

Werner B. Schneider

Bemerkungen zur Sichtbarkeit reeller Bilder bei einem Hohlspiegel

Erfahrungsgemäß sind reelle Bilder bei einem Hohlspiegel oder bei einer Linse ohne besondere „Tricks“ (z.B. [1], [2]) nur schwierig mit bloßem Auge direkt als im Raum frei schwebende „Objekte“ zu beobachten. Daher werden reelle Bilder bevorzugt nur mit Hilfe eines Schirms im Experiment vorgeführt. Vermutlich leitet sich hieraus auch die häufig – nicht nur bei Laien – vorzufindende Fehlvorstellung ab, daß reelle Bilder direkt nicht sichtbar seien. Man hört auch, daß reelle Bilder „aufgefangen“ werden müssen, damit sie sichtbar werden. Die Schwierigkeit bei der Beobachtung ist sicher damit zu begründen, daß man die Augen bzw. das Gehirn nicht „zwingen“ kann, auf eine bestimmte Stelle im Raum zu fixieren, solange wesentlich auffallendere optische Eindrücke an anderen Stellen im Raum vorhanden sind. Mit „fixieren“ ist hier die Scharfeinstellung durch das Auge und die Überlagerung des linken und rechten Teilbildes zu einem räumlichen Bild im Gehirn gemeint.

Um das Fixieren auf die reellen Bilder zu erleichtern, bietet man daher dem Auge Bezugspunkte am Ort der Bilder an, wie sie z.B. durch eine Mattscheibe oder eine Bleistiftspitze gegeben sind. Nach dem „Fixieren“ kann man diese wieder entfernen, und man sieht das Bild ohne Hilfsmittel frei im Raum schweben. Diese Fixierstellung kann man aus physiologischen Gründen in der Regel nur wenige Sekunden aufrechterhalten. Nach einem kurzen Schließen der Augen ist der räumliche Eindruck meistens wieder verloren, da dann wieder die anderen markanteren Objekte überwiegen. Ähnliche Probleme treten bei manchen Hologrammbildern auf.

Im Fall des Hohlspiegels oder der Linse kommt noch hinzu, daß sie im Alltag vor allem als Rasierspiegel bzw. Lupe verwendet werden. Man hat sich daran gewöhnt, zunächst nur das virtuelle vergrößerte Bild zu suchen und fixiert nicht auf eine Stelle vor dem Spiegel.

In einem einfachen Freihandexperiment kann man die genannten Hindernisse bei der Suche nach dem reellen Bild umgehen, indem man als Hohlspiegel eine unverspiegelte, konkave Glasfläche verwendet, wie sie z.B. durch eine Zerstreuungslinse, ein Brillenglas, eine Petrischale oder andere Glaskörper mit konkaver Begrenzungsfläche gegeben ist. Der Vorteil dieser Spiegelflächen besteht einmal darin, daß sie in der Regel – verglichen mit den üblichen Hohlspiegeln – einen relativ kleinen Krümmungsradius (einige Zentimeter) besitzen, so daß die reellen Bilder in der Nähe der Spiegelfläche entstehen, und das Auge genügend Anhaltspunkte zum Fixieren findet. Zum anderen treten wegen des geringen Reflexionsvermögens der unverspiegelten Glasfläche die sonst dominierenden „virtuellen“ Spiegelbilder kaum in Erscheinung, was das Fixieren auf das interessierende Bild schnell ermöglicht. Verwendet man zusätzlich einen hellen oder selbstleuchtenden Gegenstand (Lampe) und führt den Versuch in einem mäßig abgedunkelten Raum durch, so wird das Fixieren nochmals erleichtert. Man findet sofort das frei im Raum schwebende Bild, und ein kurzes Schließen der Augen „zerstört“ jetzt nicht mehr die erreichte Fixierstellung.

Besonders eindrucksvoll ist es, den Brennpunkt des „Hohlspiegels“ als frei im Raum schwebenden Punkt zu erleben. Hierzu genügt die Betrachtung des Bildes einer leuchtenden Glühlampe, die in einem größeren Abstand (mindestens das 10fache der Brennweite) zum „Spiegel“ auf der optischen Achse angeordnet ist. Gut eignet sich hier ein Glühlämpchen

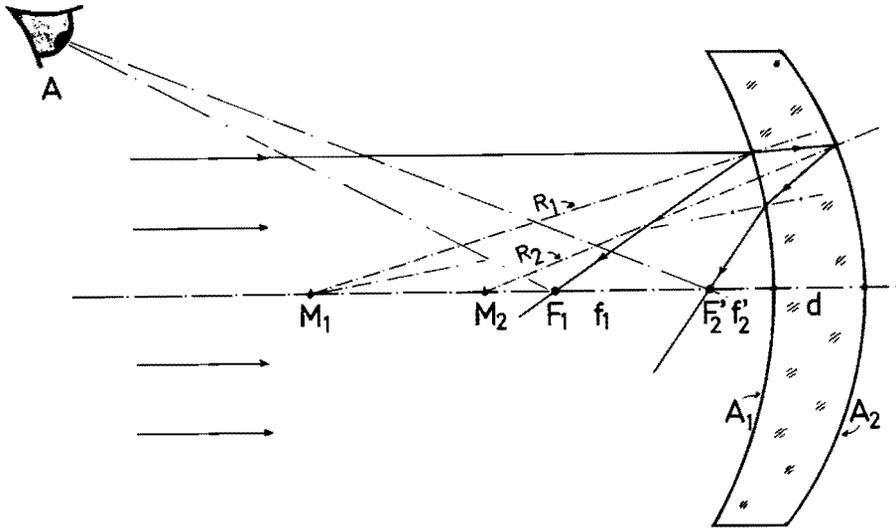


Abb. 1 Anordnung zur Erzeugung und Beobachtung der an gekrümmten Glasflächen entstehenden Spiegelbilder für das Beispiel einer konkavkonvexen Linse bei parallelem Lichteinfall. (M_1, M_2 : Mittelpunkte der sphärischen Flächen A_1 und A_2 mit den Radien R_1 und R_2 ; d : Dicke der Linse). Uns stand z.B. ein Brillenglas mit $\varnothing = 60$ mm, $f_{\text{Linse}} = 500$ mm, $R_1 = 134,3$ mm, $R_2 = 84,9$ mm, $d = 1,5$ mm und $n = 1,46$ zur Verfügung. Mit dem beschriebenen Verfahren wurden $R_1 = 130$ mm und $f_2' = 35$ mm gemessen; nach Gleichung (3) erhält man $f_2' = 36,3$ mm.

mit integrierter Linse. Verwendet man als Glaskörper eine Petrischale, so beobachtet man, daß das von der ersten Grenzfläche erzeugte Bild mit dem von der zweiten Grenzfläche erzeugten Bild praktisch zusammenfällt, was für die Beobachtung besonders günstig ist (Prinzip der Anordnung in Abbildung 1).

Bemerkenswert ist, daß man das reelle Bild noch relativ weit außerhalb der optischen Achse sehen kann. Es ist solange sichtbar, wie jedes Auge – bei fester Kopfstellung – noch „sein“ Bild vom Gegenstand wahrnimmt. Für den zugehörigen Öffnungswinkel $\alpha = \arctan(r/f)$ erhält man z.B. für $r = 3$ cm und $f = 3$ cm (r, f : Radius und Brennweite der spiegelnden Fläche) $\alpha = 45^\circ$. Es ist hiermit möglich, auch mehrere leuchtende Objekte, wie z.B. die realen Bilder der Deckenleuchten im Klassenzimmer gleichzeitig frei im Raum schweben zu sehen. Diese Beobachtung ist in ihrer überraschenden räumlichen Wirkung mit der Betrachtung von Hologrammbildern vergleichbar.

Dem Leser ist zu empfehlen, selbst verschiedene Beobachtungsbedingungen und Glaskörper auszuprobieren. Interessant ist auch, das reelle Bild bei einer passenden Linse zu suchen. Es empfiehlt sich entsprechend, einen leicht abgedunkelten Raum, eine kurzbrennweitige Linse mit nicht zu kleinem Durchmesser und einen hellen Gegenstand zu verwenden. Man findet dann sofort das frei im Raum schwebende reelle Bild.

Verwendet man beim Hohlspiegelversuch Glaskörper mit unterschiedlichen Krümmungsradien für die Begrenzungsflächen, so wird man entsprechend zwei getrennte Bilder sehen, wobei das an der zweiten Begrenzungsfläche entstehende Bild etwas schwächer erscheint. Ferner muß man beachten, daß ein Bild, das durch gekrümmte Begrenzungsflächen betrachtet wird, eine Modifizierung bezüglich Größe und Lage erfährt. In Abbildung 1 ist dies

für eine konkavkonvexe Linse für parallelen Lichteinfall skizziert. Die Reflexion an der ersten Begrenzungsfläche A_1 mit dem Krümmungsradius R_1 führt zum Bild im Hohlspiegelbrennpunkt F_1 mit der Brennweite $f_1 = R_1/2$. Das durch die Linse mit den Radien R_1 und R_2 tretende und an A_2 reflektierte Licht führt zu dem gegenüber dem Brennpunkt F_2 verschobenen Brennpunkt F'_2 . Ist A_2 verspiegelt, so wird der zugehörige Glaskörper „Spiegellinse“ genannt [3, 4]. Die Reflexion an A_2 läßt sich vereinfacht als die Reflexion an einer außerhalb der Linse im geringen Abstand zu A_2 mit gleichem Krümmungsradius verlaufenden, reflektierenden Fläche beschreiben. Bei einem gegen Null gehenden Abstand heben sich die durch die zusätzliche Brechungen bewirkten Änderungen im Strahlverlauf wieder auf. Man kann somit den Einfluß des Glaskörpers auf die Lage von F'_2 durch ein zweimaliges Durchlaufen der Linse und einer einmaligen Reflexion an A_2 beschreiben. Für eine dünne Linse und achsennahe Strahlen erhält man durch Addition der reziproken Brennweiten mit der „Linsenmachergleichung“

$$1/f = (n-1) (1/R_1 - 1/R_2), \text{ z.B. nach [3]} \quad (1)$$

für die Brennweite f'_2 :

$$1/f'_2 = 2(n-1) \cdot (1/R_1 - 1/R_2) - 2/R_2 \quad (2)$$

Die Vorzeichen der Krümmungsradien sind wie in [3] gewählt; in Abbildung 1 ist $R_1, R_2 < 0$ einzusetzen; f'_2 ergibt sich dann als positive Größe. Durch eine einfache Umformung erhält man aus Gleichung (2) die in der Literatur übliche Form [4]

$$1/f'_2 = -(2n/R_2 - 2(n-1)/R_1). \quad (3)$$

Bezieht man die Brennweite auf die „Spiegellinse“, so kehrt sich das Vorzeichen in Gleichung (3) um. Für andere Formen der Spiegellinse ergibt sich die Lage der Brennpunkte (Bilder) durch entsprechende Überlegungen. Für eine konvexkonkave Linse (obige Linse von der anderen Seite betrachtet) erhält man z.B. zwei virtuelle Spiegelbilder, die hinter dem Spiegel liegen; $f_1, f'_2 < 0$. Auch hier gilt, daß das an der ersten Fläche erzeugte Bild heller ist als das an der zweiten. Bei einer bikonvexen Linse erhält man wie bei einer bikonkaven Linse ein reelles und ein virtuelles Bild. Bei einer plankonkaven Linse erhält man wie bei einer bikonkaven Linse ein reelles und ein virtuelles Bild. Bei einer plankonkaven oder plankonvexen Linse wirkt die plane Fläche als ebener Spiegel (R ist unendlich).

Das Verfahren bietet darüber hinaus eine interessante Anwendung. Da das Auge den Ort des Brennpunktes im Raum erkennt, kann man auf einem geeignet angeordneten Maßstab sofort die Brennweite ablesen und den zugehörigen Krümmungsradius – gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Gleichung (2) (s. Abb. 1) – berechnen. Handelt es sich dabei um eine dünne Linse, so läßt sich mit den so erhaltenen Radien und der Gleichung (1) die Brennweite für den durchstrahlten Glaskörper berechnen. Dies ist vor allem bei Zerstreuungslinsen von Interesse.

Im Fall einer Petrischale, bei der beide Radien praktisch gleich sind, folgt aus Gleichung (3) $f_1 = f'_2$; d.h. bei einer dünnen Schale fallen beide Brennpunkte praktisch zusammen. Man sieht daher nur ein Bild.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Untersuchung von Spiegelungen an Linsenoberflächen eine bisher wenig beachtete, wertvolle Ergänzung für den Optikunterricht dar-

stellt. Sie gestattet, häufig vorzufindende Fehlvorstellungen zur Sichtbarkeit reeller Bilder beim Hohlspiegel oder bei der Linse zu korrigieren, sie führt in das reizvolle Thema Spiegel-linsen ein und ermöglicht die überraschende Beobachtung von frei im Raum schwebenden Bildern.

(Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Werner B. Schneider, Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg – Didaktik der Physik –, Glückstraße 6, 8520 Erlangen)

Eingangsdatum: 18. 12. 1987

Literatur

- [1] Friedrich, A.: „Handbuch der experimentellen Schulphysik, Optik“, Aulis Verlag 1963.
- [2] Wittmann, J.: „Trickkiste“, Bayerischer Schulbuchverlag 1983.
- [3] Bergmann/Schäfer: „Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik“, 7. Auflage Berlin 1978.
- [4] Boegehold, H.: „Geometrische Optik“, Verlag Boertraeger, Berlin 1927.

Murphys Hauptsatz

Murphys Hauptsatz besagt: „Wenn irgend etwas daneben gehen kann, so wird es daneben gehen“. Oder in exakterer mathematischer Form lautet es:

$$1 + 1 \approx 2,$$

wobei \approx das mathematische Symbol für „kaum jemals“ ist.

(Aus: Kabinett physikalischer Raritäten, Hrsg. R.L. Weber, E. Mendoza, Vieweg Verlag, 1979)