

Der Doppelhohlspiegel

Glauben, was man sieht, oder den eigenen Augen nicht trauen?

Von Heinz Muckenfuß in Ravensburg

1. Vorbemerkung

Seit einiger Zeit ist auch bei uns ein Doppelhohlspiegel auf dem Lehrmittelmarkt¹⁾, der sich an Schulen und Hochschulen im angelsächsischen Raum seit längerem großer Beliebtheit erfreut. Die Prospekte versprechen nicht zuviel, wenn sie behaupten, dass jedermann verblüfft ist, wenn er das dreidimensionale Bild sieht, das dieses Spiegelsystem zu entwerfen vermag.

Seit mehreren Jahren konfrontiere ich Erwachsene und Kinder, Laien und physikalische Fachleute mit den Phänomenen, die der Spiegel erzeugt. Hier wie da erweckt er Erstaunen und — was wichtiger ist — eine hohe Motivation, die physikalische Erklärung zu erfahren. Die psychologische Wirkung beruht offenbar auf dem Umstand, dass einfache, aber fundamentale Erfahrungssätze, z.B. „glaubhaft ist, was man mit den eigenen Augen sieht“, plötzlich in Frage gestellt werden. Die natürliche Reaktion auf solche Erlebnisse ist das Streben nach einem Erkenntniszuwachs, der Erfahrung und Denken Wieder in Einklang bringt. Da dieser Erkenntniszuwachs auf der Basis relativ weniger Lernvoraussetzungen möglich ist und zugleich grundlegende Aspekte des Sehvorgangs zu verdeutlichen mag, eignet sich das Spiegelsystem als Unterrichtsgegenstand.

2. Beschreibung der Beobachtungen

Das Spiegelsystem besteht aus zwei gleich dimensionierten Hohlspiegeln, die gegeneinander gerichtet wie ein Topf mit Deckel auf den Tisch gestellt werden. Der Durchmesser der Spiegel beträgt ca. 23 cm. Im „Deckel“, also im oberen Spiegel, befindet sich ein Loch mit ca. 6 cm Durchmesser. Die auffälligsten Beobachtungen, die man an diesem System machen kann, sind folgende:

○ Legt man in das Innere des Spiegelsystems einen relativ kleinen Gegenstand, z. B. einen halben Walnusskern, so erscheint dieser als dreidimensionales reelles Bild oberhalb des Spiegelsystems, gerade so, als würde die Walnuss auf dem Loch liegen (Abb. 1).



Abb. 1: Dreidimensionales Bild eines im Innern des Spiegels befindlichen Gegenstandes (Walnusskern)

○ Das Loch selbst erscheint nicht als solches, sondern sieht aus wie eine Spiegelfläche. Dementsprechend erscheint die Walnuss samt ihrem Spiegelbild auf dem Loch. Man ist versucht, zu sagen: Die Walnuss, die keine ist, spiegelt sich an einer Fläche, die es gar nicht gibt. (Wie unten noch gezeigt wird, müsste man exakt sagen; Die reale Walnuss im Innern des Spiegelsystems wird einschließlich ihres virtuellen Spiegelbildes reell im Bereich des Loches abgebildet).

○ Ein dicht über dem Loch befindlicher Gegenstand, z. B. ein Finger, spiegelt sich am Loch (Abb. 2). (Das kann natürlich gar nicht sein, weil ein Loch kein Spiegel ist! Wie wir unten noch sehen werden, handelt es sich bei dem „gespiegelten“ Finger um ein reelles und kein virtuelles Bild). Wer sich in Muße mit dem Spiegel beschäftigt, dem werden noch viele andere Dinge auffallen, deren Erklärungen sich aber weitgehend mit unter die folgenden fassen lassen.



Abb. 2: Der Finger scheint sich im Loch zu spiegeln

Beim einen oder anderen mögen nun gewisse Zweifel aufgetaucht sein, ob sich diese verwirrende „Bildergeschichte“ eignet, im Unterricht Klarheit in das ohnehin didaktisch heikle Problem der Erklärung von Bildern zu bringen.

Ich hoffe, die Zweifel im Folgenden zerstreuen zu können.

3. Lernvoraussetzungen

Man muss natürlich einige Grundkenntnisse und Denkmuster verfügbar haben, um das Zustandekommen der oben beschriebenen Phänomene verstehen zu können. Die wichtigsten Lernvoraussetzungen sollen kurz angesprochen werden, wobei offen bleiben mag, ob sie erst bei der Behandlung dieses Spiegelsystems erarbeitet werden oder bereits im vorangehenden Unterricht bereitgestellt werden sollten.

Die Schüler sollten wissen, dass unser Gehirn Gegenstände und Gegenstandspunkte dort lokalisiert, wo die von ihnen ausgehenden divergierenden Lichtbündel, die unseren Sehapparat erreichen, ihren Ausgangspunkt haben oder zu haben scheinen. (Streng genommen gilt das allerdings nur bei kurzen Beobachtungsabständen bzw. bei Lichtwegen $< 2m$). Diese Einsicht ist ja u. a. auch Grundlage für das Verständnis der Tiefenwahrnehmung überhaupt oder das Verstehen virtueller Bilder an Spiegeln, brechenden Flächen usw.

Den Schülern sollte über den Strahlengang am einfachen Hohlspiegel bekannt sein,

- dass Lichtstrahlen, die aus dem Brennpunkt F kommen, vom Spiegel achsenparallel reflektiert werden; (Abb.3, Bündel (1))
- dass Lichtbündel, die von einem Punkt innerhalb der Brennweite ausgehen, die Spiegelfläche noch divergent verlassen; (Abb.3, Bündel (2), P_1)
- dass Lichtbündel, die von einem Punkt außerhalb der Brennweite ausgehen, die Spiegelfläche konvergent verlassen; (Abb.3, Bündel (2), P_2)
- und schließlich sollte die Umkehrbarkeit der beschriebenen Strahlengänge einsichtig sein.
- Hilfreich ist es natürlich auch, wenn die Begriffe „Scheitel“, „Brennpunkt“, „Brennweite“ und „Achse“ in Bezug auf den Hohlspiegel verwendet werden können.

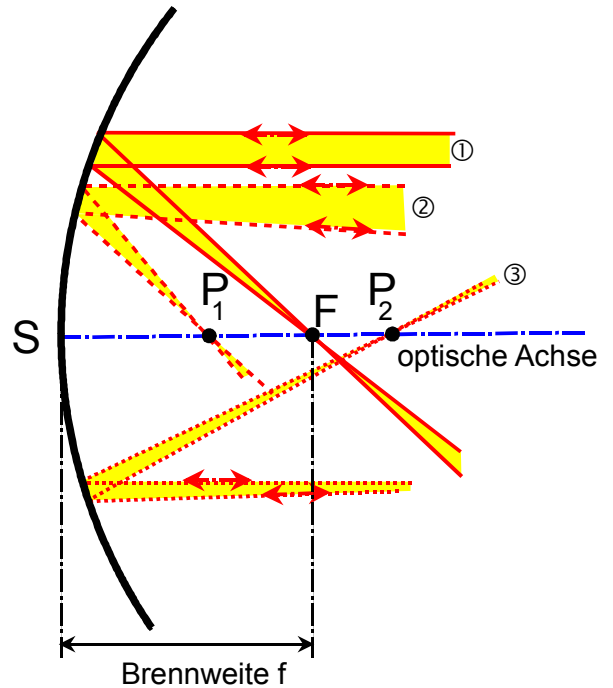


Abb. 3: Relevante Lichtwege am Hohlspiegel. (S: Scheitel, F: Brennpunkt)

4. Erklärungen

4.1. Prinzipieller Strahlengang

Das Spiegelsystem ist so konstruiert, dass die Scheitel S_A und S_B der beiden Spiegel; A und B sich im Brennpunkt F des jeweils gegenüberliegenden Spiegels befinden. Die Höhe des Systems entspricht daher der einfachen Brennweite. Ein aus dem Scheitel $S_B (= F_A)$ kommendes Lichtbündel, das auf die Spiegelfläche A fällt, wird dort achsenparallel auf die Fläche B reflektiert und von dort in $F_B (= S_A)$ gebündelt. Für unser Auge scheint das Lichtbündel deshalb aus dem Punkt F_B , mithin also aus der Mitte des Loches zu kommen (Abb. 4).

Allerdings können nicht alle Lichtbündel auf diese Weise die Spiegelöffnung verlassen, woraus sich ergibt, dass das entstehende reelle Bild nur aus einem bestimmten Raumwinkel zu sehen ist. Schaut man senkrecht von oben in die Spiegelöffnung, sieht man natürlich nur das Original, da kein reflektiertes Lichtbündel die Öffnung auf diesem Weg verlassen kann. Ebenso verschwindet das Bild aus Gründen der Spiegelgeometrie, wenn man zu flach auf das System schaut. Dies ist bei der Vorführung zu beachten (s. a. gestrichelter Strahlengang in Abb. 4).

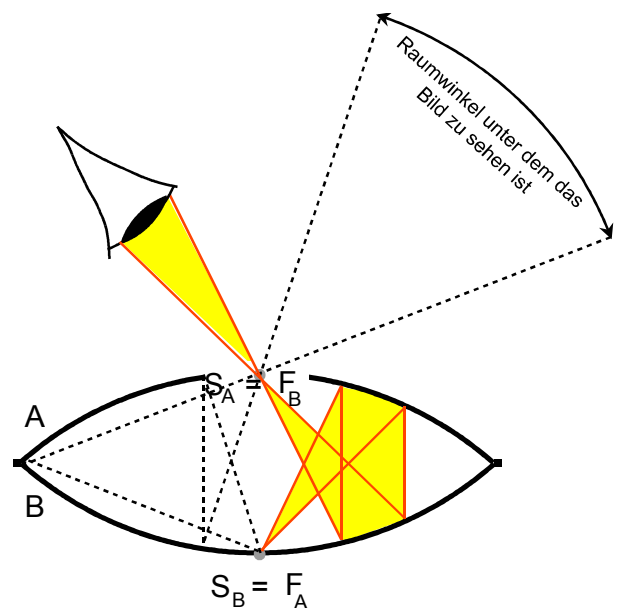


Abb.4: Der Scheitelpunkt S_B wird im Brennpunkt F_A abgebildet. Das Bild von S_B ist nur in einem begrenzten Winkelbereich sichtbar.

4.2. Bildlage

Das Bild nach Abb. 1 erscheint aufrecht, im Maßstab 1:1 und um seine senkrechte Achse gegenüber dem Original um 180° verdreht. Die aufrechte Lage ergibt sich aus dem Verlauf des Lichtbündels a in Abb. 5: Ein vom Punkt G ausgehendes Lichtbündel, das direkt auf die Fläche A fällt, wird von dort schwach divergent reflektiert (G liegt innerhalb von F_A). Spiegel B bildet den Punkt dann oberhalb von F_B ab, als käme das Lichtbündel von einem weit, aber nicht unendlich weit entfernten Punkt. Oberhalb von F_A liegende Punkte werden also auch oberhalb von F_B abgebildet.

Ein dicht bei F_A liegender, seitlich aus der Achse verschobener Gegenstandspunkt würde an der Fläche A keine achsenparallel reflektierten Bündel erzeugen. Dieses Bündel würde an A vielmehr leicht in Richtung auf F_A abgelenkt und von der Fläche B jenseits von F_B , also um 180° verdreht, abgebildet.

Für alle Punkte, die relativ dicht bei F_A liegen gilt, dass sie dicht bei F_B abgebildet werden. Aus der Symmetrie dieser Abbildung ergibt sich zwanglos der Abbildungsmaßstab 1:1. Andererseits folgt hieraus auch, dass die effektvolle Abbildung nur für relativ kleine, quasi punktförmige Gegenstände funktioniert.

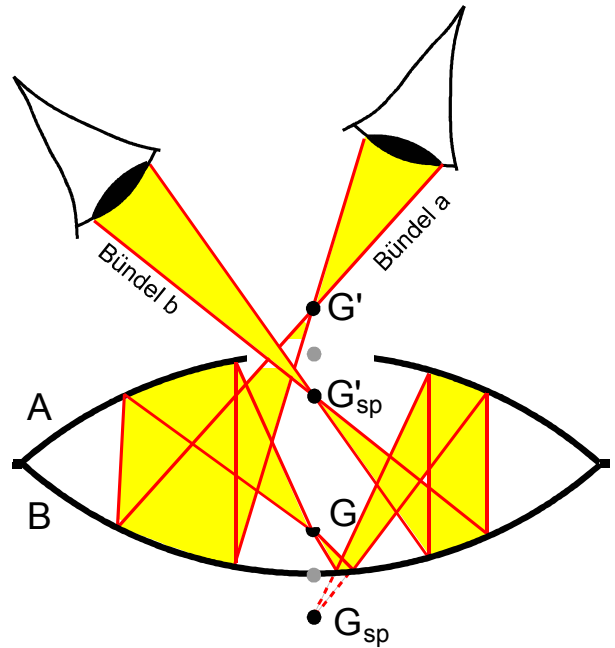


Abb. 5: Lichtwege für die Wahrnehmung eines Gegenstandspunkts G der etwas oberhalb des Scheitels von Spiegel B liegt. Er wird samt Spiegelbild in der Nähe des Lochs reell abgebildet.

4.3. Reelle Abbildung des virtuellen Bildes

Von einem oberhalb F_A liegenden Gegenstandspunkt G gehen auch Lichtbündel aus, die zunächst auf die Fläche B fallen (s. Bündel b in Abb. 5). Sie werden von dort auf die Fläche A reflektiert, gerade so, als käme das Bündel aus dem virtuellen Bildpunkt G_{sp} . Das Bündel wird die Fläche A deshalb bereits leicht konvergent verlassen und von der Fläche B unterhalb von F_B in G_{sp} gebündelt. Dieser Strahlengang erklärt, warum auch das Spiegelbild der Walnuss reell abgebildet wird.

4.4. Das reelle „Spiegelbild“ des Fingers

Die Erklärung für den „gespiegelten“ Finger aus Abb. 2 liefert der in Abb. 6 dargestellte Strahlengang. Wie aus dem Verlauf des dargestellten Lichtbündels hervorgeht, wird der Punkt G reell in G' nach fünfmaliger Reflexion abgebildet. Der damit verbundene Lichtverlust ist deutlich wahrnehmbar.

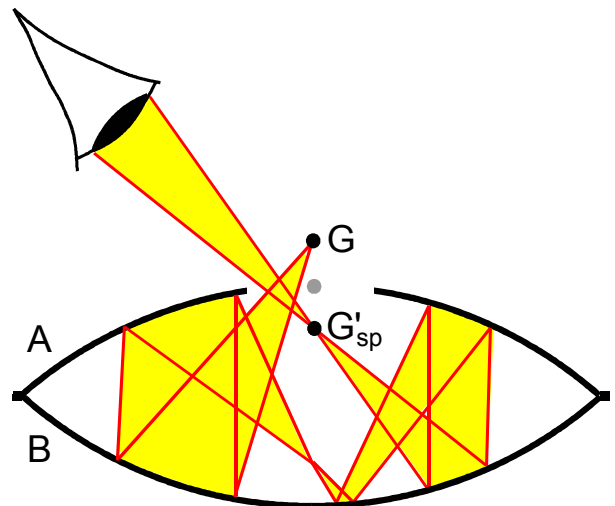


Abb.: Das Loch wirkt wie ein Spiegel. Der Punkt G wird – allerdings reell – als G_{sp} abgebildet.

5. Abschließende Hinweise

Man wird Schülern vorstehende Erklärungen sicher nur insoweit anbieten, als Motivations- und Leistungsfähigkeit dies nahe legen. Oft wird ihre spontan geweckte Neugier schon gestillt sein, wenn sie den prinzipiellen Verlauf der Lichtbündel gemäß Abb. 4 eingesehen haben. Didaktisch wichtiger als detailreiche Erklärungen dürfte die grundsätzliche Einsicht in die Entstehungsweise und die Räumlichkeit Bilder sein. Gerade Letzteres wird häufig übersehen, weil reelle Bilder meist auf Matt-Scheiben dargestellt werden. Schaut man „durch“ eine kurzbrennweitige Sammellinse, so verdeckt gerade das Wörtchen „durch“, dass man nicht die Wirklichkeit, sondern ein *diesseits* der Linse liegendes dreidimensionales reelles Bild betrachtet (Was sieht man, wenn man „durch“ das Fernglas schaut?).

Es empfiehlt sich übrigens, die Pflegehinweise des Herstellers streng zu beachten. Die Spiegel sind oberflächenbeschichtet und sofort beschädigt, wenn man versucht, sie mit einem Lappen o. ä. auszuwischen.