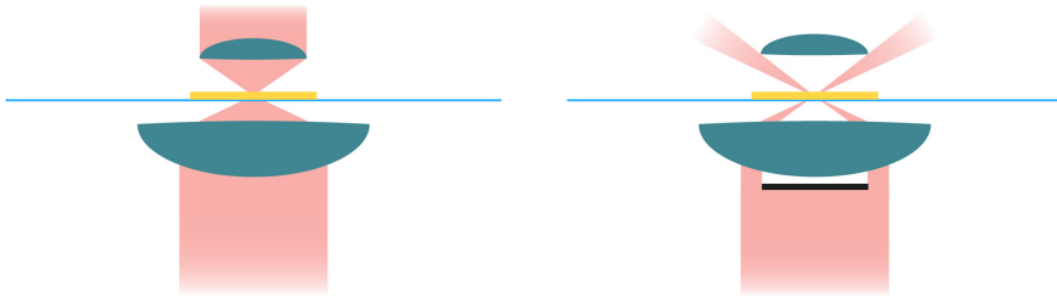


Abbildung 2.4: Vergleich Hellfeld- (links) und Dunkelfeld-Methode (rechts). Beleuchtung/Licht (rot) von unten kommend. Zentrallinse (rechts, schwarz) lässt nur Randstrahlen passieren.

2.5 Unsicherheitsanalyse

Die explizit angegebenen Unsicherheiten der ermittelten Messgrößen basieren auf Berechnungen durch die Unsicherheitsangabe nach den Datenblättern der verwendeten Messgeräte. Diese sind in Tabelle 4.1 vermerkt beziehungsweise referenziert.

Die Fehlerfortpflanzung der berechneten Werte basiert auf der Größtunsicherheitsmethode nach Gauß. Um diese Berechnungen zeiteffizient durchführen zu können, wird für jeden Unterpunkt der Laborübung ein Skript in **Python** implementiert. Kernstück dessen ist das package **uncertainties** [2], das intern die Fehlerfortpflanzung berechnet. Gerundet wird nach den Angaben des Skriptums der Lehrveranstaltung „Einführung in die physikalischen Messmethoden“ [3].

3 Versuchsanordnung

3.1 Brennweite der Sammellinse

Die Bestimmung der Brennweite wird, wie in Abschnitt 1 angeführt, mittels dreier verschiedener Ansätze vorgenommen.

Der Aufbau ist für die unterschiedlichen Verfahren größtenteils gleich, Abweichungen davon werden in Abschnitt 5 beschrieben. Die Bauteile werden allesamt auf einer Aluminiumschiene fixiert, wodurch eine möglichst lineare Anordnung und dadurch auch ein möglichst paralleler Strahlengang erreicht werden kann. Der grundsätzliche Aufbau ist Abbildung 3.1 zu entnehmen.

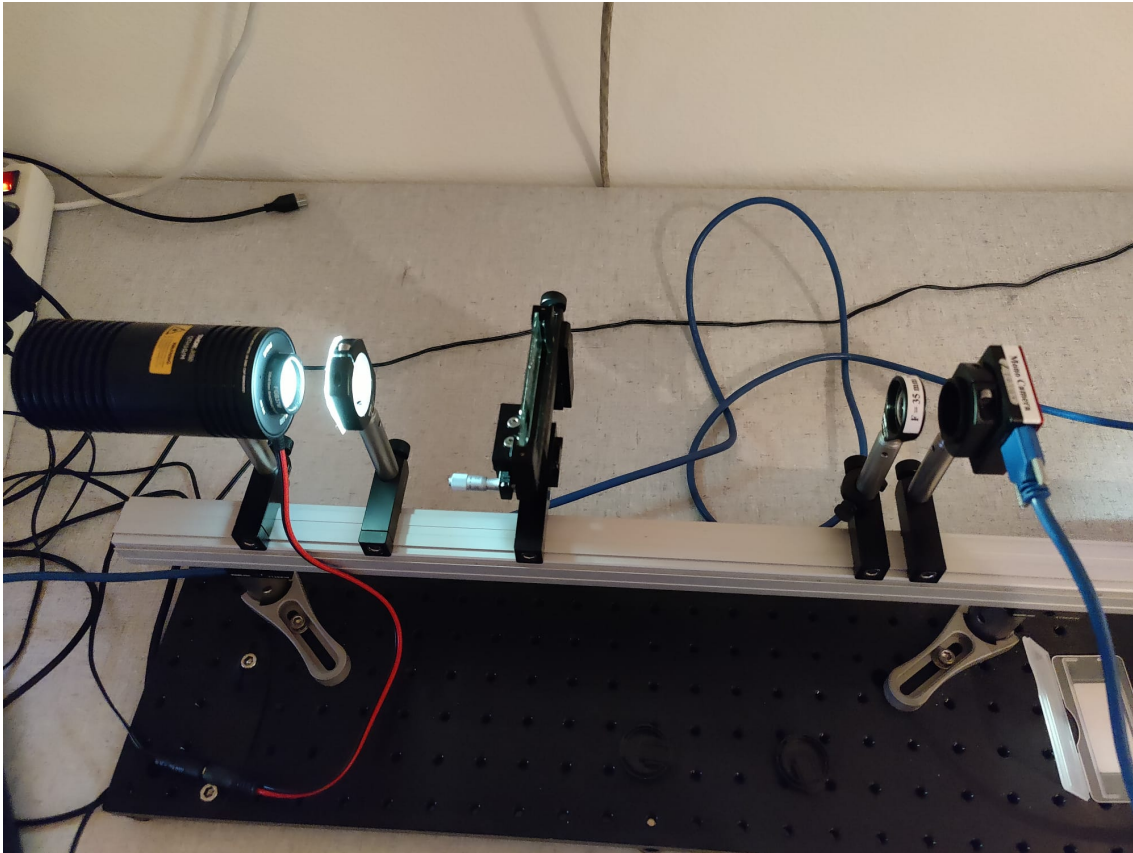


Abbildung 3.1: Aufbau zur Bestimmung der Brennweite einer Sammellinse. Komponenten von links nach rechts: Lampe, Diffusor, Probenhalter inkl. Probe, plankonvexe Linse (planare Seite objektseitig), Kamera

3.2 Van-Leeuwenhoek-Mikroskop

Das Van-Leeuwenhoek-Mikroskop wird nach den Beschreibungen in [1] zusammengebaut. Dazu wird die Knopfatterie in das dafür vorgesehene Fach gegeben und die beiden LED-Kontakte mit der richtigen Polarität zwischen Kunststoff und Zelle eingeklemmt. Die LED dient der Beleuchtung der Proben. Nun bringt man mittels Schraube noch den Arm mit den beiden Linsen an und der Aufbau ist vollständig.

3.3 Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Der Versuchsaufbau aus Unterabschnitt 3.1 wird übernommen und anschließend wie folgt geändert: Zuerst wird die plankonvexe Linse gegen eine Linse mit $f_{\text{obj}} = 35 \text{ mm}$ (objektivseitig) ausgetauscht. Diese Linse wird in einem Abstand g_{obj} von $(44 \pm 1) \text{ mm}$ eingesetzt.

Das Okular mit Brennweite $f_{\text{oku}} = 50 \text{ mm}$ wird im Abstand von $(210 \pm 6) \text{ mm}$ von der Probe eingebaut. Die Kamera mit angeschraubter Linse mit $f_{\text{cam}} = 150 \text{ mm}$ wird im Abstand von $(200 \pm 5) \text{ mm}$ angebracht. Der Aufbau sei nochmals in Abbildung 3.2 dargestellt.

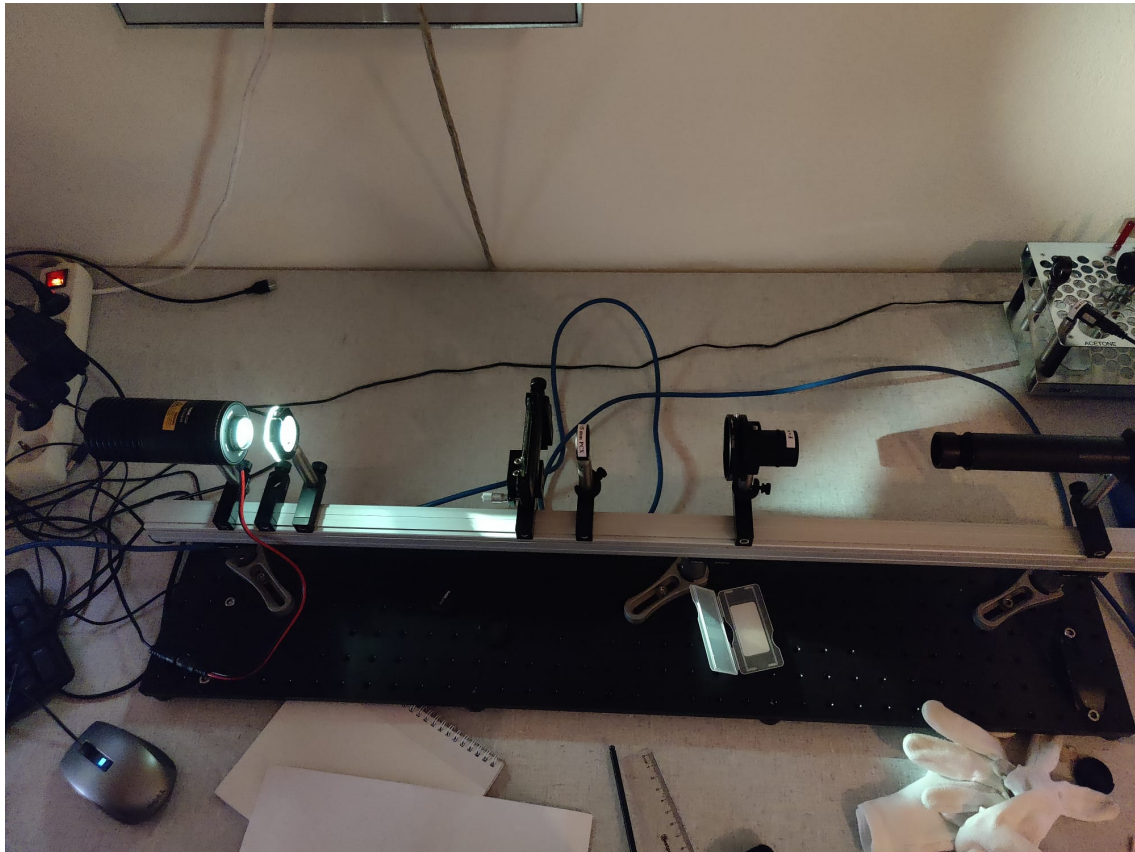


Abbildung 3.2: Aufbau eines Hellfeld-Transmissionsmikroskops

3.4 Dunkelfeldmikroskop

Für den Dunkelfeldaufbau wird der Diffusor aus dem Strahlengang genommen und ein spezielles Objektiv eingesetzt, dieses hat bereits eine Blende integriert, welche nur einen peripheren Ring zur Beleuchtung der Probe offenlässt. Nach der Probe wird anstelle der in den vorherigen Versuchen benutzten Linsen eine achromatische Linse mit $f = 25 \text{ mm}$ eingebracht und die Kamera ohne angeschraubte Linse befestigt. Die achromatische Linse verfügt zudem noch über eine Irisblende, um nur das Streulicht der Probe, nicht aber das direkte Licht in die Kamera zu lassen. Der Aufbau ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

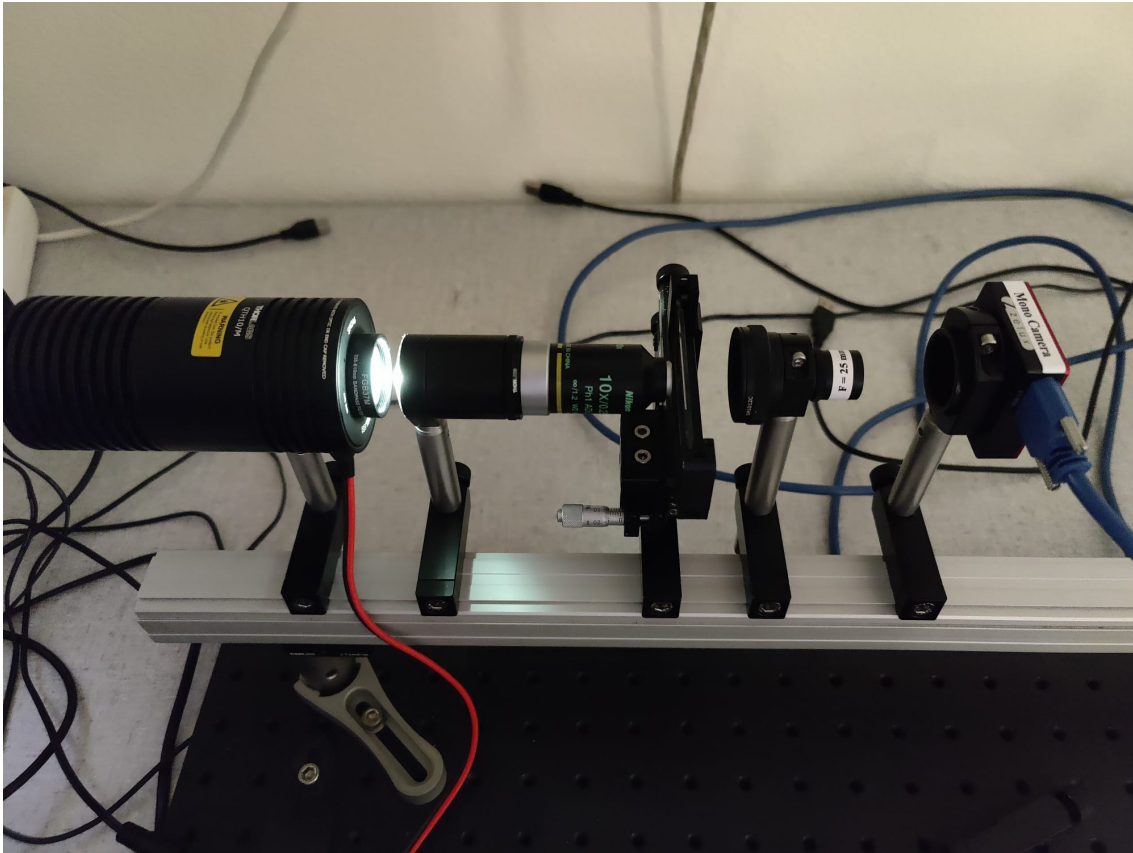


Abbildung 3.3: Aufbau eines Dunkelfeldmikroskops

4 Geräteliste

Tabelle 4.1: Verwendete Geräte und wichtige Materialien

Gerät	Hersteller	Modell	Inventar-Nr.	Anmerkung
QTH10/M	THORLABS	-	-	inkl. Infrarot Filter
LED 2×	THORLABS	-	-	rot & blau
Diffusor	-	-	-	-
Probenhalter XYF1	THORLABS	-	-	-
Probe	THORLABS	-	-	-
Plankonvexe Sammellinsen	-	-	-	unbekannte Brennweite
Optischer Tisch	-	-	-	inkl. Befestigungsschienen
Van Leeuwenhoek Mikroskop	3D-Drucker	-	-	inkl. Schraube, LED & Batterie
Kamerasensor	CS165MU/M	-	-	1,6 Mpx – Pixelgröße: 3,45 μm
Kamerasoftware	THORLABS	ThorCam™	-	1,6 Mpx – Pixelgröße: 3,45 μm
Kameraobjektiv	-	-	-	$f = 150 \text{ mm}$
Objektiv	-	-	-	$f = 35 \text{ mm}$
Okular	-	-	-	$f = 50 \text{ mm}$
Mikroskopobjektiv	Nikon	-	-	Vergrößerung: 10×
Achromatische Linse	-	-	-	$f = 25 \text{ mm}$, inkl. Irisblende

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 Brennweite einer Sammellinse

Der Aufbau wird, wie auf Abbildung 3.1 gezeigt, hergestellt.

Lupeneffekt. Um zuallererst die Brennweite mittels Lupeneffekt abzuschätzen, gilt die Annahme, dass das Bild in sehr großer Entfernung entsteht. Als beweglicher Schirm für das reelle Bild fungiert ein weißes Blatt Papier. In einem Zusammenspiel aus Veränderung der Linsenposition relativ zur optischen Probe und dem Schirm in Form des weißen Blatt Papiers wird eine Anordnung gefunden, bei welcher das Bild in großer Entfernung von der Linse scharf wirkt. Unter der Annahme, dass die Strahlen parallel verlaufen, ist dieses Bild auch im Unendlichen noch scharf. Bei dieser Konfiguration wird die Gegenstandsweite g – der Abstand von optischer Probe zur Linse – vermessen und mit

$$g = (20 \pm 2) \text{ mm}$$

beziffert.

Linsengleichung. Als Nächstes wird die Brennweite der Linse über die Linsengleichung (Gleichung 1) bestimmt. Hierzu wird der Abstand des Gegenstands, also der Probe, sowie der Abstand des entstehenden Bilds zur Linse gemessen. Diese Messung wird je zweimal wiederholt, allerdings mit unterschiedlichen Positionen der Linse, sodass sich zwei unabhängige Kombinationen von g und b ergeben. Die Messergebnisse finden sich in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Messergebnisse des Teilversuchs zur Bestimmung der Brennweite einer Linse mittels Linsengleichung. g bezeichnet die Gegenstandsweite, b die Bildweite, i den Laufindex der Position der Linse. Unsicherheiten Δg und Δb individuell in der Tabelle angegeben.

$i / 1$	g / mm	$\Delta g / \text{mm}$	b / mm	$\Delta b / \text{mm}$
1	126	3	35	2
2	44	2	54	2

Bessel-Verfahren. Zuletzt wird die Brennweite der Linse noch über das Bessel-Verfahren, wie in Unterabschnitt 2.1 beschrieben, bestimmt. Es wird eine beliebige Position der Linse gewählt und sowohl die Gegenstandsweite g als auch die Bildweite b vermessen. Die Summe dieser beiden ergibt die Gesamtlänge l . Danach wird eine neue Position der Linse gewählt, sodass sich die Gesamtlänge nicht verändert. Die gemessenen Bildweiten und Gegenstandsweiten befinden sich in Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Messergebnisse des Teilversuchs zur Bestimmung der Brennweite einer Linse mittels Bessel-Verfahren. g bezeichnet die Gegenstandsweite, b die Bildweite, i den Laufindex der Position der Linse. Unsicherheiten Δg und Δb individuell in der Tabelle angegeben.

$i / 1$	g / mm	$\Delta g / \text{mm}$	b / mm	$\Delta b / \text{mm}$
1	23	2	125	3
2	112	3	36	3

5.2 Van-Leeuwenhoek-Mikroskop

Der Aufbau wird, wie in Unterabschnitt 3.2 beschrieben, hergestellt. Anschließend werden als zu untersuchende Proben eine Kugelschreiberspitze und ein Blatt Papier herangezogen. Durch die beiden Kugellinsen konnten dann tatsächlich vergrößerte Bilder der genannten Proben betrachtet werden, obgleich es nicht ganz einfach war, die richtige Position zu finden, bei der man tatsächlich ein Bild erkennen konnte. Mithilfe der Makro-Kamera des Smartphones eines Experimentierenden konnten sogar digitale Abbildungen der vergrößerten Bilder aufgenommen werden. Dies ist jedoch nur mit der größeren Kugellinse möglich, das Bild der kleineren lässt sich mit der Kamera nicht auflösen. Die Abbildungen der größeren Linse finden sich in den Abbildungen 5.1 und 5.2.

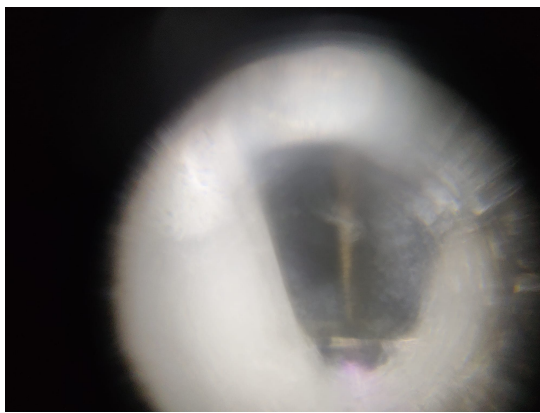


Abbildung 5.1: Durch die größere Linse des Van-Leeuwenhoek-Mikroskops vergrößerte Kugelschreiberspitze

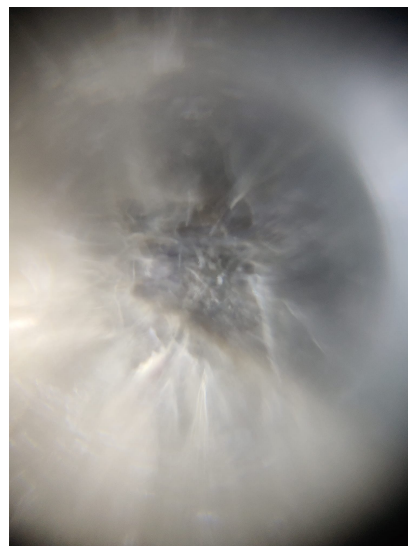


Abbildung 5.2: Durch die größere Linse des Van-Leeuwenhoek-Mikroskops vergrößertes Blatt Papier

Betrachtet man weiters den Unterschied der beiden am Mikroskoparm angebrachten Linsen, so wird ersichtlich, dass die Kugellinse mit größerem Durchmesser eine stärkere Vergrößerung als die mit kleinerem Durchmesser aufweist. Gemein ist beiden Linsen jedoch eine deutlich erkennbare Bildfeldwölbung.

5.3 Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Der Aufbau wird, wie in Unterabschnitt 3.3 beschrieben, hergestellt. Anschließend wird eine verbleibende, für die Auswertung relevante und noch nicht bekannte, Größe vermessen: Der Abstand zwischen Objektiv- und Okularlinse. Dieser beträgt $d_{\text{obj-ok}} = (170 \pm 5) \text{ mm}$. Die Brennweite der Objektivlinse beträgt $f_{\text{obj}} = (35,0 \pm 0,4) \text{ mm}$ und die der Okularlinse $f_{\text{oku}} = (50,0 \pm 0,4) \text{ mm}$. Als Nächstes wird die Auswirkung von Aberrationseffekten auf das Bild der Linse untersucht.

Objektivlinsenorientierung und sphärische Aberration. Nachdem bereits ein scharfes Bild zustande gebracht worden ist, wird dieses mittels Kamera aufgenommen und abgespeichert. Es gilt als Referenzbild im Ausgangszustand der Anordnung. Dieses Bild findet sich auf Abbildung 5.3.

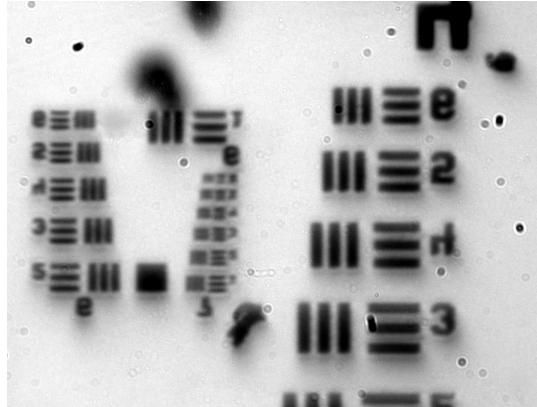


Abbildung 5.3: Referenzbild des Teilversuchs zur Untersuchung der Auswirkung der Objektivlinsenorientierung und der sphärischen Aberration auf das entstehende reelle Bild.

Anschließend wird die Objektivlinse mitsamt Halterung um 180° gedreht. Nun weist die konvexe Seite der Linse in Richtung Probe. Erneut wird ein Bild aufgenommen, dieses ist jedoch nicht scharf. Mit dem Feinregler wird die Position der Probe justiert, sodass wieder ein scharfes Bild entsteht. Das scharfe sowie unscharfe Bild sind nebeneinander in den Abbildungen 5.4 und 5.5 dargestellt.

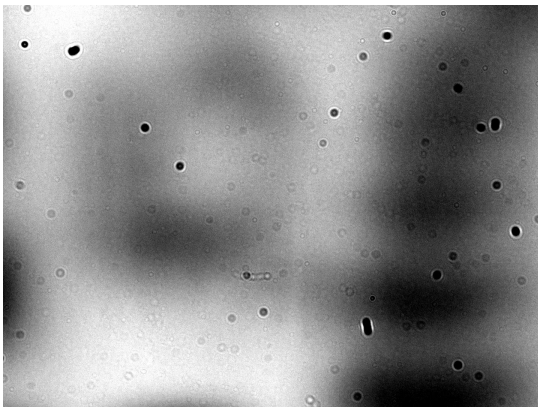


Abbildung 5.4: Unscharfe Abbildung bei um 180° gedrehter Objektiv-Linse (konvexe Seite zeigt zur Probe)

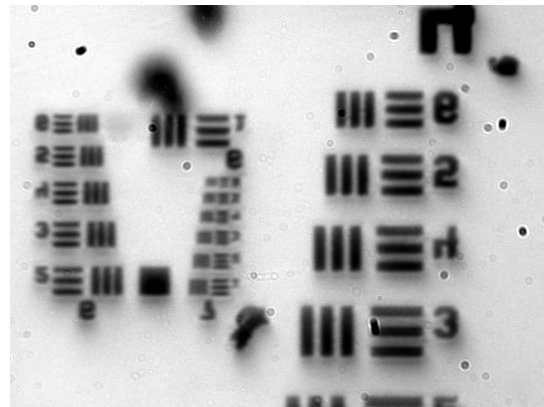


Abbildung 5.5: Scharfe Abbildung bei um 180° gedrehter Objektiv-Linse (konvexe Seite zeigt zur Probe)

Kohärenz. Als Nächstes wird die Auswirkung der Kohärenz der Beleuchtung auf die Bildgebung untersucht. Hierzu wird der Diffusor zwischen Lichtquelle und Probe aus dem

Aufbau entfernt. Die Position der restlichen Komponenten bleiben unverändert. Es ergibt sich abermals ein unscharfes Bild, welches diesmal jedoch nicht scharfgestellt werden konnte. Dieses Bild befindet sich auf Abbildung 5.6.

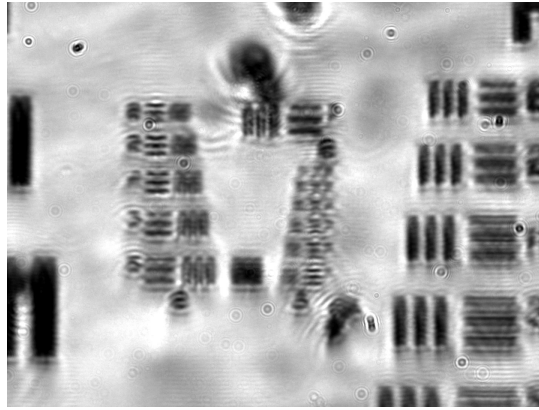


Abbildung 5.6: Bildgebung nach Entfernung des Diffusors aus dem Aufbau

Wellenlängenabhängigkeit und chromatische Aberration. Zu guter Letzt wird die Wellenlängenabhängigkeit des Bilds untersucht. Hierzu wird die Halogenlampe, die bis eben als Lichtquelle gedient hat, durch eine blaue LED ersetzt. Diese wird über einen USB-Port, welcher mit dem PC verbunden wird, mit Strom versorgt. Es wird wieder ein (unscharfes) Bild aufgenommen (Abbildung 5.7) und scharfgestellt (Abbildung 5.8). Anschließend wird die blaue LED durch eine rote LED ersetzt. Auch hier wird wieder ein Bild aufgenommen und scharfgestellt. Die Bilder sind in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 dargestellt. Für beide LED-Lichtquellen wird darüber hinaus notiert, um welche Distanz die Probe mittels Mikrometerschraube verschoben werden musste, um ein scharfes Bild zu erhalten, relativ zum von derselben Position ausgehenden unscharfen Bild. Für die blaue LED ergibt sich eine Verschiebung von $d_{\text{blau}} = (1,85 \pm 0,05) \text{ mm}$ und für die rote LED von $d_{\text{rot}} = (1,78 \pm 0,05) \text{ mm}$.

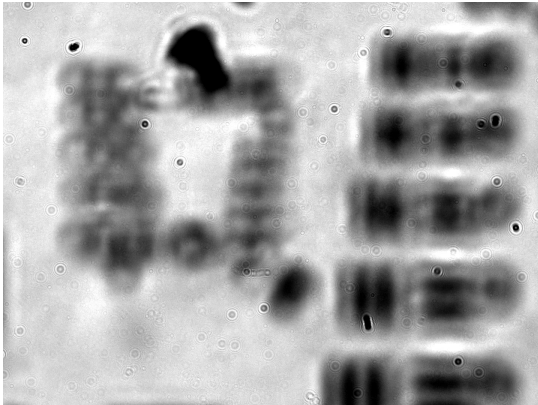


Abbildung 5.7: Unscharfes Bild bei Beleuchtung mit blauer LED

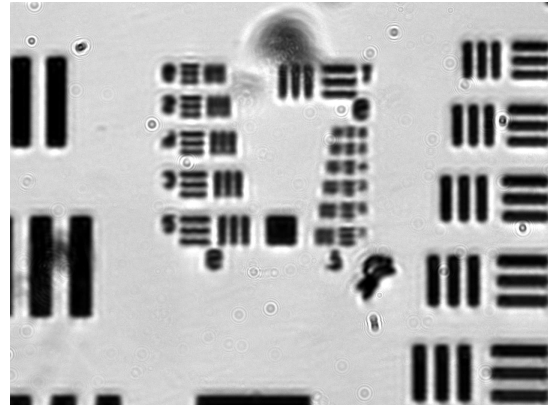


Abbildung 5.9: Unscharfes Bild bei Beleuchtung mit roter LED

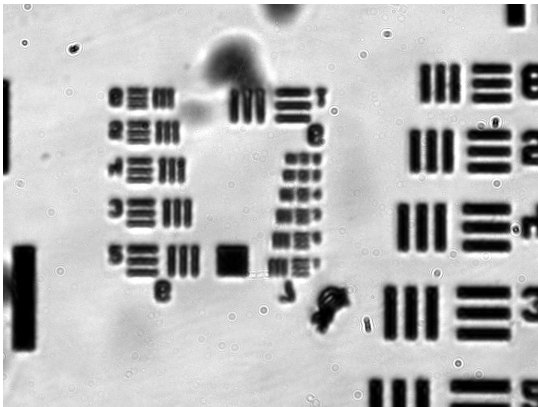


Abbildung 5.8: Scharfes Bild bei Beleuchtung mit blauer LED

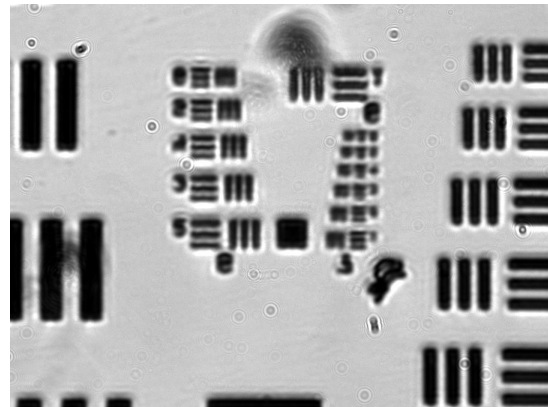


Abbildung 5.10: Scharfes Bild bei Beleuchtung mit roter LED

Als Abschluss wird noch die Gesamtvergrößerung und das Auflösungsvermögen des vorliegenden Aufbaus untersucht.

Gesamtvergrößerung. Für die experimentelle Auswertung der Gesamtvergrößerung wird zuerst ein (unvergrößertes) Referenzbild mit Abbildungsmaßstab $A = 1$ aufgenommen. Dazu wird die Linse aus dem Strahlengang entfernt, der Aufbau so konfiguriert, dass $b = g = 2f$ gilt und der Abstand zweier charakteristischer Punkte in px mit dem virtuellen Lineal der am PC laufenden Software *ThorCamTM* aus dem aufgenommenen Bild ausgemessen. Danach wird die Linse wieder eingesetzt und es entsteht ein reelles vergrößertes *verkehrtes* Bild. Derselbe Abstand wird gemessen. Die beiden Bilder und die darin eingetragenen Abstände befinden sich auf den Abbildungen 5.11 und 5.12.

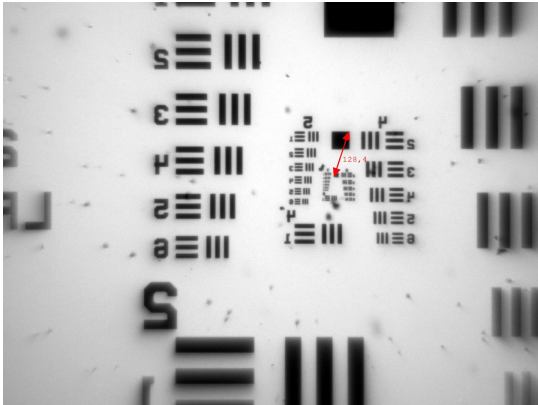


Abbildung 5.11: Referenzbild zur Bestimmung der Gesamtvergrößerung mit Abbildungsmaßstab $A = 1$. Der Abstand der beiden Eckpunkte der Quadrate ist mittels Software ausgemessen und auf dem Bild eingetragen.

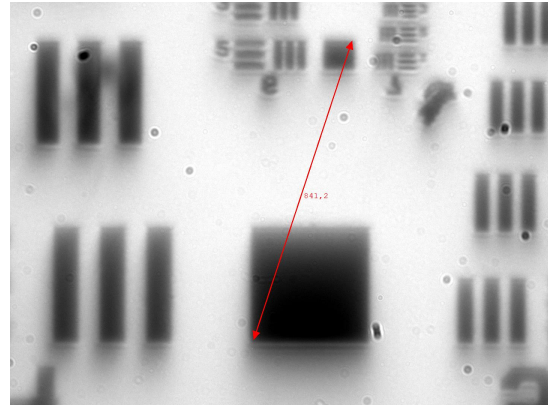


Abbildung 5.12: Vergrößertes *verkehrtes* Bild zur Bestimmung der Gesamtvergrößerung. Der Abstand der beiden Eckpunkte der Quadrate ist mittels Software ausgemessen und auf dem Bild eingetragen.

Die in den Abbildungen eingetragenen Abstände sind demnach $d_{\text{unvergrößert}} = (128 \pm 7) \text{ px}$ und $d_{\text{vergrößert}} = (84 \pm 5) \cdot 10^1 \text{ px}$. Dabei wird eine Unsicherheit von 5% angenommen, die durch das sensible Auswählen der Eckpunkte mit dem Mauszeiger begründet wird.

Auflösungsvermögen. Als Abschluss zum Teilversuch mit dem Hellfeldmikroskop wird noch das Auflösungsvermögen x_{min} , das nach Gleichung 9 gegeben ist, bestimmt. Hierzu wird jener Bereich des Probenbilds gesucht, der gerade noch scharf aufgelöst werden kann. Das dafür zur Rate gezogene Bild ist Abbildung 5.13.

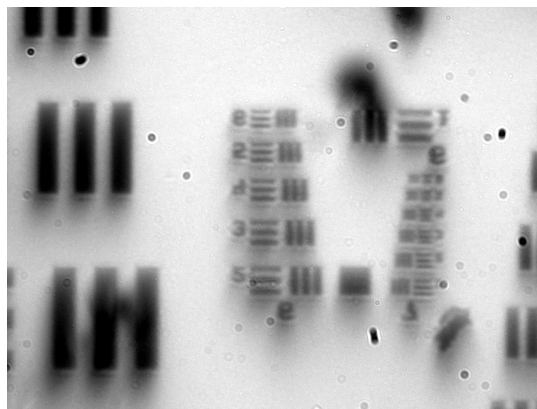


Abbildung 5.13: Testbild zur Bestimmung des Auflösungsvermögens des Hellfeldmikroskops

Die kleinste horizontal und vertikal unterscheidbare Balkengruppe (charakterisiert durch

Gruppe und Element) wird bestimmt als:

$$G = 6 \qquad E = 5,0 \pm 0,5$$

Ein halbes Element wird als Unsicherheit angenommen, da die horizontalen Balken noch deutlich kleiner unterscheidbar sind, die vertikalen jedoch bei $G = 6$ und $E = 5$ an ihre Grenzen stoßen. Die Gruppennummer ist exakt.

5.4 Dunkelfeldmikroskop

Der Versuchsaufbau wird, wie in Unterabschnitt 6.3 beschrieben, hergestellt. Der Diffusor wird aus dem Strahlengang genommen und das spezielle Objektiv mit Ringblende eingesetzt. Eine korrekte Positionierung in allen drei Freiheitsgraden ist vonnöten, um ein Bild im Dunkelfeldaufbau zu erhalten. Mit einem Blatt Papier wird entlang des Strahlengangs hinter dem Objektiv die korrekte Abdunkelung durch die Ringblende überprüft. Die optische Probe wird wieder in den Strahlengang gebracht, diesmal im Abstand von 6,2 mm zum Ausgang des Objektivs. Hinter der Probe folgen nun noch die Kombination aus achromatischer Linse ($f = 25$ mm) und beweglicher Blende. Letztere dient schließlich zum Ausblenden der ringförmigen Beleuchtung. Bei vollends geöffneter Blende fängt die Linse den Lichtring der ersten Blende ein.

Trotz langwieriger Justierung und aufwendiger Fehlerquellensuche konnte kein brauchbares Bild mit dem Dunkelfeldaufbau gewonnen werden, weswegen in Absprache mit dem Betreuer der Laborversuch an dieser Stelle abgebrochen wurde. Das beste erhaltene Bild befindet sich auf Abbildung 5.14.

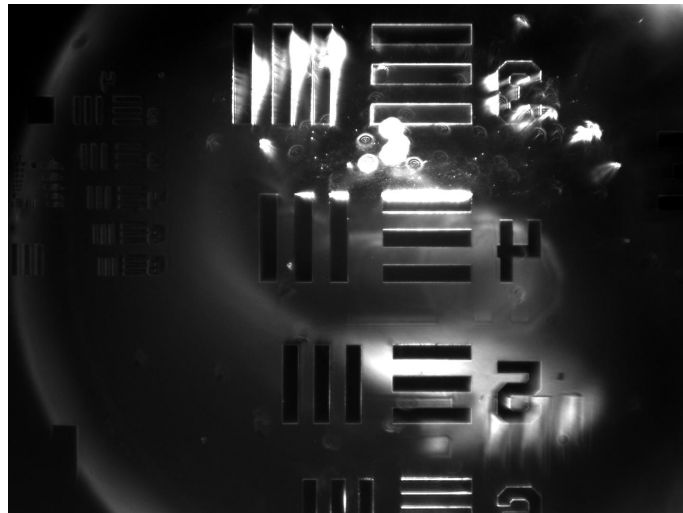


Abbildung 5.14: Bestes Bild des Teilversuchs zum Dunkelfeldmikroskop

6 Auswertung

Im Folgendem werden die einzelnen Teilversuche ausgewertet und die Ergebnisse zu den Experimenten präsentiert.

6.1 Brennweite einer Sammellinse

Wie oben beschrieben wurden zur Bestimmung der vorerst unbekannten Brennweite einer Sammellinse drei Methoden verwendet. Der Schätzwert für die unbekannte Brennweite ergibt sich mittels Lupeneffekt-Abschätzung zu:

$$f_{\text{Schätzwert}} = (20 \pm 2) \text{ mm}$$

In weiterer Folge wird Gleichung 1 – die Linsengleichung – zur Bestimmung der unbekannten Größe verwendet und es ergeben sich für die beiden Versuche die in Tabelle 6.1 angegebenen Werte.

Tabelle 6.1: Auswertung des Teilversuchs zur Bestimmung der Brennweite einer Linse mittels Linsengleichung. g bezeichnet die Gegenstandsweite, b die Bildweite, f die Brennweite, i den Laufindex der Position der Linse. Unsicherheiten: Δg , Δb , Δf .

$i / 1$	g / mm	$\Delta g / \text{mm}$	b / mm	$\Delta b / \text{mm}$	f / mm	$\Delta f / \text{mm}$
1	126	3	35	2	27,4	1,3
2	44	2	54	2	24,2	0,8

Es folgt also für die über die Linsengleichung bestimmte Brennweite $f_{\text{Linsengleichung}}$ der Mittelwert:

$$f_{\text{Linsengleichung}} = (25,8 \pm 0,8) \text{ mm}$$

Anschließend wurde noch das Bessel-Verfahren benutzt, welches analog zum gerade eben erwähnten Linsengleichungsverfahren – diesmal aber unter Benutzung von Gleichung 2 – für f_{Bessel} folgendes Ergebnis liefert:

$$f_{\text{Bessel}} = (23,3 \pm 1,2) \text{ mm}$$

6.2 Van-Leeuwenhoek-Mikroskop

Die zu bestimmenden Größen ergeben sich aus Gleichung 3 und Gleichung 4 zu:

$$\begin{aligned} f_{\text{eff-klein}} &= (1,83 \pm 0,04) \text{ mm} & f_{\text{eff-groß}} &= (4,652 \pm 0,005) \text{ mm} \\ M_{\text{klein}} &= 136 \pm 3 & M_{\text{groß}} &= 53,75 \pm 0,06 \end{aligned}$$

Dabei ist die Brechzahl des optischen Mediums Glas $n = 1,518$ und die Durchmesser sind $d_{\text{klein}} = 2,5 \text{ mm}$ und $d_{\text{groß}} = 6,35 \text{ mm}$. Die Unsicherheiten werden dabei für alle drei Größen als implizit angenommen.

6.3 Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Gesamtvergrößerung. Die theoretische Auswertung der Gesamtvergrößerung des Hellfeldmikroskopaufbaus erfolgt nach Gleichung 7. Hierzu wird zusätzlich zu den bereits bekannten Objektiv- und Okularbrennweiten noch die optische Tubuslänge t_o benötigt.

$$\begin{aligned} f_{\text{obj}} &= (35,0 \pm 0,4) \text{ mm} \\ f_{\text{oku}} &= (50,0 \pm 0,4) \text{ mm} \\ t_o &= d_{\text{obj-oku}} - f_{\text{obj}} - f_{\text{oku}} = (85 \pm 6) \text{ mm} \end{aligned}$$

Die theoretische Gesamtvergrößerung $V_{\text{MIK,th}}$ ergibt sich somit nach Gleichung 7 zu:

$$V_{\text{MIK,th}} = -12,1 \pm 0,8$$

Um diesen Wert experimentell zu ermitteln, müssen lediglich die mittels Software gemessenen Distanzen ins Verhältnis gesetzt werden.

$$V_{\text{MIK,ex}} = \frac{d_{\text{vergrößert}}}{d_{\text{unvergrößert}}} = 6,6 \pm 0,6$$

Auflösungsvermögen. Das Auflösungsvermögen berechnet sich nach Gleichung 9 über den Kehrwert der Ortsfrequenz. Diese Frequenz ergibt sich zu

$$f_r = (102 \pm 6) \text{ LP/mm},$$

wonach das Auflösungsvermögen x_{min}

$$x_{\text{min}} = (9,8 \pm 0,6) \mu\text{m}$$

beträgt.

6.4 Dunkelfeldmikroskop

Die Dunkelfeldmikroskopie erwies sich als äußerst schwierig in der Einrichtung. Dennoch konnte das in Abbildung 5.14 dargestellte Ergebnis erzielt werden.

7 Diskussion

7.1 Brennweite einer Sammellinse

Die drei unterschiedlichen Verfahren führen grundsätzlich zu ähnlichen Ergebnissen. Dennoch gibt es zwischen den Methoden Abweichungen, welche außerhalb der angegebenen Unsicherheitsbereiche liegen. Absolut gesehen ist die erste Abschätzung (mittels Lupeneffekt) zwar etwas weiter von den anderen Messwerten abgeschlagen; dies war aber erwartbar, da sich die präzise Messung – eines freihändig in den Strahlengang gehaltenen Objekts – schwierig gestaltet.

Linsengleichung und Besselfverfahren, wenn auch mit kleineren Unsicherheiten versehen, stimmen auch nicht in ihren Unsicherheitsintervallen überein. Hier liegt vermutlich abermals die Krux in der ungenauen Messmethode: Freihand mit Lineal. Bessere Ergebnisse ließen sich hierbei mit fix an der Schiene verbauten Messskalen und einer höheren Wiederholungsrate der Messungen erreichen, um eine sinnhafte statistische Auswertung umsetzen zu können.

Letztendlich bleibt die genauere Bestimmung der Brennweite mittels dieser grundsätzlich für dünne Linsen geltenden Zusammenhänge für dickere als auch plankonvexe Linsen schwierig.

7.2 Van-Leeuwenhoek-Mikroskop

Das Van-Leeuwenhoek-Mikroskop, welches zur Zeit seiner Erfindung revolutionäre Vergrößerungen ermöglichte, ist heute praktisch kaum nutzbar. Starke Abbildungsfehler, wie etwa Bildfeldwölbung der sphärischen Linsen, machen den Gebrauch sowie die Aufnahme von brauchbaren Bildern für das Laborprotokoll den mit (oft) gut funktionierten Gerätschaften verwöhnten Physikern schwer. Dennoch amüsiert das Renaissance-3D-Druck-Crossover.

7.3 Hellfeld-Transmissionsmikroskop

Die Zusammenhänge zwischen Gegenstandsweite g und Brennweite f lassen sich wie folgt zusammenfassen. Grundsätzlich lassen sich mit einer Sammellinse drei Arten von Bildern erreichen. Ist die Gegenstandsweite größer als die doppelte Brennweite ($g > 2f$), so entsteht ein reelles, verkleinertes und verkehrtes Bild. Liegt die Gegenstandsweite dagegen zwischen einfacher und doppelter Brennweite ($2f > g > f$), so ist das Bild reell, vergrößert und verkehrt. Verringert man die Gegenstandsweite bis unter die Brennweite ($f > g$), so entsteht ein virtuelles, vergrößertes und aufrechtes Bild (Lupenfall). Die Strahlen dieses „Bilds“ divergieren und werden allein im Gehirn zu einem theoretischen Gegenstand verlängert. Wenn man also im Unendlichen ein scharfes Bild erhalten möchte, so muss sich der Gegenstand genau im Brennpunkt befinden, für ein scharfes Bild in nur großer Entfernung, muss g nur leicht größer sein als f .

Dreht man die Objektivlinse um 180° , so ist das entstehende Bild ohne weitere Verschiebung unscharf. Dies hat damit zu tun, dass die Linse natürlich nicht (unendlich) dünn ist, wie in der geometrischen Optik angenommen wird, sondern eine endliche Ausdehnung (ca. (8 ± 2) mm) hat. Aufgrund dieser Dicke verschiebt sich auch der Brennpunkt beim Umdrehen der Linse und die Gegenstandsweite muss angepasst werden, um wieder ein scharfes Bild zu erhalten. Die sphärische Aberration wirkt sich dahingehend aus, dass achsenferne Strahlen stärker brechen als achsennahe, wodurch die Strahlen sich letztendlich nicht mehr in einem Punkt treffen. Die sphärische Aberration tritt jedoch bei allen Arten von Linsen auf und kann somit nur durch spezielle Kombinationen von Linsen vermieden werden.

Durch Einbringen des Diffusors in den Strahlengang wird das Licht der Halogenlampe künstlich gestreut, wodurch gewährleistet ist, dass es nicht kohärent ist. Entfernt man den Diffusor, so wird das Auflicht dagegen kohärent. Dies führt zu Interferenzen der Lichtbündel untereinander, was einen positiven Effekt auf den Kontrast hat, sich jedoch negativ auf die erhaltene Bildschärfe auswirkt.

Anschließend wurde die Halogenlampe durch LEDs der Farben Rot und Blau ersetzt. Da nun kein (annähernd) weißes Licht mehr verwendet wird, kommen zusätzlich Effekte der chromatischen Aberration ins Spiel. Die Gegenstandsweite der Probe musste beim Rotlicht um einen geringeren Versatz korrigiert werden als beim Blaulicht. Im Vergleich der beiden scharfgestellten Bilder (Abbildungen 5.8 und 5.10) wird ersichtlich, dass das Blaulichtbild eine deutlich höhere Schärfe aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass blaues Licht eine geringere Wellenlänge aufweist als rotes. Dadurch kann mit monochromatischem Blaulicht auch deutlich besser aufgelöst werden (vgl. z.B. Blu-ray Disc von Sony). Zusätzlich vermindert monochromatisches Licht die Effekte chromatischer Aberration im Vergleich zu weißem Licht, das eine hohe Anzahl verschiedener Wellenlängen aufweist, die alle unterschiedlich stark gebrochen werden.

Über alle Abbildungen hinweg fällt darüber hinaus ins Auge, dass die vertikalen Balken geringer aufgelöst werden als die horizontalen. Dies kann durch einen Astigmatismus erklärt werden, welcher durch das schiefe Einfallen der Lichtstrahlen durch die Komponenten hervorgerufen wird. Dieser Effekt lässt sich jedoch schwer vermeiden, da beim vorliegenden Aufbau nicht überprüft werden kann, ob sich die Linsen gerade in ihrer Halterung befinden, oder etwa verdreht sind.

Vergleicht man die in Unterabschnitt 6.3 ermittelten Gesamtvergrößerungen, einmal durch theoretische Deduktion, einmal durch experimentelle Messung erhalten, so decken sich diese keineswegs. Der Unterschied im Vorzeichen ist dadurch begründet, dass in Gleichung 7 die Orientierung des erhaltenen Bilds berücksichtigt wird, wohingegen beim bloßen ins Verhältnis setzen die Orientierung nicht beachtet wurde. Das vergrößerte Bild steht jedoch in beiden Fällen auf dem Kopf.

TODO

Das in Unterabschnitt 6.3 berechnete Auflösungsvermögen wirkt plausibel, kann jedoch nicht weiter überprüft oder mit Literaturwerten verglichen werden.

7.4 Dunkelfeldmikroskop

Die Dunkelfeldmikroskopie gestaltet sich äußerst schwierig, vor allem die Ausrichtung des Strahls, welche für die Abbildung entscheidend ist. Selbst nach mehrmaligem Aufbau und mehrmaliger sorgfältiger Einrichtung der Bauteile waren starke Lichthöfe im Bild vorhanden. Es gelang jedoch trotzdem zumindest eine Zahl und Teile eines Gittermusters abzubilden. Gründe neben dem extrem empfindlichen Strahlengang für ein Scheitern eines besseren Abbilds könnten unter anderem auch Verunreinigungen auf der Probe sein (auch schon bei der Hellfeld-Transmissionsmikroskopie zu beobachten), welche das Licht zusätzlich ungünstig streuen.

8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Laborversuch wurden praktische Erfahrungen im Bereich optischer Mikroskopie gesammelt.

Zu Beginn wurde die Brennweite einer Sammellinse auf drei verschiedenen Arten bestimmt. Die Ergebnisse dieser Analysen seien noch einmal in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der Ermittlung der Brennweite einer Sammellinse auf drei verschiedene Arten.

Art	f / mm	Δf / mm
Lupeneffekt	20	2
Linsengleichung	25,8	0,8
Bessel-Verfahren	23,3	1,2

Anschließend reisten die Experimentierenden in die Spät-Renaissance und bildeten Fasern und Kugelschreiberspitzen durch ein Van-Leeuwenhoek-Mikroskop ab. Das Mikroskop hatte zwei unterschiedlich große Linsen, deren Brennweiten und Vergrößerungen anschließend eruiert wurden. Diese Ergebnisse seien noch einmal in Tabelle 8.2 zusammengefasst.

Tabelle 8.2: Zusammenfassung der Daten der beiden Linsen des Van-Leeuwenhoek-Mikroskops. f_{eff} beschreibt die effektive Brennweite der Linse, M deren Lupenvergrößerung. Die Unsicherheiten haben ein Präfix Δ .

Linse	f_{eff} / mm	Δf_{eff} / mm	M / 1	ΔM / 1
klein	1,83	0,04	136	3
groß	4,652	0,005	53,75	0,06

Den zweiten großen Teil bildete der Aufbau eines Hell- und eines Dunkelfeldmikroskops. Bei der Hellfeldmikroskopie wurden die Auswirkungen der Orientierung einer plankonvexen Linse, die Kohärenz und die Farbe des verwendeten Auflichts sowie die Auswirkungen diverser Abbildungsfehler untersucht. Darüberhinaus wurden zusätzliche Parameter, wie etwa die Gesamtvergrößerung, die sich (über theoretische und praktische Werte gemittelt) zu

$$V_{\text{MIK}} = \mathbf{TODO}$$

ergab, sowie das Auflösungsvermögen

$$x_{\text{min}} = (9,8 \pm 0,6) \mu\text{m}$$

bestimmt. Der Aufbau des Dunkelfeldmikroskops erwies sich als kaum funktionstüchtig.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Banzer. Microscopy Advanced Lab v1.03. Website. 2022. URL: https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/2043233/mod_resource/content/5/Microscopy_Advanced_Lab_v1k03.pdf.
- [2] E. O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Website. o. D. URL: <https://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [3] R. Dämon u. a. „Einführung in die physikalischen Messmethoden“. In: Bd. 7. 2021.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Strahlengang einer Sammellinse	4
2.2	Aufbau eines Van-Leeuwenhoek-Mikroskops	5
2.3	Aufbau eines Hellfeld-Transmissionsmikroskops	7
2.4	Aufbau eines Dunkelfeldmikroskops	9
3.1	Aufbau Brennweite Sammellinse	10
3.2	Aufbau eines Hellfeld-Transmissionsmikroskops	11
3.3	Aufbau eines Dunkelfeldmikroskops	12
5.1	Kugelschreiberspitze durch Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	15
5.2	Blatt Papier durch Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	15
5.3	Hellfeld Orientierung und sphärische Aberration	16
5.4	Hellfeld Orientierung und sphärische Aberration gedreht unscharf	16
5.5	Hellfeld Orientierung und sphärische Aberration gedreht scharf	16
5.6	Hellfeld Kohärenz	17
5.7	Hellfeld LED blau unscharf	18
5.8	Hellfeld LED blau scharf	18
5.9	Hellfeld LED rot unscharf	18
5.10	Hellfeld LED rot scharf	18
5.11	Hellfeld Gesamtvergrößerung Referenz	19
5.12	Hellfeld Gesamtvergrößerung vergrößert	19
5.13	Hellfeld Auflösungsvermögen	19
5.14	Dunkelfeld	20

Tabellenverzeichnis

4.1	Geräteliste	13
5.1	Messergebnisse Brennweite Linsengleichung	14
5.2	Messergebnisse Brennweite Bessel	14
6.1	Auswertung Brennweite Linsengleichung	21
8.1	Zusammenfassung Brennweiten	25
8.2	Zusammenfassung Van-Leeuwenhoek-Mikroskop	25