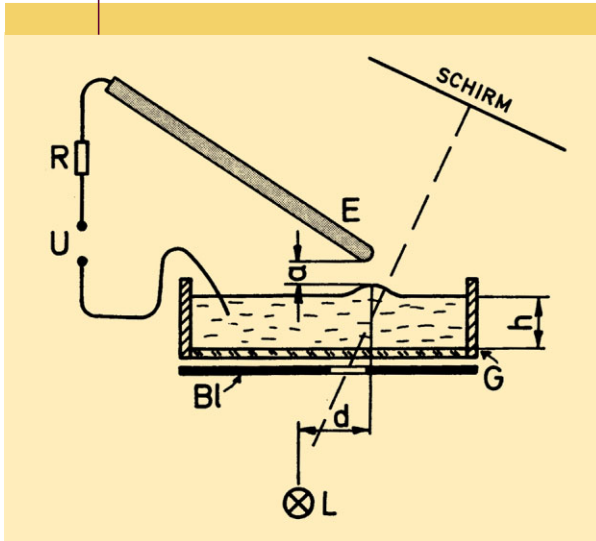


## PHYSIKDIDAKTIK

## Flüssiglinsen

Flüssiglinsen haben in den letzten zehn Jahren eine breite Anwendung vor allem bei Handykameras gefunden. Mittlerweile erobern sie immer weitere Bereiche der Optik. Ein im Folgenden beschriebener, einfacher Versuchsaufbau demonstriert das Prinzip.

ABB. 1 FLÜSSIGLINSE



**Aufbau einer Flüssiglinsen für Demonstrationszwecke.**  
**E:** Elektrode (beispielsweise Bananenstecker mit rundem Ende oder isolierender Stab mit aufgeklebter Kugellagerkugel und elektrischer Verbindung durch das Innere des Stabes),  
**G:** Gefäß (Wellenwanne, Metallring mit aufgeklebter Glas- oder Plexiglasscheibe (Durchmesser etwa 4 cm) oder Petrischale),  
**h:** Wasserstand 5–10 mm, **a:** Abstand Elektrode-Wasseroberfläche circa 5 mm, **U:** Spannung zwischen Elektrode und Wasser 8–10 kV, **d:** Abstand der Elektrode von der optischen Achse etwa 3 cm, **L:** Halogenlampe 50 W, **Bl:** Blende zur Verminderung des Seitenlichts, **R:** Schutzwiderstand circa 100 MOhm (aus [3]).

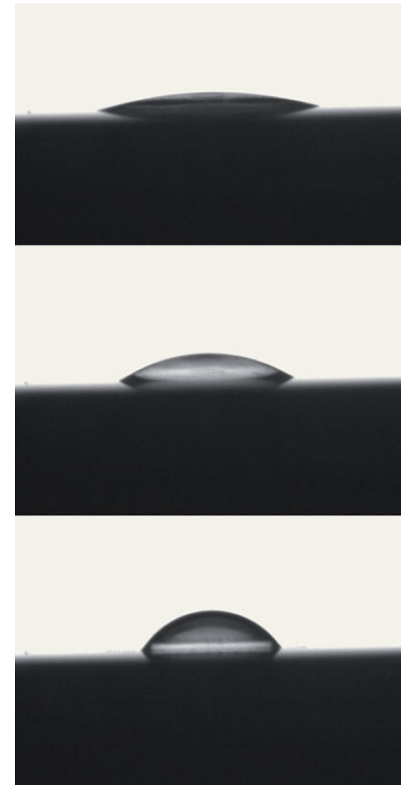
Bei Flüssiglinsen ist das lichtbrechende Medium eine Flüssigkeit, und die Brennweite wird über ein elektrisches Feld eingestellt. Der Vorteil: Man benötigt keine beweglichen Teile zur Brennweitereinstellung.

Bei diesen Linsen wird im Prinzip ein Flüssigkeitstropfen beispielsweise aus Wasser, der von Öl umgeben ist, in eine zylindrische Kammer eingeschlossen. Boden- und Deckplatte sind durchsichtig und elektrisch leitend. Eine zwischen ihnen angelegte Spannung erzeugt in der Kammer ein elektrisches Feld, das eine Kraft auf die polaren Wassermoleküle ausübt. Dies hat zur Folge, dass sich die Was-

seroberfläche krümmt. Damit hat man eine Linse mit einstellbarer Brennweite. Ausführliche Darstellungen und Animationen zu Aufbau und Funktion findet man bei [1, 2].

Neben den faszinierenden Eigenschaften und den vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten sind Flüssiglinsen noch aus einem anderen Grund interessant: Hier liegt der seltene Fall vor, dass das Prinzip lange vor den ersten Patenten und technischen Entwicklungen veröffentlicht wurde. Dies geschah 1988 im Rahmen einer Arbeit aus dem Gebiet der Physikdidaktik [3]. Der dort beschriebene Versuchsaufbau wird hier aus aktuellem Anlass wieder aufgegriffen, weil damit der Bezug zu einer höchst aktuellen technischen Entwicklung im Unterricht einfach hergestellt werden kann (Abbildung 1).

Bei dieser Anordnung wird das elektrische Feld zwischen einer freien Wasseroberfläche (Wasser in einem Glasgefäß) und einer darüber angeordneten Elektrode erzeugt. In diesem Feld werden die polaren Wassermoleküle in der oberen Wasserschicht ausgerichtet und zur Elektrode hin beschleunigt. Diesem Vorgang wirken Gravitation und Oberflächenspannung entgegen. Im Gleichgewicht stellt sich gegenüber der Elektrode eine gekrümmte, hügelartige Wasseroberfläche ein. Die Höhe des Hügels hängt von der angelegten Spannung und dem Elektrodenabstand  $a$  ab. Für  $a = 5$  mm und eine Spannung von 8 kV beträgt die Höhe des Hügels etwa 1 mm. Die damit erzeugte gekrümmte Zone wirkt abbildend. Es ist einleuchtend, dass die Brennweite dieser „Linse“ über die Krümmung und damit durch die angelegte Spannung einstellbar ist.



**Abb. 2** Ein Öltropfen liegt auf einer Elektrode mit hydrophober Beschichtung. Das gesamte System befindet sich in einer wässrigen, leitenden Flüssigkeit. Oberhalb des Tropfens ist eine weitere Elektrode angebracht (nicht auf den Fotos). Variiert man eine angelegte Spannung zwischen 0, 30 und 60 V (v.o.n.u.), so ändert sich die Krümmung des Tropfens (Fotos: Varioptic).

Als Abbildungsobjekt wird die Wendel einer Halogenlampe verwendet. Diese kann jetzt allein durch die passende Wahl des elektrischen Feldes (Spannung) bei vorgegebener Gegenstands- und Bildweite scharf abgebildet werden.

Es ist leicht einzusehen, dass die Öffnung dieser Linse relativ klein ist. Zum Abbilden eignen sich damit nur sehr helle Objekte. Ein relativ großes Bild der Wendel erhält man bei einer Gegenstandsweite  $g = 8$  cm und einer Bildweite von  $b = 3$  m. Mit der einstellbaren Brennweite ist ein scharfes Bild im Bildweitenbereich von 5 cm bis 3 m über die Spannung  $U$  von 8,9 kV bis 8,0 kV möglich.

Der Aufbau ist leicht zu justieren. Es lohnt sich dennoch, durch eigenes Experimentieren (beispielsweise

durch Variation des Elektrodenabstands, der Elektrodenform, der Spannung oder des Durchstrahlungsbereichs) die Anordnung auf die jeweiligen Gegebenheiten anzupassen und zu optimieren. Für die in Abbildung 1 genannten Daten: Gegenstandsweite  $g = 8 \text{ cm}$  und Bildweite  $b$  zwischen  $0,05 \text{ m}$  und  $3 \text{ m}$  muss die Brennweite im Bereich von  $3,1 \text{ cm}$  und  $7,8 \text{ cm}$  eingestellt werden, was einer Spannungsänderung von  $U = 8 \text{ kV}$  bis  $U = 8,9 \text{ kV}$  entspricht. Andere Werte für  $b$  und  $g$  sind bei entsprechenden Spannungswerten möglich.

Dieser Aufbau eignet sich wegen der Beschränkung auf die freie Wasseroberfläche und die notwendig hohen Spannungen für technische

Anwendungen kaum. In der technischen Realisierung konnte – wie oben erwähnt – durch den Einschluss des Tropfens in eine Kammer diese Beschränkung beseitigt werden. Ferner wurde durch geschickte Auswahl der Flüssigkeiten und der Dimension der Kammer erreicht, dass die zur Brennweitereinstellung notwendige Spannung nur noch im Voltbereich liegt.

Zu erwähnen ist noch eine weitere technische Entwicklung, bei der ausgenutzt wird, dass in Kapillaren aufgrund der unterschiedlichen Benetzung konkave und konvexe Oberflächen entstehen, die auch als Linse wirken. Da sich der Grad der Benetzung durch ein elektrisches Feld verändern lässt [4], sind damit

auch Linsen mit einstellbaren Brennweiten herstellbar (Abbildung 2). Durch passende Wahl der Elektroden lassen sich sogar gewünschte Krümmungsprofile für die Linse einstellen, mit der Wellenfronten gezielt eingestellt werden können. Das eröffnet wiederum ein breites Anwendungsfeld.

### Literatur

- [1] [www.varioptic.com](http://www.varioptic.com); Animationen und Videos: [www.varioptic.com/technology/demos-and-videos](http://www.varioptic.com/technology/demos-and-videos)
- [2] [de.wikipedia.org/wiki/Flüssiglinse](http://de.wikipedia.org/wiki/Flüssiglinse)
- [3] W. B. Schneider, Physik und Didaktik **1988**, 2, 158; [www.solstice.de/veroeffentlichungen](http://www.solstice.de/veroeffentlichungen).
- [4] C. Quilliet, B., Current Opinion of Colloid and Interface Science, **2001**, 6, 34.

Werner B. Schneider, Erlangen

## TIERISCHE PHYSIK

### Sie sind ganz Ohr

*Die Ohren von Mensch und Tier sind raffiniert konstruierte Sinnesorgane. Insbesondere ermöglichen sie es, die Richtung zu bestimmen, aus welcher der Schall kommt. Dies ermittelt das Gehirn aus dem kleinen Laufzeitunterschied der Schallwellen zu den beiden Ohren.*

Die Richtungssensitivität des Gehörs können wir mit einem Versuch testen. In die Enden zweier gleich langer Schläuche stecken wir große Trichter und befestigen diese an Stativen. Die beiden Schläuche biegen wir kreisförmig vor dem Kopf zusammen, so dass die beiden Trichter 10 bis 20 Zentimeter voneinander entfernt sind. Nun stellen wir zwischen die Trichteröffnungen einen Wecker, legen zwischen die beiden Trichter einen Maßstab und halten mit verbundenen Augen die Schlauchenden an die Ohren. Ein Freund wechselt mehrmals den Standort des Weckers und lässt ihn läuten. Der Versuch zeigt, dass man mit *einem* Ohr die Richtung einer Schallquelle nicht angeben kann. Aber mit beiden Ohren gelingt dies sehr gut. Beträgt der Wegunterschied zum linken und rechten Ohr nur  $5 \text{ cm}$ , so ist mit der Schallgeschwindigkeit  $v = 350 \text{ m/s}$

der Laufzeitunterschied nur  $0,00014 \text{ s}$ . Dieser winzige Unterschied genügt dem Gehirn, die Richtung des Tons zu erkennen. Eine bemerkenswerte Errungenschaft der Biosphäre.

Ein prinzipielles Problem beim Hören besteht darin, dass nur ein extrem kleiner Anteil der Schallwelle in den Körper eindringt. Mehr als  $99,97 \%$  wird von ihm reflektiert wie bei einem perfekten Spiegel. Eigentlich könnte der Mensch oder ein Tier in der Luft daher gar nichts hören. Die Natur hat jedoch einen Trick entwickelt, den kleinen eindringenden Anteil der Schallwelle von rund  $0,03 \%$  zu verstärken.

Was wir üblicherweise als Ohr des Menschen bezeichnen, nämlich die Ohrmuschel und das Ohrfläppchen, ist nur der kleine äußere Teil des Organs (Abbildung 1). Der umfangreichste Teil liegt geschützt im

Innern des Kopfes. Die Ohrmuschel fängt die Schallwellen auf und leitet sie in den  $3 \text{ cm}$  langen Gehörgang. Darin gelangen sie zum Trommelfell, eine kreisrunde hauchfeine Membran, die von den Schallwellen in Schwingungen versetzt wird. Es stellt die Grenze zwischen dem äußeren und mittleren Ohr dar.

Innen am Trommelfell sitzen drei Knöchelchen, die wegen ihrer Form als Hammer, Amboss und Steigbügel bezeichnet werden. Sie liegen in einer Höhle, Ohrtrompete genannt, die mit der Mundhöhle verbunden ist. Diese Verbindung ist notwendig, damit auf beiden Seiten des Trommelfells immer der gleiche Luftdruck herrscht, sonst würde diese feine Membran platzen.

Das innere Ohr ist mit einer Flüssigkeit gefüllt und bildet die Gehörmuschel. Sie ist vom Steigbügel durch ein ovales rundliches Fenster getrennt, wieder ein dünnes Häutchen. Bei der Übertragung der Schallwellen auf die Gehörmuschel wirken

