

Paradoxe Schatten

Christian Ucke und Hans Joachim Schlichting

Das Licht der Sonne erzeugt von einem in Wasser schwimmenden Ball unter gewissen Bedingungen mehrere Schatten. Dieser scheinbar paradoxe Effekt lässt sich ganz klassisch mit dem Brechungsgesetz erklären.

Würde man sich auf einem Planeten befinden, der um ein System von zwei Sonnen kreist, würde man sich nicht wundern, wenn man hinter einem Gegenstand zwei Schatten sieht. Es gibt tatsächlich derartige, in Wirklichkeit ziemlich unwirtliche Planeten (z.B. Kepler-16b und Kepler-34b). In der Science-Fiction-Saga ‚star wars‘ mit Luke Skywalker wurde ein entsprechender, allerdings lebensfreundlicher Planet namens Tatoonie vorweggenommen.

Sieht man jedoch auf unserer Erde in einem flachen Kinderswimmingpool bei einem schwimmenden, steil von einer Sonne beleuchteten Ball sogar drei Schatten, erzeugt das Irritationen und Neugierde zugleich (Abbildung 1).

Ein kugelförmiger Kunststoffball ($\varnothing = 5,5\text{cm}$) schwimmt etwa halb eingetaucht in 9cm tiefem Wasser. Das steil auf ihn treffende Licht der Sonne erzeugt die in Abbildung 1 wiedergegebenen Schatten. Am Rand der Kugel bildet sich ein konkaver Meniskus aus, wie an der Verzerrung der Schattenlinie gut zu erkennen ist. Die Breite des Meniskus wird aufgrund der Abbildung zu etwa 0,4cm geschätzt. Das genaue Profil des Meniskus hängt von der Oberflächenspannung und der Benetzung der Kugel ab.

In Abbildung 2 sind zwei Querschnitte der Situation dargestellt, einmal von der Seite (links) und senkrecht dazu (rechts). Ein Lichtstrahl geht an der linken Seite der Kugel am Rand der Kugel vorbei und trifft auf den Meniskus. Er



Abb.1: Ein von der Sonne beschienener Ball erzeugt einen dreifachen Schatten.

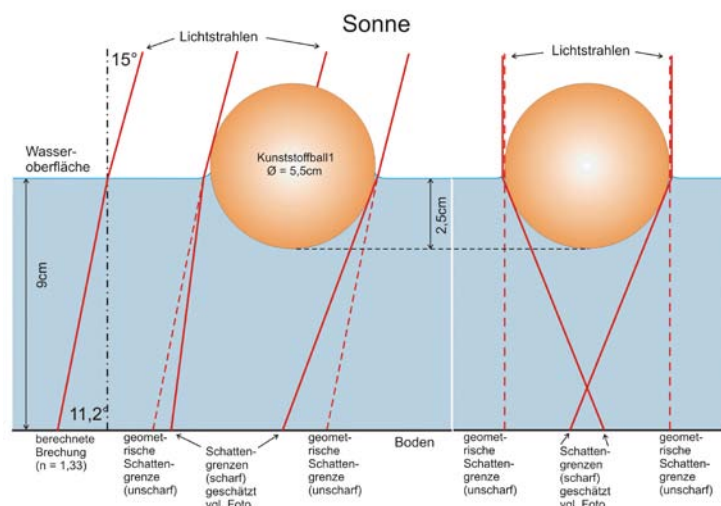


Abb.2: Zwei zueinander senkrechte Querschnitte durch die in Abb. 1 dargestellte Situation. Links verlaufen die Lichtstrahlen in der Zeichenebene, rechts sind sie um 15° gegen die Zeichenebene geneigt. Abmessungen maßstabsgerecht. Die Größe und Form des Meniskus und die Brechung an ihm sind geschätzt.

wird stärker zum Lot hin gebrochen (durchgehende Linie) als ein auf die ebene Wasseroberfläche fallender Lichtstrahl (gestrichelte Linie). Ein Lichtstrahl an der rechten Seite der Kugel, der direkt am Kugelrand am oberen Rand des Meniskus auf die Wasseroberfläche trifft, wird zur Kugel hin gebrochen und an der Oberfläche der Kugel absorbiert. Erst ein Lichtstrahl, der in einem gewissen Abstand von der Kugel auf den Meniskus trifft, wird zur Kugel hin gebrochen und geht unter der Wasseroberfläche am Kugelrand vorbei (durchgehende Linie). Ein auf die ebene Wasseroberfläche fallender Lichtstrahl (gestrichelte Linie) wird weniger stark gebrochen.

Betrachtet man einen dazu um 90° gedrehten Querschnitt (Abbildung 2 rechts), stellt sich die Situation etwas anders dar. Ein an der linken oder rechten Seite der Kugel vorbeigehender Lichtstrahl trifft nunmehr näher an der Kugel auf die Meniskusoberfläche. Da erfolgt die Ablenkung aufgrund des größeren Einfallswinkels der Wasseroberfläche des Meniskus stärker zur Mitte hin. Diese stärkere Ablenkung ist die Ursache der Einschnürung in der Mitte des relativ scharfrandigen Doppelschattens. Die Stärke dieser Einschnürung hängt extrem von der Wassertiefe ab, wie sich unmittelbar aus der Abbildung entnehmen lässt. In dieser Einschnürung sind gegebenenfalls auch hellere Teile sichtbar. Das ist eine Folge von kaustikartigen Lichterscheinungen, die sich durch Überlagerung der gebrochenen Strahlen an unterschiedlich geneigten Bereichen des Meniskus ergeben (siehe z.B. PhiuZ 5/2012 (43)).

Die Auffächerung der Strahlen durch den Meniskus erzeugt eine Aufhellung des Schattens und eine Unschärfe des Schattenrandes, der sich bei einer rein geometrischen Betrachtung ohne Berücksichtigung der Brechung am Meniskus ergeben würde. Das ist der in Abbildung 1 große und unscharfe Schatten mit einem Durchmesser, der etwa dem Balldurchmesser entspricht.

Die Formen und Größen der Schatten verändern sich auch sehr stark in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe der Kugel im Wasser. Taucht die Kugel beispielsweise sehr wenig ein, kommen die Strahlen zwar noch am Rand der Kugel vorbei, gelangen aber nicht zum Meniskus. Bei sehr tief eintauchenden Kugeln werden die Strahlen am Meniskus gebrochen, treffen dann aber auf die Kugel und werden an ihr absorbiert. Die Neigung der Strahlen gegen die Senkrechte spielt ebenfalls eine Rolle.

Grundlage dieser Erscheinung ist der schon 1967 beschriebene, sogenannte ‚Shadow-Sausage-Effect‘ [1]. Die wörtliche Übersetzung mit ‚Würstchen-Schatten-Effekt‘ lässt zunächst keinen Bezug zu der hier beschriebenen Erscheinung erkennen. Der Autor der ersten Publikation zu diesem Effekt hatte bei heller Lichteinstrahlung einen runden Bleistift schräg in ein mit Wasser gefülltes Gefäß gestellt. Der Schatten auf dem Boden des Gefäßes zeigte eine Einschnürung wie bei aneinander gereihten Würstchen (Abbildung 3). Verantwortlich dafür ist der am Rand des eingetauchten Bleistifts vorhandene Meniskus. Mittlerweile haben sich weitere Autoren in mathematisch anspruchsvollen Veröffentlichungen damit befasst [2, 3]. Deren Schwerpunkt liegt allerdings mehr auf den kaustikartigen Erscheinungen.

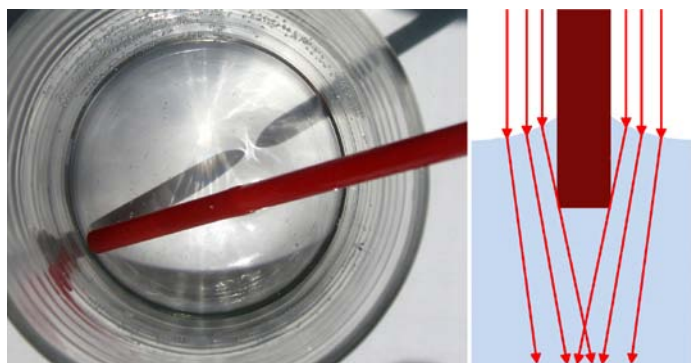


Abb.3: Shadow-Sausage-Effect mit einem Bleistift (aus [4]).

Zusammenfassung

Eine helle Lichtquelle (Sonne, Taschenlampe mit gutem Parallelstrahl) kann unter gewissen Bedingungen von einem im Wasser schwimmenden Ball gleichzeitig mehrere Schatten auf dem Grund erzeugen. Dieser sogenannte Shadow-Sausage-Effekt wurde zwar schon 1967 publiziert, ist jedoch insbesondere mit einem kugelförmigen Objekt wenig bekannt.

Stichwörter

Schatten, Lichtbrechung, Kaustik, shadow-sausage effect

Literatur:

- [1] Adler, Cyrus: SHADOW-SAUSAGE EFFECT, *American Journal of Physics*, Vol. **35** (1967), pages 774-776
- [2] Berry, M. et al.: The shadow of floating objects and vortices, *Optica Acta* **30** (1983), 23-40
- [3] Lock, J. A. et al.: Analysis of the shadow-sausage effect caustic, *APPLIED OPTICS* **42** (2003), 418-428
- [4] Schlichting, H. J.: Optische Marginalien – Phänomene im Trinkglas, erschienen in: Roger Erb & Johannes Grebe-Ellis (Hg.): *Alles, was der Mensch ernstlich unternimmt ist ein Unendliches*. Berlin: Logos 2011, S. 157 – 166

Die Autoren



Christian Ucke und Hans-Joachim Schlichting sind die Begründer der Kolumne Spielwiese.

Anschriften:

Dr. Christian Ucke, Rofanstr. 14B, 81825 München

e-mail: ucke@mytum.de

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster

e-mail: schlichting@uni-muenster.de