

Spiegelbild, Schatten und gespiegelter Schatten

Vertraute Phänomene in unvertrauten Zusammenhängen

Schatten und Spiegelung sind vertraute Abbildungen, unter denen ein Mensch seiner selbst ansichtig werden kann. Weniger vertraut sind Situationen, in denen eine Person im Lichte der Sonne gleichzeitig über zwei Schatten oder einen Schatten und ein Spiegelbild verfügt. Diese auf den ersten Blick erstaunlichen Phänomene sollen im Folgenden dargestellt und physikalisch erklärt werden. Sie können als Beispiele dafür angesehen werden, dass die Schwierigkeit der physikalischen Erklärung nicht in der Kompliziertheit der physikalischen Grundlagen liegen muss, sondern in der Unvertrautheit des lebensweltlichen Zusammenhangs.

*Ich werde mich nächstens
in den Schatten meines Schattens stellen*
GEORG BÜCHNER

1 Schatten und Spiegelbild

Als Peter Schlemihl seinen Schatten an den Teufel verkaufte, musste er bald einsehen, dass ein Leben ohne Schatten nicht lebenswert sei [1]. Wenn er etwas aufmerksamer auf seinen treuen Begleiter geachtet hätte, so wäre ihm bestimmt aufgefallen, dass er in bestimmten Situationen über zwei „Schatten“ verfügte. So wäre es ihm ein leichtes gewesen, sich von einem der Schatten zu trennen und den Rest seines Lebens als gemachter Mann gemeinsam mit dem verbliebenen Schatten zu verbringen.

Für den rational denkenden Menschen unserer Tage hat der Schatten seine mystischen Qualitäten weitgehend eingebüßt. Als bloßes „Loch im Licht“ [2] zeichnet er die Silhouette eines Menschen nach. Aber auch die Allgegenwart künstlicher Lichtquellen hat dazu beigetragen, dass der Schatten bedeutungslos geworden ist. Man hat sich selbst an Situationen gewöhnt, in denen Menschen sich die Begleitung mehrerer Schatten gefallen lassen müssen. Man denke etwa an ein Fußballspiel, das unter Flutlicht ausgetragen wird. Je nach der Entfernung von den jeweiligen Lichtquellen heften sich mehrere mehr oder weniger ausgeprägte Schatten an die Füße der Spieler. Wenn man etwas genauer auf seine Schatten achtet, wird man feststellen, dass manche Schatten gar keine Schatten, sondern Spiegelbilder darstellen und andere lediglich (vor)gespiegelt sind.

Im vorliegenden Beitrag geht es darum, den Blick für das Auftreten von Schatten, Spiegelbildern, gespiegelte Schatten und Schatten von Spiegelbildern in der

natürlichen und wissenschaftlich technischen Welt zu schärfen. Dabei soll insbesondere auf jene ambivalenten Situationen aufmerksam gemacht werden, in denen sowohl Schatten als auch Spiegelbilder auftreten und eine Differenzierung nicht immer sofort auf der Hand liegt. Auch wenn es dabei „nur“ um die Anwendung einfacher Zusammenhänge der geometrischen Optik geht, zeigt sich, dass physikalisches Wissen allein oft nicht genügt, um komplexe Alltagssituationen physikalisch zu beschreiben. Auch das Anwenden will gelernt sein.



Abb. 1: Zwei Abbilder einer Person. Handelt es sich um Spiegelbilder, um Schatten oder um beides?

2 Doppelte Abbilder

Abbildung 1 vermittelt auf den ersten Blick den Eindruck, die abgebildete Person verfüge über zwei Schatten. Jedenfalls haben beide Abbilder das typische strukturlose monochrome Aussehen von Schatten. Auf den zweiten Blick entdeckt man jedoch, dass eines der Abbilder gar kein Schatten ist, sondern das

Spiegelbild der Person darstellt. Die Ähnlichkeit mit dem Schatten verdankt sich einzig der Tatsache, dass die gespiegelte Seite der Person „im Schatten“ der Sonne liegt und daher kaum Farbe und Struktur aufweist. Und das Spiegelbild kann natürlich nicht von besserer Qualität sein als das entsprechende Original.

Anders als ein Schlagschatten der flach auf dem Boden liegt, scheint ein Spiegelbild in den fiktiven Spiegelraum unterhalb des Bodens hineinzuragen, getreu der Regel, dass sich ein Spiegelbild genau so weit hinter der spiegelnden Fläche befindet wie der gespiegelte Gegenstand davor.



Abb. 2: Situation, in der die Unterscheidung zwischen Schatten und Spiegelbild leicht fällt

Wie es bei günstigeren Lichtverhältnissen aussieht, kann man an Abbildung 2 erkennen. Hier hat sich der Fotograf so aufgestellt, dass er die von der Sonne hell erleuchtete Seite der gespiegelten Person zu Gesicht bekommt. Abgesehen von Verzerrungen aufgrund der Unebenheit des Bodens ist das Spiegelbild daher in seinen Farben deutlich zu erkennen. Der Schlagschatten ist hingegen einfarbig, strukturlos und aus der Sicht des Fotografen perspektivisch verkürzt.

Nebenbei gesagt fällt auf, dass der Schatten nicht – wie man vielleicht erwarten würde – schwarz oder grau aussieht, sondern blau. Das erinnert an die blauen Schatten, die man bei strahlend blauem Himmel an weißen Hauswänden beobachten kann. Sie beruhen darauf, dass dort wo kein Sonnenlicht hinkommt, sich das diffus reflektierte blaue Himmelslicht bemerkbar

macht. Es wird zwar auch an anderen Stellen gestreut, jedoch durch das intensive Sonnenlicht so stark überstrahlt, dass es nicht zu erkennen ist. In Abbildung 2 handelt es sich allerdings nicht um eine diffuse, sondern um eine spiegelnde Reflexion des blauen Himmels, die im Vergleich zur diffusen Reflexion des Sonnenlichts auf dem Sandboden so intensiv ist, dass auch die sonnenbeschienenen Teile des benetzten Strandes einen schwachen Blauschimmer aufweisen.

Der Schatten ist eine Projektion – bzw. genauer – ein Loch im Licht, in dem der Schatten werfende Gegenstand steht. Seine Lage ist festgelegt durch die relative Lage von Schattengeber und Lichtquelle. Er kann aus jeder Position wahrgenommen werden. Ein gegebenes Spiegelbild kann demgegenüber nur von einem bestimmten Punkt aus gesehen werden. Verändert man seine Position gegenüber dem Spiegel, so sieht man ein anderes Spiegelbild bzw. im vorliegenden Fall jeweils andere Ansichten der gespiegelten Person.

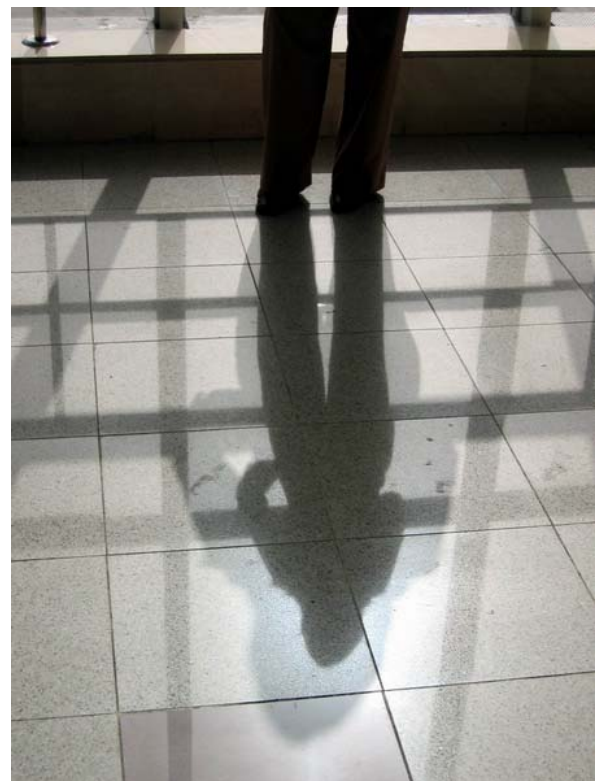


Abb. 3: Man kann den Standpunkt so verändern, dass sich Spiegelbild und Schatten überlagern.

Blickt der Beobachter aus einer Position auf das Spiegelbild der Person (Abb. 3), in der es scheinbar mit dem Schatten zur Deckung kommt, so erkennt man, dass sich die Abbilder nur unvollkommen überlagern und sich in Größe und Proportion unterscheiden. Genauer: Das Schattenbild ist wesentlich breiter. Das ist deshalb der Fall, weil das Spiegelbild weiter entfernt ist als der auf dem Boden „liegende“ Schatten. Das Spiegelbild ragt gewissermaßen senkrecht in die Spiegelwelt unterhalb des Bodens hinein und erscheint dementsprechend stärker perspektivisch ver-

kleinert bzw. zugespitzt als der aufgrund des verhältnismäßig kleinen Einfallswinkels des Sonnenlichts etwas gestauchte Schatten. (Bei einem Einfallswinkel von 45° hätte er gerade Körperlänge und würde passende Proportionen aufweisen).

Eine gewisse Aufweitung des Schattens – insbesondere an den weiter entfernten Teilen – etwa des Kopfes, tritt auch deshalb auf, weil die Sonne eine ausgehende Lichtquelle darstellt: Mit zunehmender Entfernung vom Schattengeber verläuft der Kernschatten (aus dem heraus die Sonne überhaupt nicht zu sehen ist) immer mehr in einen Übergangsschatten (aus dem heraus immer größere Teile der Sonne zu sehen sind).

Dies erkennt man noch deutlicher an den Spiegelungen und Schatten der senkrechten Elemente des Fensterrahmens, der wegen seiner konstanten Breite so etwas wie eine Invariante darstellt, bezüglich der die entgegengesetzt zueinander verlaufende perspektivische Verkleinerung von Schatten und Spiegelbild des Rahmens offensichtlich wird. Der gespiegelte Rahmen, der in der Spiegelwelt des Fußbodens versinkt und sich daher vom Beobachter entfernt, verjüngt sich, während sich sein auf den Beobachter zulaufender Schatten breiter wird.

Dass das Spiegelbild insgesamt einen kleineren Querschnitt als der Schatten der Rahmenelemente aufweist, ist darauf zurückzuführen, dass der Rahmen seitlich angestrahlt wird und daher für die Schattenprojektion ein größerer Querschnitt zum Tragen kommt, als es bei der frontalen Spiegelung des Rahmens der Fall ist.

3 Der Fliesenfußboden – ein hybrides Objekt zwischen Projektionswand und Spiegel

Spätestens an dieser Stelle stellt sich die Frage, wie es denn überhaupt zu einem Schatten auf einem Spiegel kommen kann. Denn damit durch einen Schattenwerfer ein Loch ins Licht gerissen werden kann, bedarf es einer diffus reflektierenden¹ Fläche, einer Projektionswand, von der Licht aus allen Richtungen ins Auge gelangt. Die Ursache für diesen auf den ersten Blick widersprüchlichen Befund ist in der Beschaffenheit der reflektierenden Flächen zu sehen, die so etwas wie ein hybrides Objekt zwischen Projektionswand und Spiegel darstellen. Im Falle des von einem dünnen Flüssigkeitsfilm überzogenen Sandes am Strand (Abb. 2) wird das Licht auf dem Wasserfilm teilweise spiegelnd reflektiert, teilweise dringt es bis auf die Sandschicht durch, wo es teilweise absorbiert und teilweise diffus reflektiert wird. Im ersten Fall kommt es zur Spiegelung, im zweiten zur Schattenbildung.

¹ Da der Terminus Da der Terminus der Lichtstreuung in verschiedenen Kontexten verwendet wird, sprechen wir stattdessen auch von diffuser Reflexion.

Beim Fliesenfußboden ist es ähnlich. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit der Fliesen, die gewissermaßen sowohl matt als auch glatt sind, wird das auffallende Licht zum Teil diffus und zum Teil spiegelnd reflektiert. Die Farbe des diffus reflektierten Lichtes ergibt sich aus einer Mischung der Eigenfarbe des Fußbodens² und der des auffallenden Lichts. Das gestreute Licht wird überlagert vom spiegelnd reflektierten Licht, wodurch der Fußboden je nach den Intensitätsverhältnissen mehr oder weniger glänzend erscheint. Der Glanz besteht aus den Spiegelbildern der Objekte, die gemäß dem Reflexionsgesetz ins Auge des Betrachters gelangen. Wenn die spiegelnde Reflexion überwiegt und die Spiegelbilder als solche erkannt werden, scheint der Fußboden transparent für eine unter ihm liegende Spiegelwelt zu werden.

Das ist insbesondere an den beschatteten Stellen des Fußbodens der Fall. Dort wird kein Licht der dominierenden Lichtquelle diffus reflektiert, so dass die spiegelnde Reflexion der umgebenden Objekte optimal zur Entfaltung kommen kann. Es ist in Abbildung 1 gut zu erkennen, auch wenn die dunkle Seite der Person nur zu einer monochromen Spiegelung führt. Auch dunkle Fliesen zeichnen sich durch eine geringe diffuse Reflexion aus und stellen daher gute Bedingungen für eine Spiegelung dar, wie andeutungsweise in der größeren Prägnanz des gespiegelten Kopfes der Person auf der dunkleren Fliese im Vordergrund von Abbildung 1 zu erkennen ist.

In Abbildung 1 erkennt man außerdem rechts vorn eine starke Aufhellung des Fußbodens derart, dass die diffuse Reflexion und damit die Eigenfarbe des Fußbodens vollkommen überstrahlt werden. Bei einem perfekten Spiegel würde man hier das klar begrenzte Spiegelbild der Sonne sehen. Im vorliegenden Fall reicht die Spiegelung jedoch deutlich über den Bereich hinaus, in dem in Bezug auf den Beobachter Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel ist. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass der Fußboden wie gesagt glatt und matt zugleich ist. Aufgrund einer gewissen Rauigkeit, die zur diffusen Reflexion des Bodens führt, wird das Sonnenlicht auch noch in einem gewissen Bereich reflektiert, die die Stelle der idealen Spiegelung der Sonne umgibt. Es handelt sich hier um ein dem „Schwert der Sonne“ [3] auf dem welligen Wasser entsprechendes Phänomen, bei dem sich die Rauigkeit im Prinzip wie winzige geneigte, statistisch verteilte Spiegel bemerkbar macht.

In der Beobachterposition, in der sich die beiden Abbilder, Spiegelbild und Schatten (Abb. 3) überlagern, kommt es zu einer deutlichen Aufhellung im Bereich des Kopfschattens. Der Beobachter blickt hier genau auf die Stelle, an der das Spiegelbild der Sonne zu sehen wäre, wenn die Sonne nicht durch den Kopf der davor stehenden Person ausgeblendet würde. Merkwürdig mag auf den ersten Blick erscheinen, dass die spiegelnde Reflexion noch zu einem Teil den Schatten aufhellt. Da der Schattenkopf besonders in den peri-

² Als Eigenfarbe bezeichnen wir die Farbe des Lichtes, die vom Fußboden diffus ausgestrahlt wird, wenn er von weißem Licht beleuchtet wird.

pheren Bereichen nicht mehr im Kernschattenbereich liegt, werden die von der Person nicht abgedeckten Teile der Sonne an dieser Stelle reflektiert.

4 Doppelschatten – durch Verdopplung der Lichtquelle

Wenn Abbilder einer Person doppelt auftreten, sind es jedoch nicht immer Schatten und Spiegelbild. Manchmal sind es wirklich zwei Schatten. Nimmt man denn diese Verdopplung des eigenen Schattens überhaupt wahr, ist das Erstaunen darüber meistens sehr groß. Denn wie kann es am helllichten Tage zu zwei Schatten der eigenen Person kommen, wenn außer der Sonne weit und breit keine zweite Lichtquelle vorhanden ist (siehe Abb. 4)?

Blickt man in einer solchen Situation zurück in Rich-



Abb. 5: Doppelschatten an einer kleinen Böschung

tung Sonne, so kommt ziemlich schnell Licht in die Angelegenheit. Im Falle der in Abbildung 4 dargestellten beiden Schatten an einer Böschung sieht man sich doppelt geblendet: Zum einen bricht das Licht der Sonne durch das Blätterdach der Bäume, zum anderen wird das Sonnenlicht auf der Wasseroberfläche eines nahen Gewässers reflektiert (siehe Abb. 5) und damit zu einer sekundären Lichtquelle, wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt ist.

Da das auf dem Wasser reflektierte Licht der Sonne nicht von oben, sondern von schräg unten kommt, kann es nicht auf den Erdboden fallen und dort einen

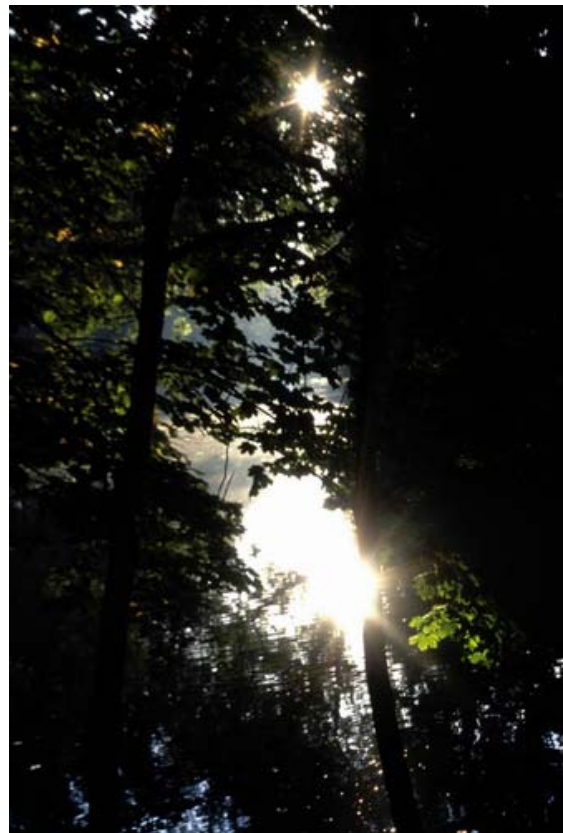


Abb. 4: Sonne und Reflex der Sonne auf der Wasseroberfläche wirken wie zwei verschiedene Lichtquellen.

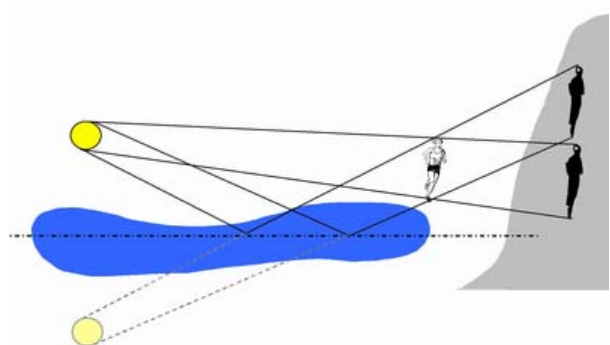


Abb. 6: Schematische Darstellung der Schattenverdopplung

Schatten hervorrufen. Es muss schon eine passend geneigte Projektionswand in der Nähe sein, die beide Schatten gleichzeitig aufzufangen vermag. Im vorliegenden Fall fängt eine kleine Böschung das Licht auf, aus dem die Schattensilhouette der im Wege stehenden Person herausgeschnitten wird.

Man ist vielleicht geneigt, darin einen Grund für die Seltenheit des Phänomens zu sehen. Die Häufigkeit, mit der der Verfasser Doppelschatten beobachtet,

nachdem er sie zum ersten Mal gesehen hatte, spricht zumindest teilweise dagegen: Offenbar muss man selbst dieses auffällige optische Alltagsphänomen sehen lernen. Es gibt nämlich zahlreiche günstige Situationen. So kann man beispielsweise relativ häufig beobachten, dass der primäre Schatten auf den Erdboden und der sekundäre Schatten in Baumkronen oder auf Häuserwände fallen. Meist wird man durch die nur aus dem Augenwinkel wahrgenommene ungewohnte Bewegung des Schattens in der Höhe aufmerksam, die sich völlig synchron mit der Bewegung des primären Schattens vollzieht.



Abb. 7: Im einem Hauseingang erblickt der Fotograf einen sekundären und tertiären Schatten seiner selbst.

Nicht nur Wasserflächen sind geeignete Reflektoren. In der durch Fensterscheiben bestimmten urbanen Welt kommt es nicht selten vor, dass spiegelnde Fensterscheiben den Part der zweiten Lichtquelle übernehmen und Häuserwände die passende Projektionswand darstellen.

In seltenen Fällen beobachtet man sogar Doppelschatten, die sich gänzlich von der Sonne emanzipiert haben und auf einer doppelten Reflexion des Sonnenlichtes beruhen. Es sind gewissermaßen sekundäre und tertiäre Schatten. Eine derartige Situation ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Sonnenlicht wird von zwei Fensterscheiben in leicht unterschiedliche Richtungen reflektiert, weil das eine geschlossen ist und das andere auf „Kipp“ steht (Abb. 8).

Diese Schatten haben die zusätzliche Besonderheit, dass sie entgegengesetzt zur Sonnenstrahlrichtung auftreten. Im Falle einer sehr niedrigen Projektionswand, hätte sogar der Fall eintreten können, dass auch noch der primäre Schatten zu beobachten ge-

wesen wäre. Allerdings hätte er nicht gleichzeitig vom Beobachter fotografiert werden können. Dazu wäre ein weiterer Beobachter erforderlich gewesen.



Abb. 8: Zwei unterschiedlich orientierte Fensterscheiben fungieren als sekundäre und tertiäre Lichtquelle. Sie rufen den in Abbildung 7 dargestellten Doppelschatten hervor.

Manchmal trifft man zwei Schatten seiner selbst an, von denen der eine paradoxerweise nur dann deutlich zu sehen ist, wenn er zufällig auf einen anderen Schatten fällt. Das ist am rechten Bildrand in Abbildung 9 dargestellt.

In diesem Fall fallen die Schatten in eine nur geringfügig voneinander abweichende Richtung. Die schon tief stehende Sonne wird fast streifend an einer Fenster-



Abb. 9: Der Schatten des Schattens ist rechts im Bild nur im Schatten zu sehen.

front reflektiert, und dieser Reflex wirft einen zusätzlichen Schatten an eine Stelle, die voll von der Sonne ausgeleuchtet wird. Da der Sonnenreflex von weitaus geringerer Intensität ist als die direkte Sonnenstrahlung, kann hier kein Schatten gesehen werden. Denn die Lichtintensität nimmt an dieser Stelle kaum wahrnehmbar ab.



Abb. 10: Am Abend, wenn sich die Schatten kreuzen.

Wegen der geringeren Intensität reicht dieser Reflex außerdem nicht aus, einen anderen Schatten der Sonne so aufzuhellen, dass er verschwände. Eine solche Aufhellung würde allerdings ausreichen, dass der durch den Reflex hervorgerufene sekundäre Schatten der Person an dieser Stelle gesehen werden kann, wie in Abbildung 9 wenigstens schemenhaft zu erkennen ist.

Die interessantesten Schatten kann man zu später Stunde in Städten beobachten, wenn die Fensterfronten zu sekundären Lichtquellen werden und dem kräftigen Sonnenschatten eine etwas abgemilderte Variante entgegen halten. In Abbildung 10 ist eine Situation eingefangen, in der neben den kräftigen primären Schatten des von rechts einfallenden Sonnenlichts Schatten auftreten, die durch die Reflexion des Sonnenlichtes in den Schaufensterscheiben hervorgerufen werden und die Originalschatten fast senkrecht überkreuzen. Sehr schön zu beobachten ist, dass die Intensität der Schatten in solchen Überlagerungsgebieten besonders hoch ist. Denn an diese Stellen gelangt weder direktes noch reflektiertes Sonnenlicht.

Bemerkenswert ist weiterhin, dass die in der Mitte des Bildes stehende Person (Pfeil) nicht nur zwei Schatten aufweist, sondern dass außerdem das Spiegelbild der Person, das links im Fenster zu erkennen ist, einen

Schatten hervorruft, der links vorne auf dem Pflaster zu erkennen ist (Pfeil).

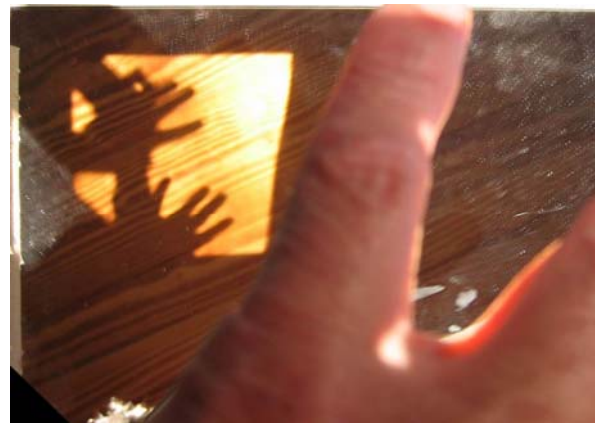


Abb. 11: Doppelschatten im Lichtreflex eines Spiegels



Abb. 12: Wie viele Schatten treten auf?

5 Experimentelle Annäherungen

An diese Beobachtungen lassen sich interessante Fragestellungen z.B. bezüglich der optischen Realität von Schatten anknüpfen. Noch interessanter ist es aber vielleicht, die Phänomene mit einfachen Experimenten nachzustellen.

In einem Freihandversuch kann man einen Doppelschatten hervorrufen, indem man z.B. die eigene Hand vor einen Spiegel hält, der den Reflex einer Lichtquelle auf eine Wand wirft. Man beobachtet dann zwei Schatten aus leicht unterschiedlicher Perspektive (Abb. 11). Man hat es mit einer Abbildung 4 entsprechenden Situation zu tun. Der eine Schatten wird direkt durch die Lichtquelle, der andere durch die gespiegelte Lichtquelle hervorgerufen.

Durch die vorangegangene Beobachtung (Abb. 10) wird ein Experiment nahe gelegt, durch das die ganze Vielfalt von Schatten und ihren Spiegelungen hervor-

gebracht werden kann, die sich ergibt, wenn man einen Schattengeber vor einen Spiegel stellt und mit einer Lichtquelle beleuchtet (Abb. 12). In diesem Fall kann man unter guten Bedingungen nicht weniger als sechs Schatten von Schattengeber und Lichtquelle beobachten. Leider sind die Intensitätsunterschiede oft so gering, dass manche in der direkten Beobachtung des Experiments noch zu sehende Schatten in der Fotografie nicht mehr erkennbar sind.

So erzeugt die echte Kerze einen deutlichen Schatten des Bleistifts. Dasselbe gilt für die gespiegelte Kerze bezüglich des gespiegelten Bleistifts. Daneben sind zwei weniger intensive Schatten zu beobachten, die durch die echte Kerze am gespiegelten Bleistift und die gespiegelte Kerze am echten Bleistift hervorgerufen wird. Außer diesen vier Schatten wirft jede der beiden Kerzen ebenfalls einen Schatten, da sie durch die jeweils andere Kerze beleuchtet wird.

6 Fazit

Obwohl die physikalische Aufklärung dem Schatten und dem Spiegelbild viel von ihren magischen Qualitäten genommen hat, sind sie unseres Erachtens unter einer physikalischen Perspektive nicht uninteressanter geworden. Sie bereichern den Blick und fordern dazu heraus, auf ihre Ursprünge zurückgeführt zu werden, was – wie die vorliegenden Beispiele zeigen – nicht immer trivial ist. Es zeigt sich einmal mehr, dass – wie Georg Christoph Lichtenberg es einmal formuliert hat – *„die Verbindungen von simplen Gesetzen, sehr verwinkelte Erscheinungen gewähren können“*.

Literatur

- [1] CHAMISSO, Adalbert: Peter Schlemihl's wunder-same Geschichte. München 1999.
- [2] BAXANDALL, Michael: Löcher im Licht – München: Wilhelm Fink Verlag 1998.
- [3] SCHLICHTING, H. Joachim: Das Schwert der Sonne- Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. I. Lichtbahnen auf dem Wasser. MNU 51/7 (1998), S. 387- 397; ders.: Das Schwert der Sonne- Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. II. Lichtbahnen in alltäglichen Situationen. MNU 52/6 (1999), S. 330- 336.