

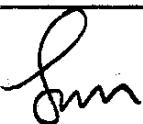
**Fakultät für Physik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München**

**Fortgeschrittenenpraktikum I in Experimentalphysik - Kurs P3A**

**Blockpraktikum vom 01. bis 31. März 2021**

Name:	Yundong Sun	Gruppe:	14
-------	-------------	---------	----

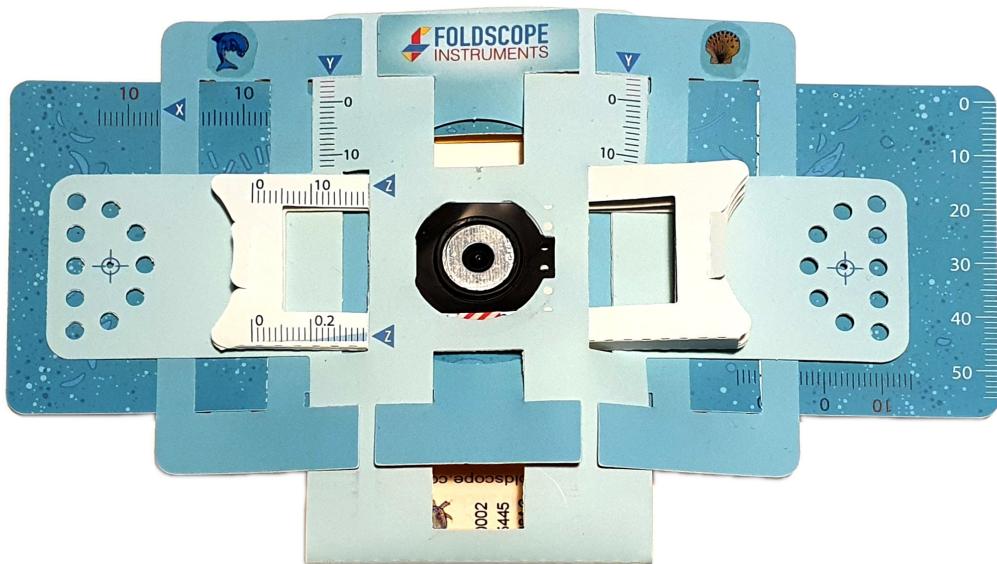
Datum	Versuch	Punkte	Testat
12 MAR 2021	1 Mikroskopie@Home Mikroskopie mit dem Foldscope		
10 MAR 2021	2 BEU - Beugung		
2 MAR 2021	3 LAS - Lasersicherheit		
	4A INP - Interferenzphänomene		
	4B MIN - Michelson-Interferometer		
	4D FPI - Fabry-Pérot-Interferometer		
4 MAR 2021	4E MZI - Mach-Zehnder-Interferometer		
	5B LLA - c-Messung/Lambertscher Strahler		
	5C POL - Polarisation		
	5D SPG - Spektrogoniometer		
8 MAR 2021	5E FFR - Fresnelsches Gesetz der Reflexion		

Unterschrift der/des Studierenden:	
------------------------------------	---

[Mikroskopie@Home]  
Mikroskopie mit dem Foldscope  
Laborbericht

Yudong Sun  
Gruppe I4  
In Zusammenarbeit mit Schramm [Gruppe J4]

17. März 2021



*Individualisiertes Foldscope*

Dieser Laborbericht (Lab Report) enthält alle zwei Teile einer Versuchsabgabe (Laborprotokoll und Auswertung). Da keine Stichwörter zur Vorbereitung in der Versuchsanleitung gibt, gibt es in dieser Abgabe auch keinen Vorbereitungsteil.

Das Experiment war mit Schramm der Gruppe J4 zusammen durchgeführt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Teilversuch 1: Aufbau des Foldscopes</b>	<b>4</b>
1.1 Linsengleichung für eine biconvexe Linse . . . . .	4
1.2 Fotoprotokoll des Aufbaus . . . . .	5
<b>2 Teilversuch 2: Mikroskopieren mit dem Foldscope</b>	<b>7</b>
2.1 Durchführung . . . . .	7
2.2 Untersuchte Proben . . . . .	8
<b>3 Teilversuch 3: Bestimmung der Vergrößerung des Foldscopes</b>	<b>10</b>
3.1 Überlegungen . . . . .	10
3.2 Durchführung . . . . .	11
3.3 Auswertung . . . . .	14
3.4 Diskussion . . . . .	17
3.5 Unterschied mit klassischen Mikroskopen . . . . .	18
<b>4 Videoaufzeichnung</b>	<b>18</b>
<b>A Anleitung zur Foldscope</b>	<b>19</b>

## Literatur

- KLING, Matthias; YAKOVLEV, Vladislav, [o. D.]. 9.6 Dicke Linse und Hauptebenen. In: *Skript zur E3: Elektromagnetische Wellen und Optik onlineS*. 97 [besucht am 2021-03-15].
- SALEH, Bahaa E. A; TEICH, Malvin Carl, 2019. 1.4 Matrix Optics. In: *Fundamentals of photonics*. Hoboken: Wiley, S. 31–32. ISBN 978-1-119-50687-4. OCLC: 1126641333.
- STARR, Cecie, 2006. *Biology : concepts and applications* onlineunter Mitarb. von INTERNET ARCHIVE. Belmont, CA : Thomson, Brooks/Cole [besucht am 2021-03-16]. ISBN 978-0-534-46226-0. Abger. unter: <http://archive.org/details/biologyconceptsa06edstar>.

## Teilversuch 1: Aufbau des Foldscopes

Versuchsziel	Aufbau des Foldscopes
Messmethode	Augenmaß

### Linsengleichung für eine biconvexe Linse

Für eine Linse mit brechenden Kugelflächen gilt die allgemeine Linsenschleiferformel [Kling u. a., (o. D.)]:

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_L}{n_M} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{\left( \frac{n_L}{n_M} - 1 \right) d}{\frac{n_L}{n_M} R_1 R_2} \right) \quad (1.1)$$

mit	$f$ Effektive Brennweite der Linse vom Zentrum $n_L$ Brechungsindex vom der Linse $n_M$ Brechungsindex von das umgebende Medium $R_1$ Krümmungsradius der Eintrittsfläche (mit Vorzeichen) $R_2$ Krümmungsradius der Austrittsfläche (mit Vorzeichen) $d$ Dicke der Linse
-----	--

Für eine biconvexe Linse ist  $R_1 > 0$  und  $R_2 < 0$ . Da wir die Linse nur im Luft verwenden, ist  $n_M \approx 1$ , wie wir im Versuch MZI bestätigt haben. Schreibe  $\frac{n_L}{n_M}$  als  $n$ , dann erhalten wir:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1) d}{n R_1 R_2} \right) \quad (1.2)$$

Wir verwenden in diesem Versuch eine Kugellinse, somit ist  $|R_1| = |R_2| = R$  und  $d = 2R$ . Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= (n - 1) \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R} - \frac{(n - 1)(2R)}{n R^2} \right) \\ &= (n - 1) \left( \frac{2}{R} - \frac{(2n - 2)R}{n R^2} \right) \\ &= (n - 1) \left( \frac{2n - (2n - 2)R}{n R^2} \right) \\ &= \frac{2(n - 1)}{n R} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Daraus ergibt sich die effektive Brennweite:

$$f = \frac{nR}{2(n - 1)} = \frac{nD}{4(n - 1)} \quad (1.4)$$

wobei  $D$  der Durchmesser ist.

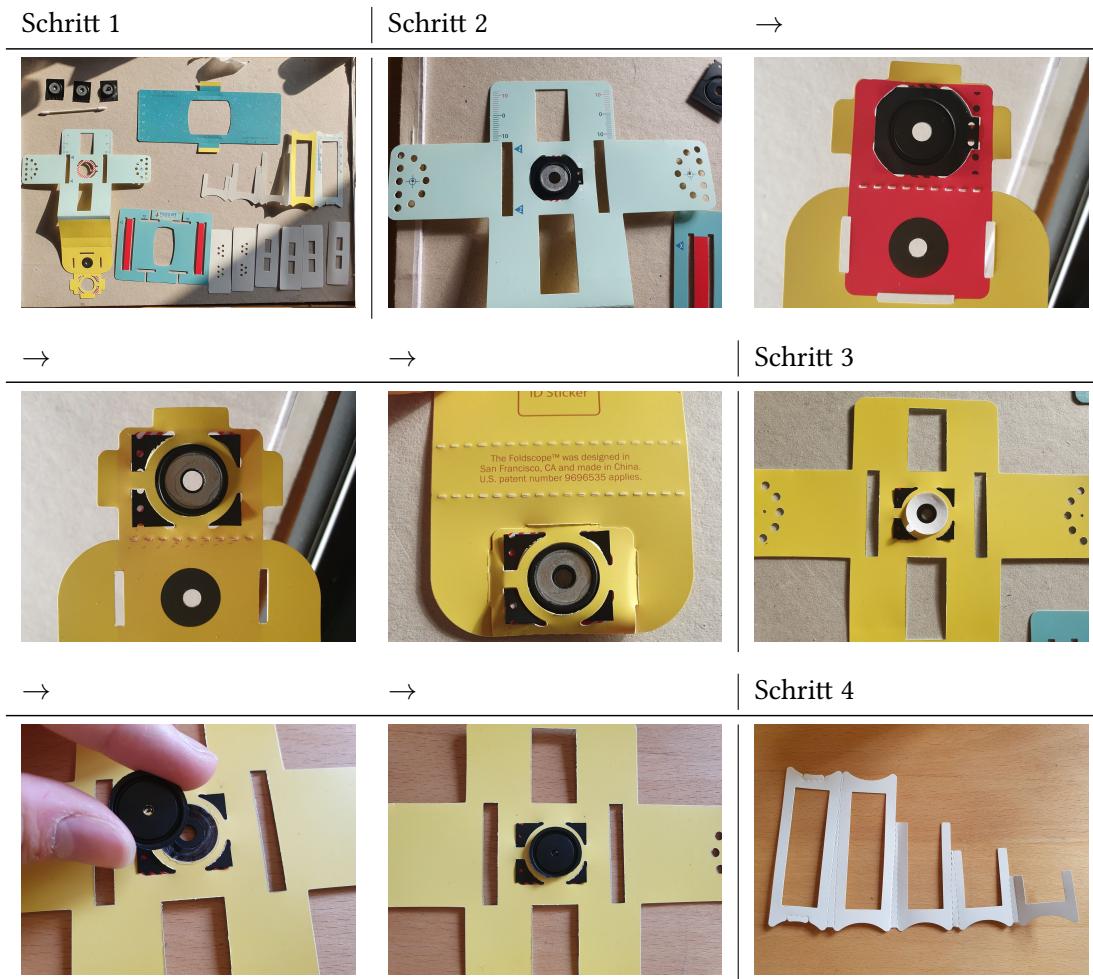
Es gilt außerdem unter der paraxiellen Näherung die Gleichung:

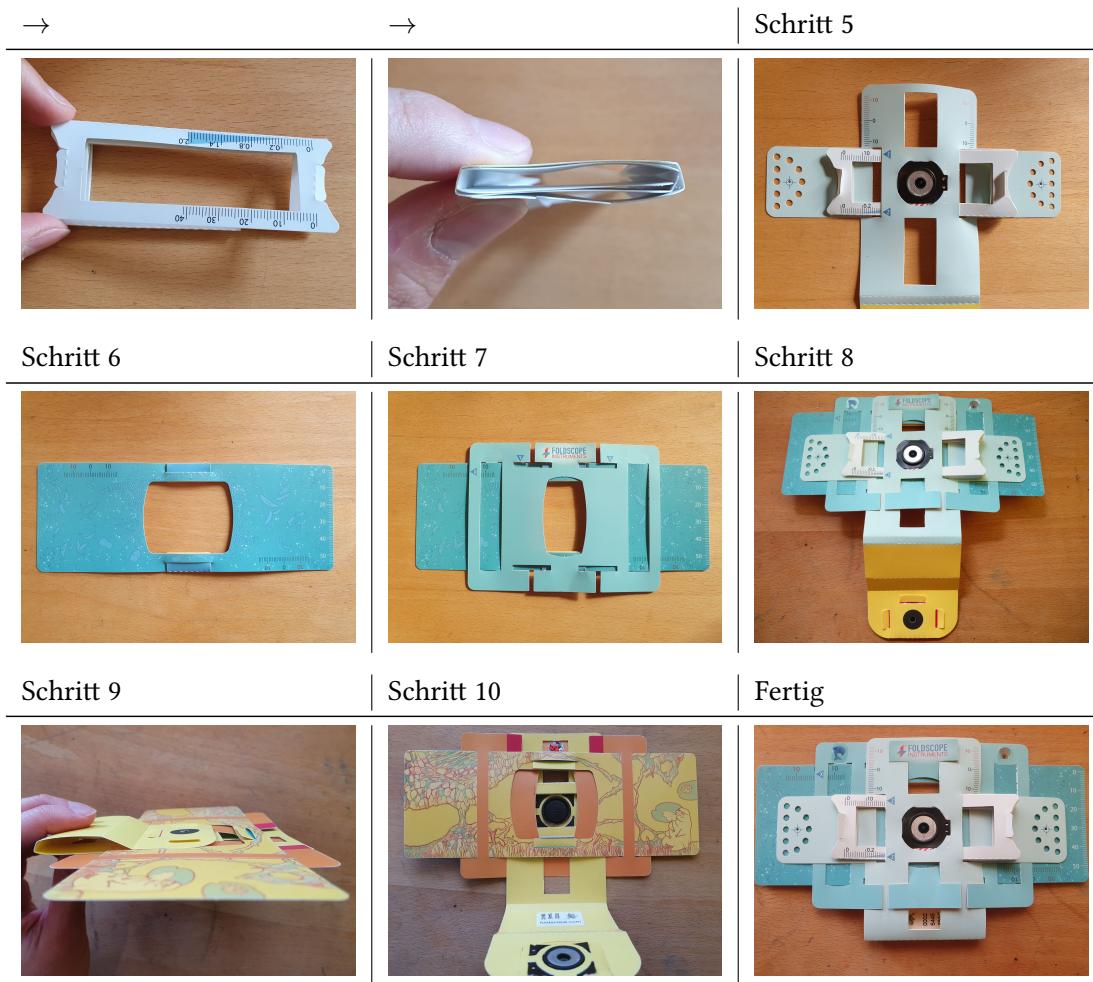
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (1.5)$$

mit  $f$  Effektive Brennweite der Linse vom Zentrum  
 $g$  Gegenstandsweite  
 $b$  Bildweite

### Fotoprotokoll des Aufbaus

Anhand der beiliegenden Anleitung (Siehe Anhang A) wurde das Foldscope aufgebaut. Die hier dokumentierte Schritte entsprechen den Schritten in der Anleitung.





Im Schritt 10 („Foldscope individualisieren“) haben wir zusätzlich mit Aufkleber unsere Foldscopes verziert. Mein fertiges Foldscope sieht dann so aus:



Abbildung 1.1: Foldscope 0002 5445 38AC

## Teilversuch 2: Mikroskopieren mit dem Foldscope

Versuchsziel	Aufbau des Foldscopes
Messmethode	Qualitative Beobachtungen

### Durchführung

Um die Proben für die Untersuchung mit dem Foldscope vorzubereiten wurden die Präparate nach der Anleitung (Siehe Anhang A) Schritt a) vorbereitet. Für die flüssige Proben wurden die Kunststoffobjektträger mit den kleinen Löchern verwendet und die anderen Proben die Kunststoffobjektträger mit den rechteckigen Löchern.

Die Löcher der Kunststoffobjektträger wurden erst mit Klebeband bzw. der vorliegenden Deckglasauflkleber überklebt (klebrige Seite zum Loch). Die Deckglasauflkleber wurden überall verwendet, wo die Durchsichtigkeit wichtig war, da das Klebeband oft beim Abrollen weiße Linien und Fingerabdrücke sammelt.

Die Proben wurden dann auf der klebrigen Öffnung platziert. Das erfolgte entweder mit einer Pinzette (feste Probe) oder einer Kunststoffpipette (flüssige Probe). Ein weiteres Klebeband bzw. Deckglasauflkleber wurde dann überklebt, sodass die Löcher verschlossen waren.



(a) Pollen als Probe

(b) Platzierung im Foldscope

(c) Bereit für die Untersuchung

Abbildung 2.1: Vorbereitung der Präparate für die Untersuchung

Die Präparate wurden dann entsprechend beschriftet, bevor sie in dem Foldscope platziert wurden. Es wurde auch zwei leere Kunststoffobjektträger hinter dem Präparat (vom Perspektiv des Auges) im Foldscope platziert, um das Bild besser scharf stellen zu können.

Nach der qualitativen Untersuchung mit dem Augen wurden noch zusätzliche Bilder mit dem Smartphone gemacht. Die im Versuch verwendete Smartphones sind:

- OnePlus 2 (ONE A2003)
- Samsung Galaxy S10e (SM-G970F)

Im Fall des Samsung Galaxy S10e wurde nur die 12MP, f/1.5-2.4, 26 mm Kamera<sup>1</sup> verwendet. Die Ultrawide-Kamera wurde wegen Fokusprobleme nicht verwendet. Der dritten Ma-

<sup>1</sup>[https://www.gsmarena.com/samsung\\_galaxy\\_s10e-9537.php](https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_s10e-9537.php)

gnetkoppler wurde im beiden Fällen auf der Kamera mit Klebeband geklebt, sodass die Kamera gut mit dem Folscope ausgerichtet ist.



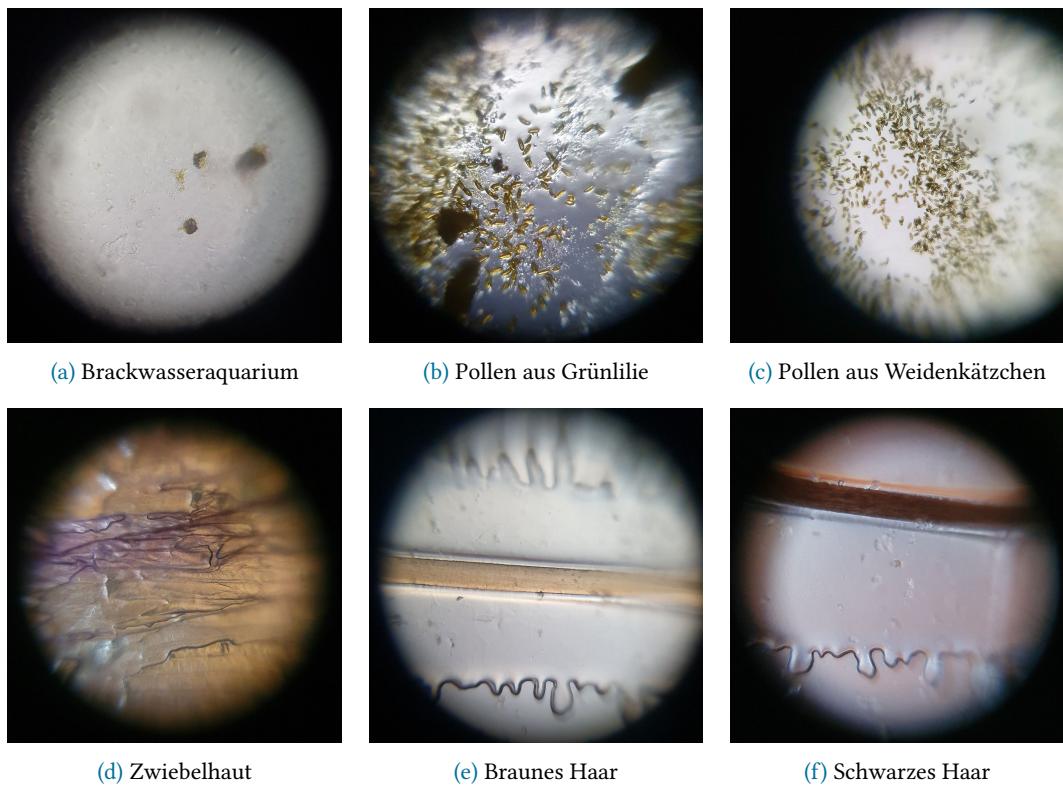
(a) Magnetkoppler auf der Kamera geklebt

(b) Smartphone gekoppelt mit dem Foldscope

**Abbildung 2.2:** Fotografieren der Proben mit dem Smartphone

Es ist zu bemerken, dass der Fokusteil der Kamera des Samsung Galaxy S10e nur im Nahfeld funktioniert, wenn der Magnetkoppler aufgeklebt war.

### Untersuchte Proben



(a) Brackwasseraquarium

(b) Pollen aus Grünlilie

(c) Pollen aus Weidenkätzchen

(d) Zwiebelhaut

(e) Braunes Haar

(f) Schwarzes Haar

**Abbildung 2.3:** Die mit dem Foldscope untersuchten Proben

Man sieht hier, dass es stärkere sphärische Abberationen gibt. Man kriegt infolgedessen nie das ganze Bild im Fokus.

Abbildung 2.3a Es ist hier grüne Flecken zu sehen, was vermutlich Algen sind.

Abbildung 2.3b und 2.3c Die Pollen aus Grünlilie und Weidenkätzchen haben sehr ähnliche Strukturen, was ich nicht erwartet habe. Da das Foldscope eine feste Vergrößerung hat, kann man auch beobachten, dass die Pollen aus Weidenkätzchen ein bisschen kleiner ist als die aus der Grünlilie.

Abbildung 2.3d Wir haben versucht, mit einer verwässerten Lösung von Betaisodona Salbe (10% Povidon-Iod) die Zwiebelhaut zu färben, aber das war leider nicht erfolgreich. Die Zwiebelhaut bleibt dieselbe Farbe als vor der Färbung.

Man sieht hier aber trotzdem Strukturen, die die Zwiebelzellen entspricht.

Abbildung 2.3e und 2.3f Die Haare sehen strukturell sehr ähnlich aus. In beiden Fällen sind die Haare heller als was man im Alltag wahrnimmt.

Wir haben im Versuch auch Wasser aus einer Regentonne und verwässerten Joghurt untersucht. Es ist aber im Foldskop nichts zu erkennen. Die Vergrößerung war wahrscheinlich nicht genug, um die Mikroorganismen sichtbar zu machen.

Es ist hier auch zu bemerken, dass die Fokussierung besser erfolgt, wenn man zusätzlich zur Steuerung des Fokussteils auch mit dem Finger auf dem Präparat von hinten drückt. Wenn man das Präparat während der Untersuchen verschieben will, soll man mit der Daumen auf der kleinen Löcher der linken und rechten Seite des Linsenhalters das Foldscope halten, bevor man den Linsenhalter und den Probenhalter gegeneinander verschiebt.

## Teilversuch 3: Bestimmung der Vergrößerung des Foldscopes

Versuchsziel	Bestimmung der Vergrößerung des Foldscopes
Messmethode	Samsung Galaxy S10e (SM-G970F) mit der $f/1.5\text{--}2.4$ , 26 mm Kamera, GIMP

### Überlegungen

Es ist leider nicht möglich, genaue Messungen mit der Augen durchzuführen, also müssen wir ein Analogon zu den Augen herausfinden. Ein natürliches Analogon wäre eine Smartphone Kamera, besonders wenn wir schon ein Montiermechanismus mit der dritten Magnetkoppler haben.

Ähnlichkeiten	Es ist ein reelles Bild auf einem Sensor (Netzhaut vs. CCD) abgebildet. Der Brennpunkt kann variiert werden, um auf Gegenständen in unterschiedlicher Entfernung zu fokussieren.
Unterscheidung	Der Mechanismus, mit dem man die Brennweite ändert.

Im menschlichen Auge ist die Linse mit Muskeln verformt, um das Bild auf dem Netzhaut im Fokus zu bringen.

Da die Kamera offensichtlich keine Linsen verformen können, ist das Mechanismus normalerweise eine(ein) bewegliche(s) Linse(n)system). Jedes optische System lässt sich als eine dünne Linse mit zwei Hauptebenen (und zusätzliche Translation) dargestellt werden, also kann man die Kamera problemlos als eine Linse betrachten [Saleh u. a., 2019].

Wir wissen aber nicht, ob die Hauptebene der Kamera sich während der Fokussierung so verschiebt, dass die Gegenstandsweite zu groß verändert oder wie groß die mögliche Translation ist, wenn man das optisches System als eine dünne Linse betrachtet. Wenn solche Probleme nicht vernachlässigt werden kann, dann ist die Kamera keinen guten Ersatz für das Auge.

Nach einer schnellen Suche findet man aber aus der iFixit Seite der Samsung Galaxy S10e<sup>2</sup> ein Foto vom Kameramodul des Smartphones (Abbildung 3.1)

Das Kameramodul ist also nicht größer als einige Millimeter.

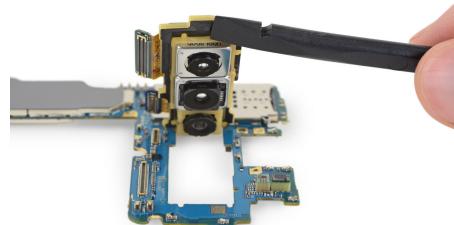


Abbildung 3.1: Kameramodul des Samsung Galaxy S10, das ähnliche Kameramodule wie das Samsung Galaxy S10e verwendet. Bild aus [ifixit.com](https://www.ifixit.com/Teardown/Samsung+Galaxy+S10+and+S10e+Teardown/120331).

<sup>2</sup><https://www.ifixit.com/Teardown/Samsung+Galaxy+S10+and+S10e+Teardown/120331>

Wir vermuten somit, dass die Verschiebung der Hauptebene ebenfalls von einigen Millimeter begrenzt ist und deswegen im unseren Versuch keine große Rolle spielt. Wir müssen bei der Bestimmung der Gegenstandsweite sowieso schon mit einem Fehler von mindestens  $\pm 1$  mm rechnen.

Eine Smartphonekamera ist somit eine gute Annäherung für das menschliche Auge.

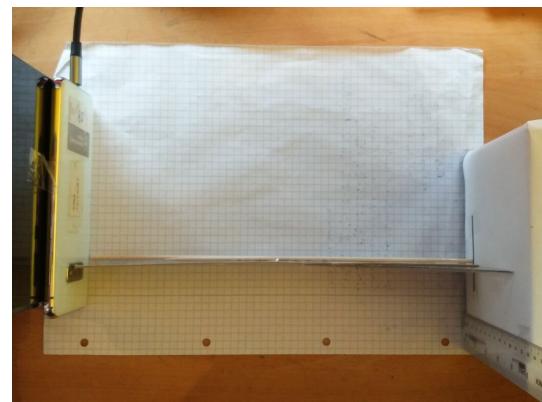
## Durchführung

Um die Vergrößerung zu bestimmen ist die Breite einer Bleistiftmine als Maßstab verwendet, da diese im Sichtfeld des Foldscopes gut passt. Diese Bleistiftmine ist eine 0,5 mm 2B Polymer Bleistiftmine, die von der *Pilot Corporation* hergestellt ist.

### Bloße Augen



(a) Ansicht von Vorne



(b) Ansicht von Oben

Abbildung 3.2: Aufbau für bloße Augen

Für die bloße Augen wurden zwei Lautsprecherboxen als Befestigungsfläche verwendet. Die Rechtwinkligkeit dieser Oberflächen wurde mit einem Geodreieck überprüft. Um den Abstand zwischen der beiden Lautsprecherboxen einzustellen, wurde ein Maßstab der Länge  $(25,0 \pm 0,1)$  cm (deutliche Schweife) aus Pappe gebastelt. Der Pappmaßstab wurde zusätzlich quer mit Holzspieße unterstützt, sodass er nicht biegen konnte.

Ein Blatt Papier wurde dann auf der rechten Lautsprecherbox geklebt. Dieses dient als weißes Hintergrund für das Foto. Die Bleistiftmine und das Handy wurden dann auf der entsprechenden Oberfläche mit Klebeband auf der gleichen Höhe (Kamera  $\leftrightarrow$  Bleistiftmine) geklebt.

Zur Justierung wurde ein DIN A4 kariertes Papier auf dem Tisch mit Klebepads befestigt. Die beiden Lautsprecherboxen wurden dann mithilfe des Gitters und des Pappmaßstabs wie in Abbildung 3.2 justiert.

Sodass man trotz des gedeckten Handybildschirm Fotos machen konnte, ist das Handy mit

einem USB-C - HDMI Kabel zu einem externen Monitor verbunden. Die Kamera-App wurde dann durch Samsung DeX<sup>3</sup> aufgerufen.

Alle Bilder wurden mit der Hauptkamera ( $f/1.5\text{--}2.4$ , 26 mm) gemacht. Die Bilder haben eine Auflösung von  $4032 \text{ px} \times 3024 \text{ px}$  und einen Zoom-Faktor von  $1,0\times$ .

Als Messdaten haben wir das Bild:



Abbildung 3.3: Augensicht, Bild zur Auswertung, komprimiert

### Foldscope

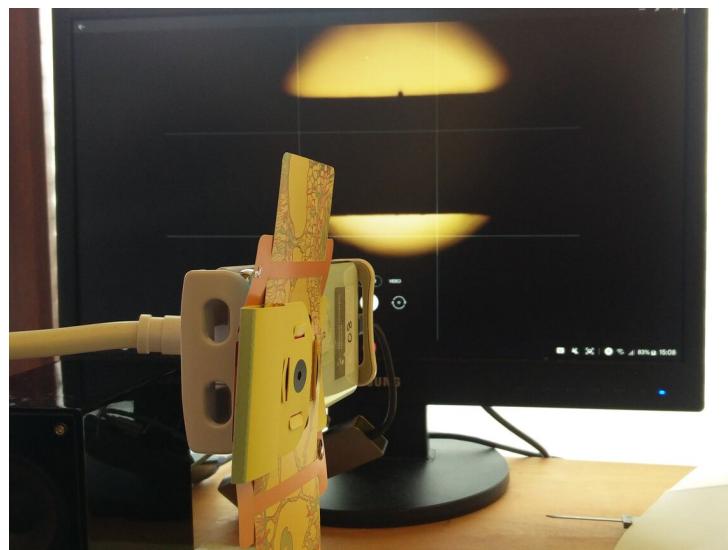


Abbildung 3.4: Aufbau fürs Foldscope

<sup>3</sup><https://www.samsung.com/de/apps/samsung-dex/>

Für die Sicht aus dem Foldscope wurde der dritte Magnetkoppler auf dem Handy mit Klebeband geklebt. Die Vorbereitung der Präparate erfolgt wie im Teilversuch 2. Um das Bild konstant zu halten wurde das Handy mit dem Foldscope auf einem Handyhalter befestigt.

Das Foldscope wurde dann so rotiert, dass die Bleistiftmine horizontal im Bild steht. Mit dem Fokusteil des Foldscopes wurde das Kamera auf dem Zentrum vom Bild fokussiert. Das Foto wurde wieder durch die Kamera-App im Samsung DeX aufgenommen, um alle Faktoren konstant zu halten.

Als Messdaten haben wir das Bild:

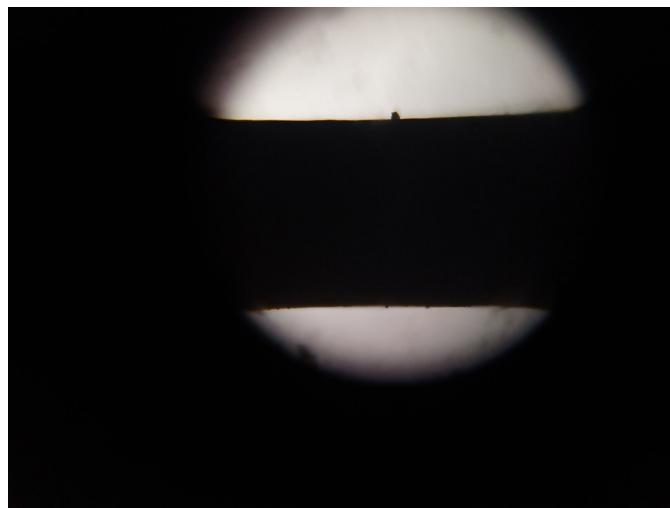


Abbildung 3.5: Sicht aus dem Foldscope, Bild zur Auswertung, komprimiert

## Auswertung

Um die relative Bildhöhe zwischen Abbildung 3.3 und Abbildung 3.5 zu bestimmen haben wir das Programm GIMP 2.10.22<sup>4</sup> verwendet.

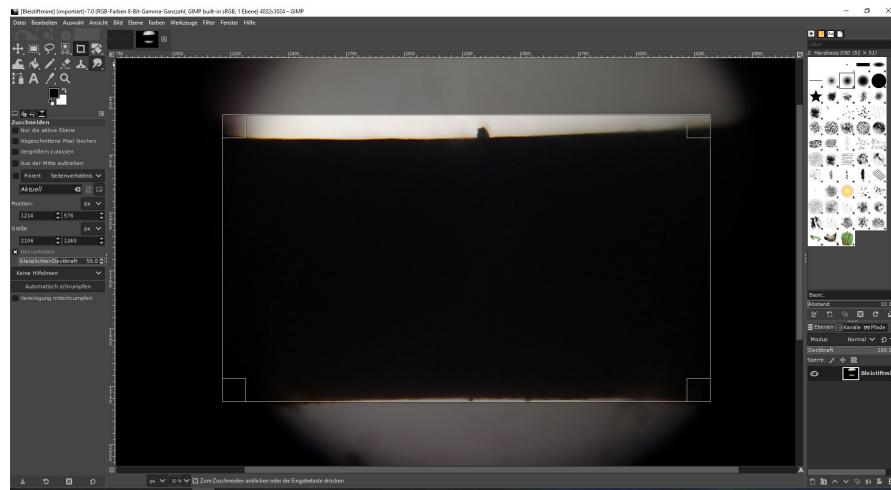


Abbildung 3.6: Grobe Zuschneiden von Bildern im GIMP

Es wurde immer den Teil der Bleistiftmine ausgeschnitten. Die resultierende Anzahl der vertikalen Pixels ist dann die Bildhöhe. Zur Fehlerbestimmung haben wir bei der Gradient am Rand der Bleistiftmine eine obere und untere Grenze abgeschätzt. Wo nötig haben wir das Bild so gedreht, dass die Bleistiftmine im Bild horizontal steht.

Als Messwerten haben wir:

Sicht	Max / px	Min / px	Bildhöhe / px
Bloße Augen $B_e$	8	6	$7 \pm 1$
Foldscope $B_f$	1128	1108	$1118 \pm 10$

Aus der Anleitung ist die Vergrößerung (und deren Fehler) gegeben durch:

$$\Gamma = \frac{B_f}{B_e} = \frac{1118 \text{ px}}{7 \text{ px}} = 159,714 \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Gamma &= \gamma \sqrt{\left(\frac{\Delta B_f}{B_f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_e}{B_e}\right)^2} = \left(\frac{1118}{7}\right) \sqrt{\left(\frac{1}{7}\right)^2 + \left(\frac{10}{1118}\right)^2} \\ &= 23 \quad (2 \text{ sig. Zif.}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Somit erhalten wir als experimentelle Wert eine Vergrößerung von  $\Gamma_{\text{exp}} = 160 \pm 23$ .

<sup>4</sup><https://www.gimp.org/>

Die theoretische Vergrößerung (und deren Fehler) ist laut der Anleitung gegeben durch:

$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{l}{f} \stackrel{(1.4)}{=} l \left( \frac{4(n-1)}{nD} \right) = \frac{4l(n-1)}{nD} \\ &= \frac{4l}{D} \left( \frac{n-1}{n} \right) = \frac{4l}{D} \left( 1 - \frac{1}{n} \right)\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\Delta\Gamma = \sqrt{\left( \frac{\partial\Gamma}{\partial l} \Delta l \right)^2 + \left( \frac{\partial\Gamma}{\partial n} \Delta n \right)^2} \quad (3.4)$$

da  $D$  ohne Fehler gegeben ist.

Mit

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial l} = \frac{4}{D} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \quad \frac{\partial\Gamma}{\partial n} = \frac{4l}{Dn^2} \quad (3.5)$$

ist der Fehler  $\Delta\Gamma$  gegeben durch:

$$\Delta\Gamma = \frac{4l}{D} \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{n} \right)^2 \left( \frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\Delta n}{n^2} \right)^2} \quad (3.6)$$

Mit  $n = \frac{n_L}{n_M}$  ist

$$\Delta n = \frac{n_L}{n_M} \sqrt{\left( \frac{\Delta n_L}{n_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta n_M}{n_M} \right)^2} \quad (3.7)$$

Der sichtbare Bereich der menschlichen Augen ist zwischen 380 nm und 750 nm [Starr, 2006]. In diesem Bereich ist der Brechungsindex von Luft  $n_M = 1,0003$  relativ konstant<sup>5</sup>. Man kann somit  $n_M$  als fehlerfrei betrachten. Das ist aber nicht der Fall für den Brechungsindex von Borsilikatglas (BK7 oder manchmal auch N-BK7):

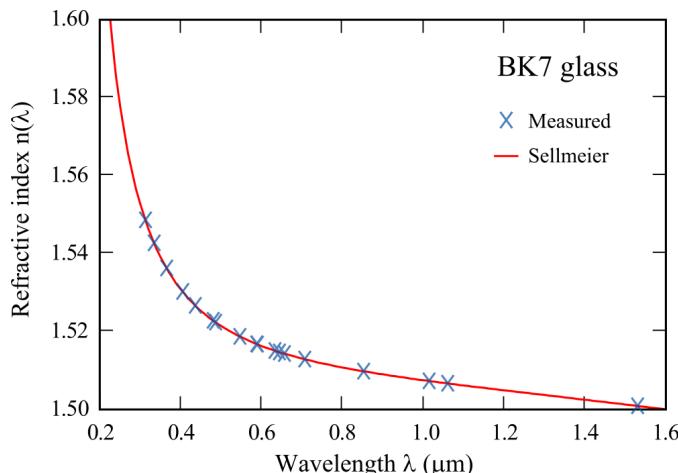


Abbildung 3.7: Brechungsindex von BK7  
(File:Sellmeier-equation.svg, Autor: Wikipedia Benutzer DrBob

<sup>5</sup><https://refractiveindex.info/?shelf=other&book=air&page=Ciddor>

Ideal wäre, wenn wir die Intensitätverteilung wissen und daraus die mittlere Brechungsindex von BK7 berechnen. Da wir aber weder den Hersteller der Linse noch die Intensitätverteilung der Lichtquelle wissen, ist der einfache Mittelwert (mit entsprechender Schwankung als Fehler) eine vernünftige Annahme hier. Der Verlauf der Brechungsindex im sichtbaren Bereich ist hier auch als eine lineare Verlauf genähert.

Wir gehen auch davon aus, dass die Temperatur keinen Einfluss hat.

Im sichtbaren Bereich hat N-BK7 von SCHOTT<sup>6</sup>:

$$\begin{aligned} n_{\max} &= 1,5337 \text{ bei } 380 \text{ nm} \\ n_{\min} &= 1,5118 \text{ bei } 750 \text{ nm} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Somit ist  $n_L$  gegeben durch

$$n_L = \frac{1,5337 + 1,5118}{2} = 1,52275 \quad (3.9)$$

$$\Delta n_L = \frac{1,5337 - 1,5118}{2} = 0,011 \quad (\text{2 sig. Zif.}) \quad (3.10)$$

Also ist  $n_L = 1,523 \pm 0,011$  und es gilt nach Gleichung (3.7):

$$\Delta n = \frac{\nu_L}{n_M} \left( \frac{\Delta n_L}{\nu_L} \right) = \frac{\Delta n_L}{n_M} \quad (3.11)$$

Die Gleichung (3.6) ist dann

$$\begin{aligned} \Delta \Gamma &= \frac{4l}{D} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n^2}\right)^2} \\ &= \frac{4l}{D} \sqrt{\left(1 - \frac{n_M}{n_L}\right)^2 \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_L}{n_M} \left(\frac{n_M}{n_L}\right)^2\right)^2} \\ &= \frac{4l}{D} \sqrt{\left(1 - \frac{n_M}{n_L}\right)^2 \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(n_M \frac{\Delta n_L}{n_L^2}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Der Fehler der Brennweite (Gleichung (1.4)), was auch gefragt wird, ist dann gegeben durch:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial n} \Delta n\right)^2} = \left| \frac{D(\Delta n)}{4} \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{n}{n-1} \right) \right| = \left| \frac{D(\Delta n)}{4} \frac{\partial}{\partial n} \left( 1 + \frac{1}{n-1} \right) \right| \\ &\stackrel{(3.11)}{=} \frac{D(\Delta n_L)}{4n_M} \frac{1}{(n-1)^2} = \frac{D(\Delta n_L)}{4n_M} \left( \frac{n_M}{n_L - n_M} \right)^2 \\ &= \frac{Dn_M(\Delta n_L)}{4(n_L - n_M)^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

<sup>6</sup><https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>

Mit der Werten

Variable	Wert	Bedeutung
$D$	2,38 mm	Durchmesser der Kugellinse
$n_M$	1,0003	Brechungsindex von Luft
$n_L$	$1,523 \pm 0,011$	Brechungsindex von BK7
$l$	$(0,250 \pm 0,001) \text{ m}$	Deutliche Sehweite (im Experiment)

ist die Vergrößerung gegeben durch:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{4l}{D} \left(1 - \frac{n_M}{n_L}\right) = \frac{4(0,250 \text{ m})}{2,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \left(1 - \frac{1,0003}{1,523}\right) \\ &= 144,203 \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Gamma &= \frac{4(0,250 \text{ m})}{2,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \\ &\times \sqrt{\left(1 - \frac{1,0003}{1,523}\right)^2 \left(\frac{0,001}{0,250}\right)^2 + \left(\frac{(1,0003)(0,011)}{(1,523)^2}\right)^2} \\ &= 2,1 \quad (2 \text{ sig. Zif.}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Somit erhalten wir  $\Gamma_{\text{theo}} = 144,2 \pm 2,1$ .

Die Brennweite ist mit der gleichen Werten gegeben durch:

$$\begin{aligned} f &= \frac{nD}{4(n-1)} = \frac{D}{4} \left(1 + \frac{n_M}{n_L - n_M}\right) \\ &= \frac{2,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{4} \left(1 + \frac{1,0003}{1,523 - 1,0003}\right) \\ &= 1,733 \text{ 66 mm} \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{Dn_M(\Delta n_L)}{4(n_L - n_M)^2} = \frac{(2,38 \cdot 10^{-3} \text{ m})(1,0003)(0,011)}{4(1,523 - 1,0003)^2} \\ &= 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \quad (2 \text{ sig. Zif.}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Somit erhalten wir  $f = (1,734 \pm 0,024) \text{ mm}$ .

## Diskussion

Als Endergebnisse erhalten wir:

Experimentell	$\Gamma_{\text{exp}}$	$160 \pm 23$
Theoretisch	$\Gamma_{\text{theo}}$	$144,2 \pm 2,1$

Die Werten stimmen also miteinander überein, da die Fehlerintervalle sich überschneiden. Es gibt aber hier wegen der Auflösung der Kamera eine große Unsicherheit bei dem experimentellen Wert.

Außerdem sehen wir – besonders im Teilversuch 2 (Abbildung 2.3) – auch zusätzlich zur sphärischen Abberationen chromatische Abberationen. Diese kann man mit der großen Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex von BK7 im sichtbaren Bereich gut erklären.

Es ist vielleicht auch interessant zu bemerken, dass die Brennweite ( $f = (1,734 \pm 0,024) \text{ mm}$ ) ungefähr die Hälfte der Höhe des Fokusteils entspricht (etwa 4 mm).

### Unterschied mit klassischen Mikroskopen

In klassischen Mikroskopen befindet sich normalerweise mindestens 2 Linsen, die ein optisches System bildet anstatt eine, die wir im Foldscope haben. Es gibt auch oft fast keine Abberationen zu beobachten, da diese durch das Linsensystem unterdrückt sind, sodass man Proben gut untersuchen kann.

Außer des optischen Systems ist die Steuerung des klassischen Mikroskops viel feiner als die des Foldscopes. Man hat auch bei gutem Mikroskopsystemen die Wahl zwischen Lichtfeld- und Dunkelfeldmikroskopie. Es gibt auch normalerweise eine Wahl zwischen verschiedenen Vergrößerungen, was man mit einem Foldscope nicht hat.

Obwohl die klassische Mikroskopen deswegen viele Vorteile haben, ist die Kosten eines klassischen Mikroskops.

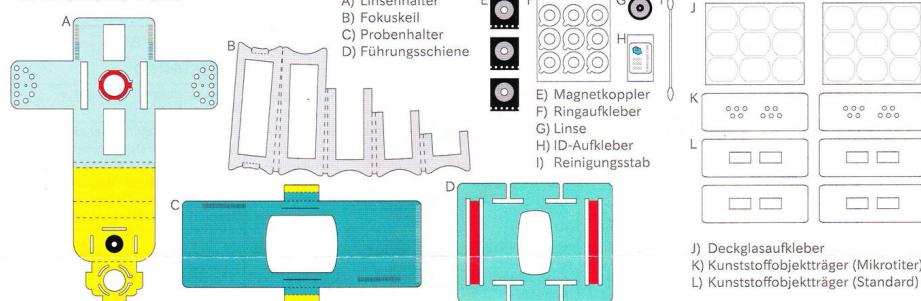
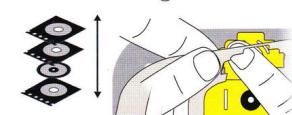
### Videoaufzeichnung

Zur Teilversuchen 1 und 2 haben wir eine Videoaufzeichnung vorbereitet. Sie ist unter *redacted* ansehbar.

**Anhang A Anleitung zur Foldscope****Anleitung Foldscope Einsteigerset****WARNHINWEISE**

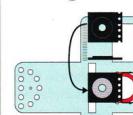
Schauen Sie mit diesem Produkt nicht in die Sonne oder andere helle Lichtquellen.  
Nicht für Kinder unter 8 Jahren geeignet. Es handelt sich nicht um Spielzeug. Kinder dürfen dieses Produkt nur unter Aufsicht einer erwachsenen Person zusammenbauen und verwenden.

Dieses Produkt enthält Kleinteile, die verschluckt oder eingeatmet werden können. Diese Teile dürfen nicht in den Mund genommen oder verschluckt werden. Kleine Magnete können im Verdauungstrakt zusammenkleben und Gesundheitsschäden verursachen. Suchen Sie einen Arzt auf, wenn der Verdacht besteht, dass Magnete oder sonstige Kleinteile verschluckt oder eingeatmet wurden.

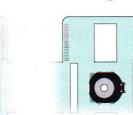
**Enthaltene Teile****1. Vorbereitung**

Trenne die drei Magnetkoppler (E) und die Linse (G) voneinander (alle vier sind magnetisch).

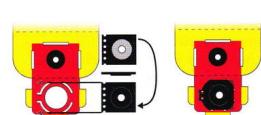
Trenne die Teile A, B, C, D, K und L aus dem vorgezogenen Bogen heraus. Dafür brauchst du kein Werkzeug. Entferne bei B, C und D auch noch die Teile im Inneren.

**2. Magnetkoppler befestigen**

Schiebe die Ecken eines Magnetkopplers (E, silberne Seite nach oben) mit den Ecken der gelochten Seite voraus in die längeren Löcher im hellblauen Bereich des Linsenhalters (A).



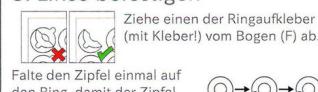
Schiebe die anderen beiden Ecken in die kleineren gebogenen Löcher (s. Bild). Wende den Linsenhalter anschließend.



Schiebe die anderen beiden Ecken in die kleineren gebogenen Löcher (schwarze Seite nach oben) mit den Ecken der gelochten Seite voraus in die längeren Löcher im roten Bereich.

**Fortsetzung zu 2.**

Falte den roten Bereich zusammen und sichere diese Klappe, indem du die Flügel in die entsprechenden Schlitzte schiebst.

**3. Linse befestigen**

Ziehe einen der Ringaufkleber (mit Kleber!) vom Bogen (F) ab. Falte den Zipfel einmal auf den Ring, damit der Zipfel kleberfrei ist.



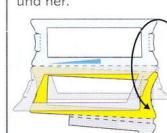
Klebe den Ringaufkleber auf die Rückseite des ersten Magnetkopplers und ziehe die Schutzfolie ab.



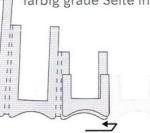
Platziere die Linse (G, schwarze Seite nach oben) auf dem Ringaufkleber. Die Linse ist magnetisch und richtet sich von alleine aus.

**4. Fokuskeil falten**

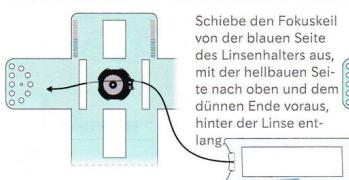
Falte den Fokuskeil (B) an allen acht vorgestanzten Falzlinien einmal hin und her.



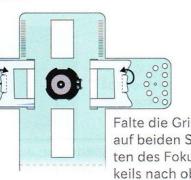
Wickle dann den Fokuskeil von der kurzen Seite aus auf, sodass die einfarbig graue Seite innen ist.



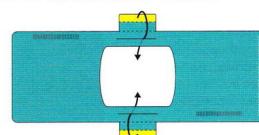
Achte darauf, dass der Fokuskeil am Ende einen rechteckigen Querschnitt bekommt.

**5. Fokuskeil in Linsenhalter einschieben**

Schiebe den Fokuskeil von der blauen Seite des Linsenhalters aus, mit der hellblauen Seite nach oben und dem dünnen Ende voraus, hinter der Linse entlang.



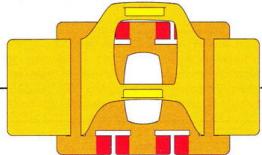
Falte die Griffe auf beiden Seiten des Fokuskeils nach oben.

**6. Probenhalter falten**

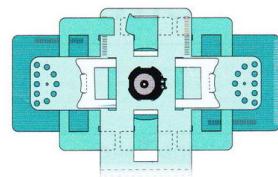
Falte die Flügel des Probenhalters (C) zur blauen Seite hin und stecke die gelben Spitzen in die Slitze.

**7. Probenhalter mit Führungsschiene verbinden**

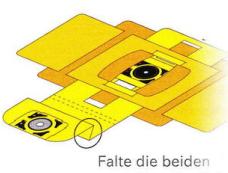
Fädel nun den Probenhalter (C) durch die Doppelschlitzte in der Führungsschiene (D).

**8. Linsenhalter mit Führungsschiene verbinden**

Halte den Linsenhalter vor den Probenhalter (beide mit der blauen Seite nach vorne) und klappe die acht Flügel der Führungsschiene nach vorne. (Im Bild sind die noch nicht nach vorne geklappten Flügel gestrichelt angedeutet.)

**9. Linsenhalter falten**

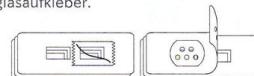
Wende das Foldscope und falte die beiden vorgestanzten Falzlinien, die auf beiden Seiten im gelben Bereich verlaufen, in eine Z-Form.



Falte die beiden vorgestanzten Falzlinien, die auf der Unterseite im blauen Bereich verlaufen, nach oben, sodass die beiden Magnetkoppler aufeinander liegen.

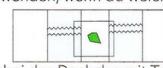
*Fortsetzung zu a)*

Sichere deine Probe nun auch von der Oberseite mit Tesafilm oder einem Deckglasauflkleber.



Lege zum Abschluss zwei leere Kunststoffobjektträger (Standard, L) unter den Objektträger (s. Bild). Weil das Präparat dann dicker wird, bekommst du das Bild besser scharf.

Glasobjektträger und -deckgläser kannst du auch verwenden, wenn du welche hast.



Klebe dabei das Deckglas mit Tesafilm fest.

**10. Foldscope individualisieren**

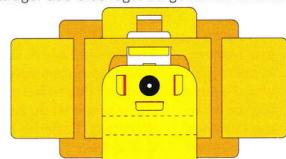
Poliere die Linse von beiden Seiten mit dem Reinigungsstab (I).

Klebe den ID-Aufkleber (H) mit deinem individuellen Registrierungscode auf.

Herzlichen Glückwunsch – du hast dein Foldscope fertig aufgebaut!

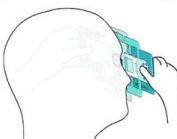
**a) Präparate herstellen****b) Präparate einlegen**

Drehe dein Präparat so, dass der Kunststoffobjektträger mit deiner Probe zur Linse zeigt, also unten liegt. Wenn du zum ersten Mal ein Präparat in dein Foldscope einlegst, geht das noch recht schwer – mit der Zeit wird das einfacher. Objektträger aus Glas legt du genau so in dein Foldscope ein, hier muss das Deckglas unten liegen.



Um ein Präparat einzulegen, schiebst du es mit beiden Enden durch die Schlitze im Probenhalter. Pfeile zeigen, wo das Präparat eingeschoben werden muss (s. Bild). Die Pfeile sind allerdings unter den Laschen versteckt und deswegen sieht man sie nicht direkt.

Klappe anschließend den zweiten Magnetkoppler auf das Präparat.

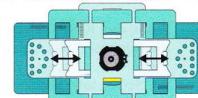
**c) Präparate anschauen**

Schau mit einem Auge von der blauen Seite aus durch die Linse.

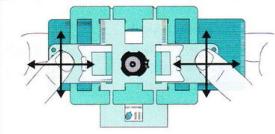
Vor einem hellen Hintergrund, wie z. B. einer angeleuchteten Wand, wird das Bild auch heller. Schau aber nie direkt in die Sonne!

**d) Fokussieren (zwei Möglichkeiten)**

Um das Bild im Foldscope schnell scharf zu stellen, kannst du das Foldscope einfach etwas biegen, während du es vor dein Auge hältst.



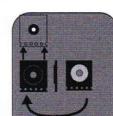
Um das Bild im Foldscope dauerhaft scharf zu stellen, verschiebst du den Fokuskeil.

**e) Präparate verschieben**

Um den sichtbaren Ausschnitt des Präparates zu verändern, verschiebst du den Linsenhalter und Probenhalter gegeneinander.

**f) Proben fotografieren**

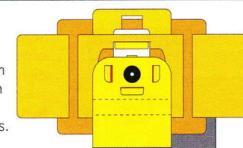
Platziere den dritten Magnetkoppler (E) mit der schwarzen Seite nach außen vor der Linse deines Smartphones.



Fixiere den Magnetkoppler mit Tesafilm. Eventuell musst du die Position aber später nochmal korrigieren.



Verbinde dein Foldscope mit dem Magnetkoppler am Smartphone und mache damit Fotos.



Mehr Informationen zu deinem Foldscope findest du auf [www.jot-entdecken.de/infos/](http://www.jot-entdecken.de/infos/).

Diese Anleitung wurde erstellt von **jot:entdecken Jonas Otten**

Stand 15.09.2020



**jot:entdecken**  
Mikroskopieren in Schule, zu Hause und unterwegs