

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

WILHELM, T.; HORZ, M.; SCHLICHTING, H. J.

Ein Regenbogen mit Glaskügelchen

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 6, 2014, S. 5 - 10

Ein Regenbogen mit Glaskügelchen

T. Wilhelm, M. Horz u. H. J. Schlichting

1 Der Regenbogen im Unterricht

Jedermann freut sich, wenn er das Schauspiel eines Regenbogens am Himmel beobachtet, das bekanntlich dann zu sehen ist, wenn es dort, wo der Regenbogen entsteht, regnet und gleichzeitig die Sonne scheint. Es handelt sich um ein sehr faszinierendes und emotional positiv besetztes Naturphänomen, das in der Kulturgeschichte und in vielen Religionen besondere Bedeutungen hat [1]. Die Aktion „Frag doch mal“ der „Sendung mit der Maus“ zeigte, dass auch Kinder interessiert sind: „Wie kommt der Regenbogen an den Himmel?“ war die dritthäufigste Frage bei den eingegangenen 75955 Fragen [2].

Neben dem Hauptregenbogen kann man noch viele weitere Teilphänomene entdecken [1]: Da gibt es den Nebenregenbogen mit umgekehrter Farbreihenfolge über dem Hauptregenbogen, die überzähligen Farben des Interferenzregenbogens unterhalb des Hauptregenbogens [3], Alexanders dunkles Band zwischen den beiden Bögen, einen helleren Himmel unterhalb des Hauptregenbogens und die Polarisation des Regenbogenlichtes.

So ist der Regenbogen auch ein Standardthema im Schulunterricht. Im Sachunterricht der Grundschule, wo man stark elementarisieren und reduzieren muss, geht es dabei nur darum zu zeigen, dass Wasser weißes Licht in alle Farben zerlegen kann [4, S. 110]. Ausführlicher wird der Regenbogen in der Regel in der geometrischen Optik in der sechsten bis achten Jahrgangsstufe thematisiert. Dort wird er als eine Anwendung von Brechung und Dispersion behandelt. Man betrachtet zum einen die Anordnung von Sonne, Regentropfen und Beobachter und zum anderen die Farbreihenfolge. Schließlich lässt sich der Regenbogen nochmals in der Sekundarstufe II zur Thematik der Interferenz [3] und Polarisation betrachten.

Zwar ist den Schülern in der Sekundarstufe I klar, dass der Regenbogen nichts Festes ist und man ihn nicht erreichen kann. Vielmehr handelt es sich um ein virtuelles Gebilde, das durch das Zusammenspiel von Sonne, Wassertropfchen und Beobachter entsteht [5]. Trotzdem gibt es Fehlvorstellungen. So ist vielen nicht klar, dass der Beobachter die Sonne im Rücken haben muss. Sehr viele Schüler sind vor dem Unterricht der Meinung, dass man

durch den Regen auf die Sonne schauen muss [5]. Andere ordnen Sonne, Regenwand und Beobachter nicht in einer Linie an, sondern sehen die Regenwand wie einen Spiegel, auf den die Sonne schräg leuchtet (Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Die richtige Anordnung muss deshalb im Unterricht diskutiert und am besten demonstriert werden. Zudem gehen viele Schüler davon aus, dass es an der Stelle des Beobachters bzw. an der Stelle, an der der Bogen entsteht, vor dem Erscheinen des Regenbogens geregnet haben muss oder der Boden nass sein muss [5].

2 Bisherige Experimente

Zur vollständigen Beobachtung der Phänomene und damit ein Schüler selbst erlebt, wie er zur Sonne stehen muss, wäre es optimal, wenn man bei kräftigem Sonnenschein mit dem Wasserschlauch eine Regenwand erzeugt, in der man nur den Regenbogen sieht, wenn man sich in der richtigen Position befindet. Das ist aber im Unterricht in der Regel nicht möglich. Deshalb begrenzt man sich üblicherweise auf zwei Experimente, die jeweils einen Teil darstellen.

Eine (zweidimensionale) „Kugel“ auf der Magnettafeloptik, auf die man über eine Schlitzblende einen weißen Lichtstrahl (oder einen in eine Richtung aufgeweiteten Laserstrahl) als streifenden Lichtfall fallen lässt, zeigt den Strahlenverlauf im Regentropfen und man kann schön den Maximalwinkel zeigen. Ähnliches demonstrieren viele Java-Applets. Allerdings sieht man dabei kein Spektrum und keinen Bogen.

Sehr bekannt ist der Versuch, bei dem man ein Aquarium auf den Overheadprojektor stellt und an der Wand aufgrund von Dispersion ein kräftiges Spektrum erhält [6 - 8], über das sich gut ein Unterrichtsgespräch führen lässt, da alle das Gleiche sehen. Dazu gibt es auch ein Java-Applet [9]. Bei diesem Experiment wird aber nur durch Brechung und Dispersion ein Spektrum als reelles Bild an der Wand erzeugt, während ein Regenbogen erst im Auge des Betrachters entsteht und von jedem an einer anderen Stelle gesehen wird; jeder hat seinen eigenen Regenbogen. Für die Grundschule ist hierbei zwar von Vorteil, dass das Spektrum eine Bogenform hat. Nachteilig ist aber, dass die Anordnung von Lichtquelle,

Regentropfen und Beobachter nicht richtig wiedergegeben wird. Ähnliche Spektren mit ähnlichen Nachteilen erhält man, wenn man einen mit Wasser gefüllten Rundkolben (Schusterkugel) oder ein Glasprisma mit weißem Licht bestrahlt.

3 Ein Regenbogen mit Glaskügelchen

3.1 Vorbereitung

Eine Lösung dieser Problematik erhält man mit einem einfachen Freihandversuch, der schon längere Zeit bekannt ist und in einigen Arbeiten beschrieben wurde [10 - 12]. Die Wassertropfen werden dabei durch sehr kleine Glaskügelchen ersetzt, die man bei Sandstrahlverfahren benutzt. In diesen Verfahren werden je nach zu behandelnder Oberfläche andere feinkörnige Granulate mit Druckluft auf eine Oberfläche geschossen. Einige Verfahren verwenden Glaskügelchen, die es mit unterschiedlichem Durchmesser gibt und „Strahlsand“ oder „Strahlmittel“ genannt werden. Zur Beobachtung eines Regenbogens eignen sich Glaskugeln mit einem Durchmesser von etwa 200 – 500 μm , die damit in etwa die Größe von kleinen Regentropfen haben – Tropfen im Nieselregen haben eine Größe von 0,05 bis 0,25 mm und normale Regentropfen eine Größe von 0,25 bis 3,0 mm [1]. Viele Anbieter verkaufen die Strahlmittel nur in Mengen von 25 kg; vereinzelt findet man jedoch auch Angebote mit Portionen von 2,5 kg, die völlig ausreichen (z.B. [13]). Selbst bei den kleinen Packungsgrößen belaufen sich die Kosten nur auf 0,80 € pro kg.

Für eine kurze Vorführung genügt bereits ein schwarzer Stoff, auf den man die Kügelchen streut und dann beleuchtet. Dauerhaftigkeit erhält man, wenn man die Kügelchen auf einen schwarzen Fotokarton (50 × 70 cm) aufklebt. Einfach und schnell geht es, wenn man den Karton mit Sprühkleber aus dem Baumarkt besprüht und anschließend die Kügelchen darauf streut – je dichter umso besser. Damit Sprühkleber und Glaskügelchen nicht auf dem Fußboden landen, empfiehlt sich dabei ein Arbeiten im Freien. Billiger geht es mit einem mit Wasser verdünnten Holzleim – etwas Geschick vorausgesetzt. Der Karton kann auch auf ein Brett aufgeklebt werden und so in die Sonne oder den Lichtkegel eines Strahlers gehalten werden. Alternativ eignet sich auch ein schwarzes



Abb. 1: Holzplatte mit schwarzem Karton und Glaskügelchen in der Sonne (Abstand ca. 2 m)

Abb. 2: Fotograf geht in der Sonne nahe an die Glaskügelchenplatte (Abstand < 1 m)



Brett, z. B. eine Schrankrückwand. Im Hinblick auf eine bessere Aufbewahrung wurden für die Version in Abb. 1 zwei schwarze Kartons der Größe DIN A2 verwendet. Diese wurden auf zwei entsprechend zugeschnittenen Holzbrettern befestigt, die zuvor mit zwei Gelenken miteinander verbunden wurden. Die so entstandene Version kann zusammengeklappt in einem Schrank gelagert werden, sodass sie jederzeit griffbereit ist. Der Aufwand und die Kosten sind gering, am teuersten ist der Sprühkleber (ca. 10 €).

3.2 In der Sonne

Am einfachsten ist es, wenn man die so hergestellte Platte einfach in die Sonne hält. Jeder Zuschauer muss nun für sich selbst herausfinden, von welchem Ort aus er den Regenbogen sieht. Dabei ist es sehr wichtig, dass er ein Auge geschlossen hält und nur mit dem anderen Auge schaut, da jedes Auge den Bogen an einer anderen Stelle sieht, was sich bei beidäugigem Sehen ungünstig überlagert.

In einem größeren Abstand (ca. 2 m) sieht man einen Ausschnitt aus einem kreisförmigen Regenbogen (siehe Abb. 1), dessen Farbreihenfolge der des natürlichen Regenbogens entspricht. Ein Nebenbogen ist nicht zu sehen. Denn bei einem Brechungsindex von 1,5 ergibt sich ein Ablenkungswinkel von etwa 87° . Und dieser Winkel ist zu dicht an 90° , als dass man ihn durch direkten Blick auf die Glaskugelchenplatte sehen könnte (siehe unten).

Auffällig ist auch der Unterschied in der Helligkeit zwischen dem Bereich unter und über dem Bogen. Unterhalb des Bogens ist es heller, oberhalb dunkler. Die Dunkelheit ist wie beim Wasserregenbogen darauf zurückzuführen, dass zwischen dem Bogen 1. und dem 2. Ordnung praktisch kein Licht fällt (Alexanders dunkles Band). Als Band lässt sich diese dunkle Zone jedoch beim Glaskugelregenbogen nicht wahrnehmen, weil man den Bogen 2. Ordnung nicht sieht. Bei genauer Betrachtung kann man auch unterhalb der violetten Farbe im Bogen nochmals eine hellere Farbe sehen, die dort nach der geometrischen Strahlenoptik nicht sein dürfte; sie entsteht durch Interferenz (überzähliger Bogen).

Wenn man sehr nahe an die Platte herangeht (< 1 m), sieht man sogar einen vollständigen Kreis (Abb. 2), dessen Mittelpunkt auf der Linie durch die Sonne und das Auge liegt. Im Inneren des Bogens ist nun der Schatten des eigenen Kopfes zu sehen [14]. Außerhalb ist es wieder dunkler als in der Mitte.



Abb. 3: Ausschnitt aus dem Bogen, betrachtet aus 4 m Abstand von der Tafel (zweite Sitzreihe)

Abb. 4: Anordnung, um an der Tafel einen Vollkreis eines Regenbogens zu sehen (Abstand von der Tafel 0,6 m)



Beim Betrachten wird deutlich, dass die Beobachtung stark vom Standort des Betrachters abhängt. Von verschiedenen Beobachtungsorten aus wird der Bogen von jeweils anderen Glaskügelchen hervorgerufen, d.h. jeder Beobachter sieht den Bogen an einem anderen Ort. Dies ist beim natürlichen Regenbogen nicht anders, auch wenn man es in dem Fall nur erschließen kann, während die Schüler es hier direkt sehen können. Insofern hilft der Glaskügelchenbogen, das Verständnis des natürlichen Regenbogens weiter zu veranschaulichen und zu vertiefen. Die Lage des Bogens ist eng mit der Position des Beobachters verbunden; denn das Licht gelangt letztlich durch eine Spiegelung in sein Auge. Auch Spiegelbilder sind nichts Festes, an einem bestimmten Ort Fixiertes, sondern etwas Virtuelles.

Beim Kügelchenregenbogen misst man einen Regenbogenwinkel von knapp 22°. Dieses Ergebnis stimmt mit dem berechneten Wert (siehe unten) gut überein.

3.3 Im Klassenzimmer

Der Versuch kann auch sehr einfach im Klassenzimmer durchgeführt werden. Im einfachsten Fall benutzt man als Lichtquelle den Overheadprojektor. Dabei können alle Schüler gleichzeitig einen Regenbogenausschnitt sehen (siehe Abb. 3). Hat man den Overheadprojektor an seinem üblichen Ort (Abstand zur Tafel etwa 1 m) und stellt die Glaskügelchenplatte auf die untere Tafelleiste (Höhe etwa 1,3 m), kann man von vielen Positionen des Klassenraums zumindest den linken oder rechten

Ausschnitt des Bogens sehen. Hier liegt nun die Lichtquelle nicht mehr hinter sondern vor dem Betrachter, aber der Bogen ist weiterhin Teil eines Kreises um den Durchstoßpunkt, an dem die Linie Lampe – Auge die Kugelwand trifft. Da der Winkel zwischen Lampe, Glaskügelchen und Beobachter mit ca. 22° recht klein ist, dürfen die Schüler nicht zu weit von der Verbindungslinie Lampe – Glaskügelchen entfernt sein. Zusätzlich sollte die Anordnung so gewählt werden, dass man wie gewohnt einen Ausschnitt des oberen Teils des Bogens sieht und nicht einen Ausschnitt aus dem unteren Teil.

Um die Anordnung bei einem echten Regenbogen besser nachzustellen, kann man den Overheadprojektor auch erhöht auf den Versuchstisch und die Glaskügelchenplatte in Kopfhöhe stellen und die Schüler einzeln zwischen Lampe und Tafel treten lassen (siehe Abb. 4). Diese sehen nun mit einem geschlossenen Auge auf der Glaskügelchenplatte einen vollen Kreisbogen. Mit einer Ausnahme sind die Beobachtungen identisch zur Durchführung in der Sonne: Da das Licht nicht mehr parallel ist, ändert sich allerdings der Durchmesser des gesehenen Bogens mit dem Abstand der Platte von der Lichtquelle. Alternativ kann auch ein Diaprojektor im hinteren Bereich des Klassenzimmers als Lichtquelle dienen.

Dieser Effekt kann von den Schülern genutzt werden, indem sie mit der Leuchte (z. B. eine Taschenlampe) in der Hand vor der Platte stehen und durch Variation des Abstands der Leuchte von der Platte den

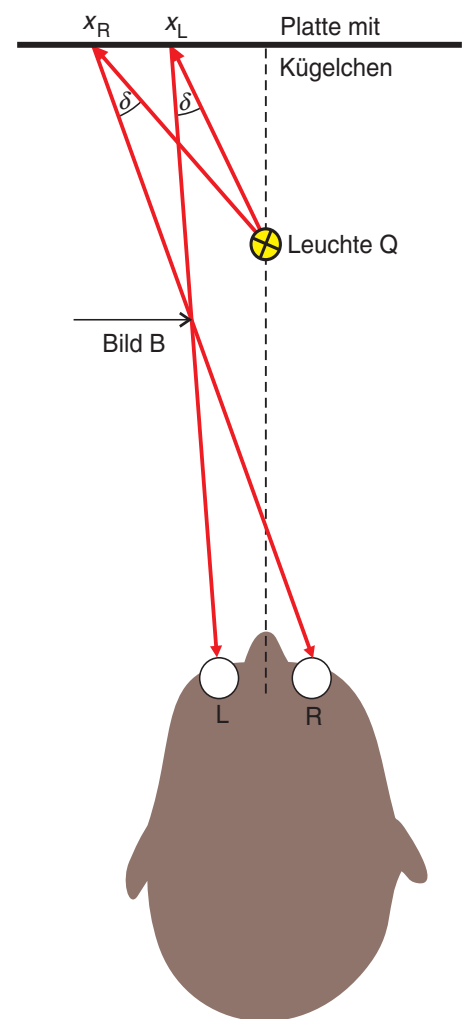


Abb. 5: Schematische Darstellung zum 3D-Sehen. L und R bezeichnen die Lage des linken und rechten Auges, Q die Punktlichtquelle, B die scheinbare Position des Bogens. Von x_R und x_L reflektieren die Kügelchen Licht ins rechte und linke Auge.

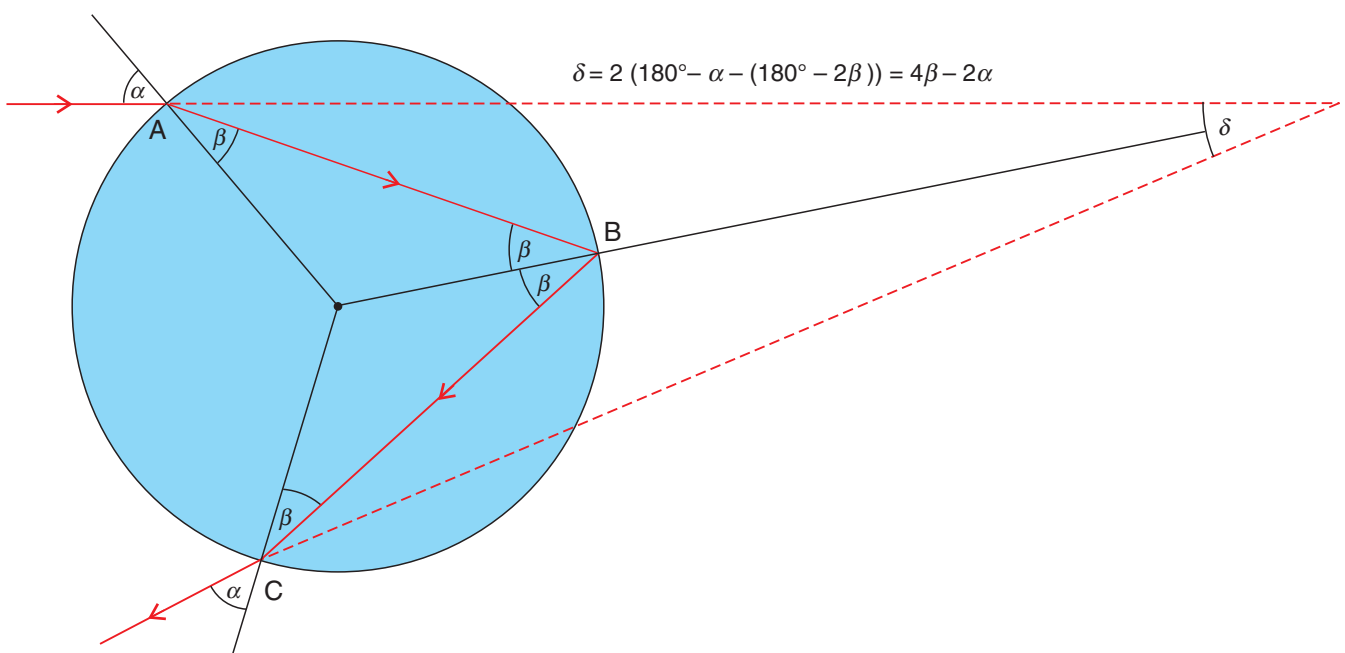


Abb. 6: Zusammenhang zwischen den Winkeln bei einer Reflexion im Tropfen. Hier wurde der Winkel gezeichnet, bei dem für rotes Licht im Glas ($n = 1,50$) der Hauptregenbogen entsteht ($\alpha = 49,8^\circ$, $\beta = 30,6^\circ$, $\delta = 22,8^\circ$).

Regenbogen schrumpfen und wachsen lassen können. Dabei werden sie beim beidäugigem Sehen vermutlich ein weiteres faszinierendes Phänomen entdecken. Der Bogen ist nicht auf der Platte bzw. in den Kügelchen zu sehen, sondern er hängt gewissermaßen in der Luft. Es handelt sich um ein 3D-Phänomen. Das erkennt man daran, dass beim Schließen eines Auges der Bogen auf die Platte zurückzukehren scheint, um sich wieder phantomhaft in den Raum zu erheben, sobald man das zweite Auge öffnet.

Die Räumlichkeit des Bogens lässt sich mit dem beidäugigen Sehen erklären, das bei nicht allzu großen Abständen wirksam ist. Jedes Objekt wird von den beiden Augen dem Augenabstand entsprechend verschoben gesehen. Die Geometrie dieser Situation ist in Abb. 5 dargestellt. Wenn das linke Auge auf x_L und das rechte auf x_R blickt, kommt es zum Verschmelzen beider Bilder und damit zur Tiefenwahrnehmung bzw. zum räumlichen Sehen des Regenbogens. Dabei entsprechen die Winkel $Q_{x_L}L$ und $Q_{x_R}R$ dem Regenbogenwinkel von 22° .

Bei nicht passenden Abständen gelingt es nicht, die beiden Bilder zu verschmelzen. Dann sieht jedes Auge seinen eigenen Bogen auf der Platte (siehe oben). In einem solchen Fall empfiehlt es sich, ein Auge zu schließen.

4 Unterschiede bei der Verwendung von Glas statt Wasser

Die Beobachtungen mit Glaskügelchen sind nicht identisch mit den Beobachtungen an Wassertropfen: Die Farbreihenfolge des Hauptbogens ist in beiden Fällen erwartungsgemäß gleich. Aufgrund des größeren Brechungsindex verkleinert sich jedoch der Öffnungswinkel und der Nebenbogen ist nicht zu sehen (siehe oben). Dies soll anhand der Abbn. 6 und 7 begründet werden, in denen die bekannten Strahlenverläufe bei einem kugelförmigen Tropfen dargestellt sind.

4.1 Der Hauptbogen

Im Punkt A der Abb. 6 wird ein Teil des Lichtes gebrochen und ein Teil reflektiert; ebenso in B und C. Für den Hauptbogen ist nur der geringe Anteil relevant, der im Punkt A in den Wassertropfen eintritt, in B reflektiert wird und in C wieder aus dem Tropfen herauskommt, weshalb in Abb. 6 nur dieser Anteil eingezeichnet ist. Lichtstrahlen treten in unterschiedlichen Höhen („Stoßparameter“) und damit in unterschiedlichen Winkeln α in den Tropfen ein und deshalb in unterschiedlichen Winkeln δ zum Einfallsstrahl wieder aus.

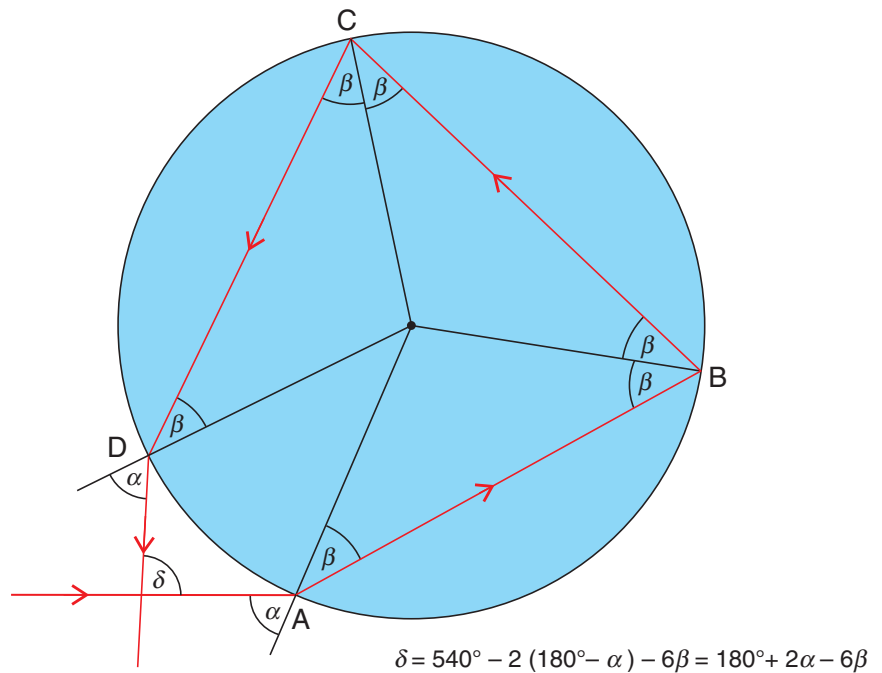


Abb. 7: Zusammenhang zwischen den Winkeln bei zwei Reflexionen im Tropfen. Hier wurde der Winkel gezeichnet, bei dem für rotes Licht im Glas ($n = 1,50$) der Nebenregenbogen entsteht ($\alpha = 66,7^\circ$, $\beta = 37,8^\circ$, $\delta = 86,9^\circ$).

Elementare Geometrie (Summe der Innenwinkel im Dreieck) ergibt für den Winkel δ zwischen dem eintreffendem und dem reflektiertem Lichtstrahl $\delta = 4\beta - 2\alpha$, worin α und β durch das Brechungsgesetz gemäß $\sin \alpha = n \sin \beta$ miteinander verknüpft sind. Während für α alle Winkel zwischen 0° und 90° möglich sind, kann der Winkel δ nur Werte zwischen 0° und einem Maximum annehmen.

Dieses Maximum für den Winkel δ ist vom Brechungsindex abhängig und kann sowohl numerisch als auch analytisch bestimmt werden. In einer numerischen Berechnung werden zum Beispiel in Excel zu einem festen Brechungsindex n für alle möglichen Werte von α die zugehörigen Winkel β und δ berechnet und anschließend der maximale Wert für δ gesucht. Eine entsprechende Excel-Datei findet man in den Online-Ergänzungen der Zeitschrift. Setzt man

$$\beta = \arcsin(1/n \sin \alpha)$$

in

$$\delta = 4\beta - 2\alpha$$

ein, erhält man

$$\delta = 4 \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \alpha\right) - 2\alpha.$$

Für die analytische Lösung des Maximalwertes muss dieser Ausdruck nach dem Einfallswinkel α differenziert und Null gesetzt werden. Mit etwas Algebra findet man, dass der zum maximalen Winkel δ gehörende Einfallswinkel α durch

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$$

bestimmt ist, woraus δ berechnet werden kann.

Für die Brechung Luft – Wasser findet man für rotes Licht ($n = 1,331$) den bekannten Wert $\delta_{\max} = 42,4^\circ$ und für blaues Licht ($n = 1,343$) $\delta_{\max} = 40,7^\circ$. Die äußere Fläche eines Lichtkegels, der von einem Wassertropfen unter dem Winkel von $42,4^\circ$ ausgeht, besteht daher aus rotem Licht, denn blau kann unter diesem Winkel nicht austreten. Beim Blick auf die beleuchteten Tropfen einer Regenwand sieht ein Beobachter so unter dem Winkel von $42,4^\circ$ einen Bogen aus rotem Licht. Die anderen Farben folgen nach innen in der bekannten Reihenfolge.

Bei der Brechung Luft – Glas ist der Brechungsindex von der verwendeten Glasorte abhängig. Bei den verschiedenen Glassorten findet man Brechungsindizes von 1,45 bis 2,14. Für einfaches Glas, von dem man hier ausgehen kann, kann man einen Brechungsindex von ungefähr 1,5 annehmen. Auf jeden Fall ist der Brechungsindex größer als für Luft – Wasser und alle bekannten Glassorten besitzen für blaues Licht einen größeren Brechungsindex als für rotes Licht (normale Dispersion). Hieraus ergibt sich, dass die Reihenfolge der Farben in jedem Fall erhalten bleibt (rot außen, blau innen), der Radius des Regenbogens mit zunehmendem Brechungsindex jedoch kleiner wird. Für einen

Brechungsindex von $n = 1,50$ ergibt sich $\delta_{\max} = 22,8^\circ$ (siehe Abb. 6).

4.2 Der Nebenbogen

Im Strahlengang für den Nebenbogen findet sich eine weitere Reflexion des Lichtstrahls im Inneren des Wassertropfens. Für den Winkel δ zwischen dem einfallenden und dem reflektierten Lichtstrahl findet man in diesem Fall (Summe der Innenwinkel im Fünfeck) $\delta = 180^\circ + 2\alpha - 6\beta$, worin α und β wiederum durch das Brechungsgesetz miteinander verknüpft sind (siehe Abb. 7). Die Berechnung des minimalen Winkels δ erfolgt numerisch oder analytisch analog zur Berechnung am Hauptbogen. Hier erhält man

$$\delta = \pi + 2\alpha - 6\arcsin\left(\frac{1}{n}\sin\alpha\right)$$

und das Minimum von δ für den Einfallswinkel

$$\alpha = \arcsin\sqrt{\frac{9-n^2}{8}}$$

Für rotes Licht bei Wassertropfen ($n = 1,331$) ergibt sich das Minimum $\delta_{\min} = 50,4^\circ$ und für blaues Licht ($n = 1,343$) findet sich $\delta_{\min} = 53,5^\circ$. Da nun im Tropfen eine Reflexion mehr auftritt, überschneiden sich blaue und rote Lichtstrahlen noch einmal und die Reihenfolge der Farben in den beiden Bögen ist vertauscht.

Berechnungen ergeben, dass die Zahlenwerte des Minimums mit dem Brechungsindex ansteigen und für $n = 1,518$ die 90° -Grenze überschreiten. Für einfaches Glas mit $n = 1,50$ ergibt sich $\delta_{\min} = 86,9^\circ$ (siehe Abb. 7). Der Nebenbogen ist damit bei den Glaskügelchen nicht oder nur mit großer Mühe zu sehen.

5 Weitere Einsatzmöglichkeiten

Glaskügelchen werden auch großflächig zu Markierungsarbeiten auf Zebrastrifen verwendet [15]. Diese sind bis auf den Durchmesser von derselben Art wie die Kügelchen zum Sandstrahlen. Den Regenbogeneffekt zeigen sie nur, wenn sie locker auf dem Boden liegen – entweder beim Aufstreuen oder später durch Zerfall der Markierungen. Diese Kügelchen erfüllen einen ganz bestimmten Zweck. Sie sorgen nämlich dafür, dass das Licht in etwa in die Richtung zurückgestrahlt wird, aus der es kommt. Auf diese Weise erscheint der Zebrastrifen denjenigen besonders hell, die in etwa aus derselben Richtung blicken, wie die Scheinwerfer strahlen. Das sind beispielsweise die Autofahrer. Dieser Retroreflexionseffekt ist in der Natur als Heiligenschein bekannt [16]. Dort sind es klei-

ne Wassertropfchen auf Grashalmen, die das Sonnenlicht in der Nähe des Kopfschattens des Betrachters in etwa zur Sonne und das heißt auch zum Beobachter zurückstrahlen. Auch auf Verkehrsschildern, Nummernschildern von Kraftfahrzeugen u. ä. werden Folien verwendet, die zum Zwecke der Retroreflexion mit transparenten Glas- bzw. Kunststoffkügelchen besetzt sind [17].

Hat man schon einmal diese billigen Glaskügelchen, kann man sie auch für einen weiteren Versuch nutzen: Man streut sie auf eine glatte Oberfläche und setzt einen Klotz darauf. Stößt man den Klotz an, gleitet er sehr gut über die Kügelchen. Man kann damit zeigen, dass die Rollreibung viel kleiner als die Gleitreibung ist. So hat man eine fast reibungsfreie Bewegung ohne großen Aufwand. Verständlicherweise sollten deshalb die Kügelchen nicht auf dem Boden kommen, da sonst die zum Gehen nötige Haftreibung fehlt.

6 Fazit

Das Experiment mit den aufgeklebten Glaskügelchen ist sehr einfach durchzuführen, kostengünstig und faszinierend. Mit dessen Hilfe lassen sich manche Eigenschaften des Regenbogens wie die Farbordnung, das virtuelle, individuelle Bild und die Aufhellung im Innern des Bogens gut zeigen. Andere Phänomene wie der Nebenregenbogen werden nicht wiedergegeben. Der Versuch funktioniert sowohl im Sonnenlicht wie auch mit künstlichen Lichtquellen im Klassenzimmer. ■

Literatur

- [1] M. Vollmer, *Lichtspiele in der Luft. Atmosphärische Optik für Einsteiger*, München: Spektrum Akademischer Verlag, 2005
- [2] D. Nase, *Frag doch mal ... Die meistgestellten Fragen an die Maus*, München: cbj, 2005
- [3] H. Dittmann & W. Schneider, *Zur Deutung der inneren Regenbögen*, in: K.-H. Lotze & W. Schneider (Hrsg.), *Wege in der Physikdidaktik, Band 5 Naturphänomene und Astronomie*, Erlangen und Jena: Palm & Enke, 2002, S. 42–56, www.solstice.de
- [4] H. Wiesner & E. Heran-Dörr, *Themenfeld Licht und Sehen*, in: J. Kahlert & Reinhard Demuth (Hrsg.), *Wir experimentieren in der Grundschule - Band 2, Einfache Versuche zum Verständnis physikalischer und chemischer Zusammenhänge*, Aulis-Verlag, 2010, S. 79–111
- [5] T. Wilhelm & P. Henninger, *Schülvorstellungen zum Regenbogen*, in: *PhyDid-B - Didaktik der Physik - Frühjahrstagung Mainz 2012*, <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/334/457>
- [6] H. J. Schlichting, *Natur freihand - Optische*

Naturphänomene in Freihandexperimenten, in: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 48, Heft 7, 1999, S. 12–17

- [7] M. Uhlenbrock & H. J. Schlichting, *Die Regenbogen – Lampe*, in: *Vorträge / Physikertagung, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik, Tagung 1999, 2000, S. 501–506*
- [8] H. J. Schlichting, *Ein Regenbogen ohne Regentropfen*, *Physik in unserer Zeit 37, Heft 5, 2006, 242–244*
- [9] <http://www.natsim.net/ejs/schlichtingbow/>
- [10] F. S. Crawford, *Rainbow Dust*, in: *American Journal of Physics 56, 1988, S. 1006*
- [11] A. Haußmann, *Beobachtung und Simulation des Glasperlenbogens in divergentem Licht*, *Meteoros 11/9, 2008, S. 165*
- [12] W. Lewin & W. Goldstein, *Es funktioniert. Vom Vergnügen, endlich Physik zu verstehen*, München: Albrecht Knaus Verlag, 2011, S. 146–149
- [13] *Glaskügelchen zum Sandstrahlen: http://www.strahlmittelshop.de/sms/product_info.php/info/p47_2-50-kg-Strahlmittel-Strahlsand-Asilikos-Koernung-0-20-0-50-mm.html*
- [14] http://vorsam.uni-ulm.de/ASP/OArchiv_Images.asp?OrdnungsNr=O-091 (Bild ganz unten)
- [15] H. J. Schlichting, *Man kann sich nicht nur auf das Denken verlassen. Low-cost-Experimente zwischen Lebenswelt und Physik*, in: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Heft 5, 2011, S. 5–13*
- [16] H. J. Schlichting & M. Uhlenbrock, *Jedem sein Heiligenschein*, in: *Physik in unserer Zeit 30/4, 1999, S. 173–175*
- [17] H. J. Schlichting & M. Uhlenbrock, *Der Heiligenschein auf dem Verkehrsschild*, in: *Physik in unserer Zeit 30/6, 1999, S. 259–260*

Online-Ergänzung

Eine Excel-Datei, mit der man für einstellbare Brechungsindizes zu jedem Eintrittswinkel α den Winkel β und δ für eine und für zwei Reflexionen sowie den Maximal- bzw. Minimalwert berechnen kann, findet man in den Online-Ergänzungen der Zeitschrift.

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de;
OStR Dr. Markus Horz, Gymnasium Philipppinum Weillburg, Lessingstr. 33, 35781 Weillburg, E-Mail: markus.horz@gmx.de;
Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Institut für Didaktik der Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster, E-Mail: schlichting@uni-muenster.de.