

Spielwiese

Der chinesische Zauberspiegel

HANS JOACHIM SCHLICHTING | CHRISTIAN UCKE

Ein auf den ersten Blick normal funktionierender Spiegel zeigt in der Projektion des reflektierten Lichts Ornamente, die auf der Rückseite reliefartig eingeprägt sind. Der Zauber besteht darin, dass der aus massivem Metall gefertigte Spiegel lichtdurchlässig zu sein scheint.

Ein Zauberer wünscht sich nur, dass seine Täuschung einen Augenblick vorhält. Er versucht erst gar nicht dir weiszumachen, er täusche nicht.

Gilbert Keith Chesterton

Man findet ihn hin und wieder in Geschäften für Geschenkartikel und im Versandhandel. Auf den ersten Blick wirkt er zwar etwas ungewöhnlich verziert, scheint aber ansonsten ein ganz normal funktionierender Spiegel zu sein. Etwas ungewöhnlich ist höchstens, dass der aus massivem Metall bestehende, polierte Spiegel leicht konvex gekrümmt ist. Die gespiegelten Gegenstände erscheinen daher etwas verkleinert.

Seinen Zauber entfaltet der Spiegel eher indirekt, wenn man mit ihm das Licht einer hellen Lichtquelle, am besten das der Sonne, auf eine im Schatten liegende Wand projiziert. Dann erkennt man mehr oder minder

deutlich in dem hellen Lichtfleck ein Bild. Meistens zeigt es das auf der Rückseite eingeprägte Relief. Diese an ein Wasserzeichen erinnernden Muster legen den Gedanken nahe, dass der aus massivem Metall bestehende Spiegel die Verzerrungen durchschimmern lässt. Obwohl dieser Gedanke im Widerspruch zur Undurchsichtigkeit massiver Metall-

objekte steht, drängt er sich mangels alternativer Erklärungen geradezu auf und macht das Zauberhafte dieses Spiegels aus.

Im alten China sprach man wegen dieser Eigenschaft vom „Licht durchlässigen Spiegel“. Dort tauchte er bereits vor mehr als 2000 Jahren zur Zeit der Han Dynastie (206 v. Chr. bis 24 n. Chr.) auf. Der in Abbildung 2 dargestellte Spiegel ist eine Kopie eines im Museum von Shanghai aus-

gestellten Originals. Er wurde aus Bronze gefertigt und mit einem Relief aus chinesischen Buchstaben oder anderen typischen Zeichen versehen, die in der Reflexion schemenhaft sichtbar werden.

Die Tatsache, dass es auch Zauberspiegel gibt, die eine ganz andere Struktur im hellen Reflex an der Wand erkennen lassen, als auf der Rückseite eingeprägt ist, widerlegen zwar die ohnehin unmögliche „Durchdringungshypothese“, tun der Zauberhaftigkeit des Spiegels jedoch keinen Abbruch.

Die Entzauberung des Spiegels beginnt in dem Moment, in dem man sich davon überzeugt, dass die spiegelnde Vorderseite doch nicht so perfekt ist, wie es das eigene Spiegelbild nahe legt. Dazu genügt ein einfaches Freihandexperiment. Man stellt sich mit dem Spiegel unter eine Leuchtstoffröhre und hält den Spiegel so, dass die Röhre gut zu erkennen ist. Anschließend lässt man deren Bild quer über die spiegelnde Fläche laufen, indem man den Spiegel langsam neigt. Wenn man dabei den Blick auf die gerade Kante des Bildes der Leuchtstoffröhre richtet, erkennt man an bestimmten Stellen geringe Abweichungen von der Linearität, die genau an den Stellen des Spiegels auftreten, welche die Strukturierung im Reflex an der Wand hervorrufen. Mit Hilfe eines rechteckigen Gitters, das man im Spiegel betrachtet, lassen sich die Abweichungen von der Linearität auch auf einmal feststellen.

Die Deutlichkeit, mit der die Unebenheiten der spiegelnden Oberfläche indirekt sichtbar gemacht werden können, erscheint auf den ersten Blick verwunderlich, sind sie doch direkt am eigenen Spiegelbild auch durch noch so genaues Hinsehen nicht festzustellen. Eine kleine Abschätzung zeigt, dass die Unebenheiten von der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes abhängig sind (s. „Größenordnung der Unebenheiten“, S. 140). Diese Winzigkeit erklärt auch, dass die dadurch hervorgerufene Ablenkung der Lichtstrahlen erst in größerer Entfernung zu einer erkennbaren Änderung der Lichtintensität führen.

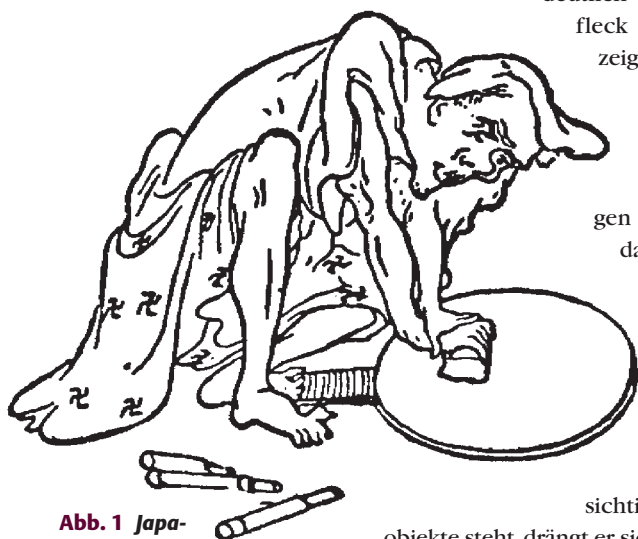


Abb. 1 Japanischer Handwerker beim Polieren eines Zauberspiegels (Teilansicht eines japanischen Stiches aus dem British Museum (nach [1])).



Abb. 2 Ein Zauberspiegel in seiner Schatulle, links die Vorderseite, Mitte die Rückseite und rechts das Reflexbild.

Das Geheimnis der Unebenheiten liegt im Herstellungsprozess des Zauberspiegels verborgen. Eine Beschreibung, wie dies geschieht, lieferte unter anderen der Physiker William Bragg. Er bezog sich dabei auf einen Professor Ayrton, der in hohen Stellungen im japanischen Erziehungswesen tätig war und die japanische Version des Zauberspiegels im Jahre 1878 im Hörsaal der Royal Institution, in dem die Weihnachtsvorlesungen stattfanden, bekannt gemacht hatte. Demnach wurde der Spiegel hergestellt, indem man geschmolzene Bronze in eine Form goss, die mit dem reliefartigen Ornament versehen war. Der erstarrte Rohling wurde anschließend auf einer hölzernen Unterlage mit einer Art Hobel bearbeitet, um die Oberfläche zu glätten (Abbildung 1). Durch das starke Aufdrücken gibt der Spiegel an den Stellen etwas nach, an denen sich die Vertiefungen des rückwärtigen Reliefs befinden. Dadurch trägt der Hobel an diesen Stellen weniger ab als an den auf der Unterlage aufliegenden erhabenen Stellen des Reliefs. Folglich wölbt sich die Oberfläche an den entsprechenden Stellen geringfügig auf, sobald die durch den Druck bedingte Durchbiegung nachlässt.

Wenn Licht auf diese durch Vertiefungen und Erhöhungen leicht gewellte Oberfläche fällt, wirken die Vertiefungen wie kleine Hohlspiegel, die das Licht ihrem Krümmungsradius entsprechend fokussieren, während die Erhöhungen zu einer Defokussierung führen (Abbildung 3). Infolgedessen ist im reflektierten Licht eine leichte Helligkeitsmodulation erkennbar, die in ihrer Struktur den Vertiefungen und Erhöhungen und damit der sie verursachenden Form des Reliefs entsprechen.

Ob dieses mühselige Verfahren bei der Herstellung der heute zu kaufenden Zauberspiegel immer noch angewandt wird, ist wegen des großen Aufwandes wohl zu bezweifeln. Dass alternative Techniken möglich sind, wird schon dadurch nahegelegt, dass es auch Zauberspiegel gibt, die gar nicht die rückseitigen Ornamente in der Projektion sichtbar machen. Letztlich kommt es nur auf eine äußerst feine Strukturierung der Oberfläche an.

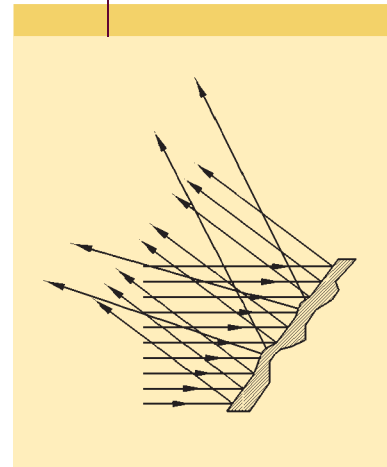
Von einem erfolgreichen Herstellungsverfahren, das auch mit einfachen Mitteln möglich ist, wird in [3] berich-

tet. Dort poliert man ein Messing- oder Kupferblech so lange, bis die Oberfläche spiegelt. Dann wird mit Salpetersäure in die spiegelnde Oberfläche eine Zeichnung hineingätzt und diese anschließend so lange poliert, bis die Zeichnung mit bloßem Auge nicht mehr wahrnehmbar ist. In dieser Veröffentlichung wird auch noch ein weiteres Verfahren beschrieben, das ohne Säure auskommt. Die so hergestellten Zauberspiegel zeigen das selbe Phänomen wie ihre klassischen Vorgänger.

Zum Schluss sei darauf hingewiesen, dass der Zauberspiegel bereits im 19. Jahrhundert Gegenstand der Forschung gewesen ist. Davon zeugen mehrere Arbeiten [4]. Neuere Forschungsergebnisse hat Herbert Maryon 1963 in den Archives of the Chinese Art Society of America publiziert. Dort wird auch auf die Methode des Stanzens hingewiesen, durch die lokale Verhärtungen im Metall hervorgerufen werden, die auf das anschließende Schleifen und Polieren anders reagieren als das übrige Material. Und kürzlich zeigte Cyril Stanley Smith vom MIT auf Mikrophotographien von Zauberspiegeln in die Oberfläche gestanzte Vertiefungen. Auch in einer fachdidaktischen Zeitschrift wurde vor einigen Jahren der Zauberspiegel vorgestellt [5].

Der chinesische Spiegel ist ein Beispiel dafür, wie uns zauberhaft erscheinende Sachverhalte herausfordern, sie durch eine wissenschaftliche Erklärung zu entzaubern. Die Entzauberung erweist sich oft als Zauber, den Wissenschaft auf Menschen ausüben kann.

ABB. 3 | REFLEXION



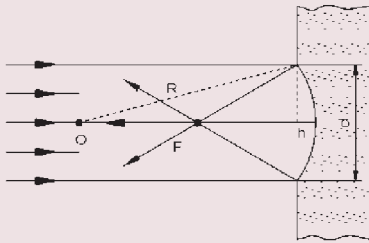
Das Licht wird vorwiegend regulär reflektiert. Lediglich an den leichten Einbuchtungen gibt es eine diffuse Reflexion, die für entsprechend abgedunkelte Strukturen im reflektierten Bild sorgen.

GRÖSSENORDNUNG DER UNEBENHEITEN

Zur Abschätzung der Größenordnung der Unebenheit gehen wir von einer sphärischen Vertiefung der ebenen Spiegelfläche mit einem Durchmesser $d = 2 \text{ mm}$ aus. Diese Vertiefung soll das parallele Strahlenbündel in einer Entfernung von $f = 0,5 \text{ m}$ sammeln. Der Krümmungsradius der sphärischen Vertiefung beträgt demnach $R = 2f = 1 \text{ m}$. Dann ergibt sich nach Abbildung 2 für die Tiefe h der Unebenheit

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}} = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{4R^2}} \right)$$

Da der Wert von $d^2/4R^2$ viel kleiner als 1 ist, kommt man mit einer Taylor-



Entwicklung auf den folgenden Ausdruck:

$$\sqrt{1 - \frac{d^2}{4R^2}} \approx 1 - \frac{d^2}{8R^2}$$

Dann ist $h = d^2/8R^2$. Durch Einsetzen der Zahlenwerte ergibt sich $h = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Es ist klar, dass ein solcher Defekt nicht zu sehen ist, wenn die ganze Oberfläche des Spiegels und die Vertiefung selbst poliert wurden. Bei der Reflexion eines parallelen Lichtbündels zeigt sich jedoch der Defekt im Abbild der Lichtquelle auf dem Schirm. Eine entsprechende Argumentation gilt natürlich, wenn der Defekt keine Vertiefung, sondern eine Erhöhung darstellt.

Abb. Reflexion am Relief der Spiegeloberfläche.

Literatur

- [1] Z. Sheng et al., Acta Metall. Sinica **12**, 1976(1), 13.
- [2] W. Bragg, Die Welt des Lichtes, Vieweg, Braunschweig 1935, S. 28.
- [3] B. P. Sysoyev, Ucebnaia Gizika. **1**, 1997(1), 27.
- [4] J. Parnell, Knowledge **1887**, July 1.
- [5] D. B. Swinson, The Physics Teacher **30**, 1992, 295.

Internet

www.grand-illusions.com/shop.htm
www.cgocable.net/~ywu/mirror.htm

Die Autoren



Hans Joachim Schlichting und Christian Ucke schreiben für Physik in unserer Zeit seit vielen Jahren Artikel für die Rubrik Spielwiese.

Anschriften

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster. schlichting@uni-muenster.de.

Dr. Christian Ucke, TU München, Physikdepartment E20, 85747 München. cucke@ph.tum.de.