

Spiegelbilder der Sonne im Tropfen – Zur Phänomenologie des Regenbogens

Marc Müller, Johannes Grebe-Ellis

Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik, AG Didaktik der Physik
Newtonstr. 15, 12489 Berlin, marc.mueller@physik.hu-berlin.de

Kurzfassung

Ausgehend von der Betrachtung einer typischen Lehrbucheklärung des Regenbogens stellt sich die Frage, ob und wie es möglich ist, dieses Phänomen aus derjenigen Perspektive zu erklären, aus der es auch beobachtet wird. Anhand der in einem beleuchteten Tropfenmodell sichtbaren Leuchtenbilder und ihrer Veränderungen während eines Rundgangs um die Wasserkugel kann der erste Schritt zu einer solchen Phänomenologie des Regenbogens dargestellt werden.

1. Einleitung

Die Faszination des Regenbogens ist nicht nur im Alltag ungebrochen, sie hat auch immer wieder neue wissenschaftliche Betrachtungen und Untersuchungen dieses Phänomens motiviert. Davon zeugt das unüberschaubar große Schrifttum über den Regenbogen aus den vergangenen zwei Jahrtausenden. Der Regenbogen wurde gewissermaßen den jeweils bekannten und anerkannten Naturerkenntnissen entsprechend immer neu erklärt.

Im Folgenden wird der erste Schritt einer Erschließung des Regenbogenphänomens dargestellt, die ein Verständnis seines Zustandekommens erlaubt, dabei aber auf den in der physikalischen Optik etablierten Typus der Erklärung optischer Phänomene mithilfe von Lichtmodellen verzichtet. Dieses Vorgehen entspricht dem einer „erscheinungsorientierten“ oder „phänomenologischen“ Physik, wie sie z.B. von MAIER, V. MACKENSEN, OHLENDORF, SCHÖN und GREBE-ELLIS vorangetrieben wird (vgl. z.B. [1], [2], [3]).

Der zweite Abschnitt behandelt die Frage, warum es – zumal in der Schule – überhaupt sinnvoll ist, eine *Phänomenologie* des Regenbogens zu betreiben. Im Anschluss daran wird im dritten Abschnitt die hier verfolgte Methode skizziert, deren Durchführung im vierten Abschnitt anhand eines „Rundgangs um eine beleuchtete Wasserkugel“ beschrieben wird. Abschließend folgt ein Ausblick auf die weiteren, aus der zunehmend sichtbar werdenden Struktur des Phänomens sich ergebenden Schritte zur systematischen Erschließung des Regenbogens.

2. Weshalb eine *Phänomenologie* des Regenbogens?

Der Regenbogen mit seiner Mehrzahl an nicht immer zugleich erscheinenden Strukturen tritt uns in der Natur als ein wohl geordnetes und zugleich komplexes Phänomen gegenüber. Wenn wir den Blick vom Schatten unseres Kopfes, der stets zum

Mittelpunkt aller kreisförmigen Strukturen fällt, über die Atmosphäre radial nach außen wenden, überschauen wir zuerst einen immer heller werdenden Bereich (Abb. 1). Dieser geht in den ersten Hauptbogen – den Primärbogen – über, mit der bekannten Farbfolge seiner Teilbögen von Violett und Blau über Grün bis Gelb und Rot. An den meist sehr intensiven roten Teilbogen schließt sich abrupt ein deutlich dunklerer Bereich an – ALEXANDERS Dunkles Band (benannt nach ALEXANDER VON APHRODISIAS) – der außen vom zweiten Hauptbogen – dem Sekundärbogen – begrenzt wird. Der zweite Hauptbogen ist weniger hell als der erste; er zeigt die gleichen Farben, aber in umgekehrter Reihenfolge. Oft schließt sich auch hier an den blauen Teilbogen ein heller Bereich an. Mitunter erscheinen in den beiden aufgehellten Bereichen überzählige farbige Bögen.



Abb.1: Regenbogenansicht mit dem Schatten des Beobachterskopfes im Mittelpunkt der Bögen [4].

Es lohnt sich, kurz eine typische Lehrbucheklärung der genannten Regenbogenstrukturen zu betrachten, da vor diesem Hintergrund der Gewinn der phänomenologischen Herangehensweise besonders deutlich wird. Abbildung 2 (oben) zeigt eine von MINNEART übernommene schematische Darstellung

der Situation: Von einer unendlich fern gedachten Sonne aus strahlen unendlich viele Lichtstrahlen – von denen fünf ausgewählte eingezeichnet sind – in den Tropfenquerschnitt hinein, werden an dessen Rückseite reflektiert, und gelangen schließlich zum Auge des Beobachters (auf die Darstellung der Dispersionseffekte beim Durchqueren der Grenzflächen wurde verzichtet). Interessant hierbei ist die *Art der Darstellung* bzw. die *Perspektive*, die zum Phänomen eingenommen wird: Man blickt typischerweise *von der Seite* auf die Ebene (die Darstellungsebene von Abb. 2), in der sich der gesamte Erscheinungszusammenhang des Regenbogen einstellt. Aus dieser „abgelösten“ Perspektive ist der Regenbogen indes nicht beobachtbar. Dies scheint aber gerade ein charakteristisches Merkmal der meisten Erklärungsansätze gegenüber dem Regenbogen zu sein, dass man die „eingebundene“ Perspektive, in der das Phänomen erscheint, *verlässt*, um es zu erklären. Demgegenüber lautet die für den phänomenologischen Ansatz interessante Frage, zu deren Beantwortung die Skizze in Abbildung 2 überhaupt nichts beiträgt: *Was sieht der Beobachter eigentlich im Tropfen?*

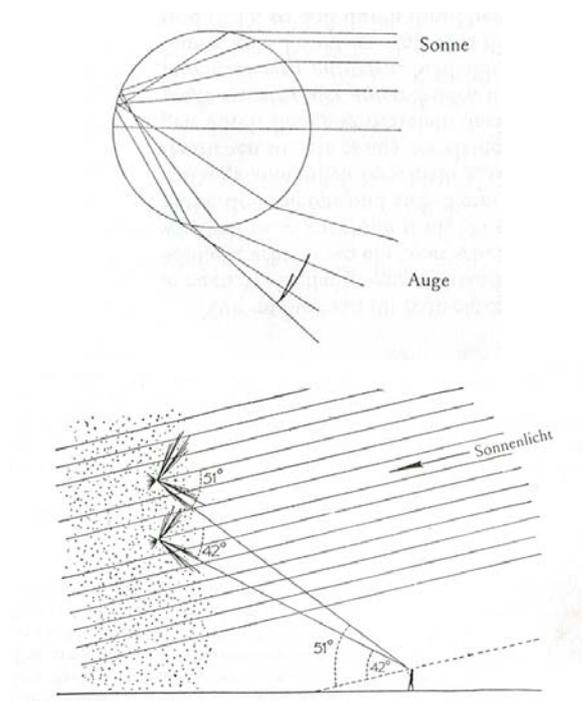


Abb. 2: Ausgewählte Sonnenstrahlen im Tropfenquerschnitt (oben); eine sonnenbeleuchtete Regenwand (unten) [5].

Abbildung 2 (unten) zeigt den nächsten Schritt der Lehrbuchklärung: Anstelle eines einzelnen Tropfens wird nun eine Tropfenwand betrachtet, so dass die unendlich vielen Sonnenstrahlen nun eine unüberschaubare Menge an Tropfen durchstrahlen. Die Form der Darstellung wird beibehalten und damit auch das eben beschriebene Problem übernommen. Obwohl die Winkel, unter denen die Hauptbögen

gesehen werden, plausibel gemacht werden können, bleibt unklar, in welchem physikalischen Verhältnis die beiden ausgewählten Tropfen und der eingezeichnete Beobachterstand stehen. Zumal, wenn auch noch farbige Strahlen eingetragen werden. Es bleibt unklar, *wie die Vielzahl an Strahlen vom Beobachter übersichtlich verfolgt werden soll*.

Zusammenfassend ergibt sich die Frage, ob man zur Erklärung des Regenbogens eine Perspektive einnehmen *muss*, aus der man ihn gar nicht beobachten kann, bzw. ob es möglich ist, ihn unmittelbar aus der eingebundenen Perspektive heraus zu erschließen, *aus welcher der Regenbogen auch tatsächlich beobachtet wird*. Diese Möglichkeit aufzuzeigen ist die Aufgabe einer „Phänomenologie des Regenbogens“.

3. Idee und Vorgehen

Abbildung 3 (oben) zeigt die Ansicht einer von einer Videoleuchte beleuchteten, mit Wasser gefüllten, dünnwandigen kugeligen Glasschale, die als Tropfenmodell dient. Besondere Aufmerksamkeit verdienen dabei verschiedene Spiegelbilder der Leuchte. Die beiden hellsten und größten Leuchtenbilder auf der linken Seite bilden ein Bildpaar, das „in“ der hohl spiegelnden Rückseite der Kugel erscheint. Rechts von der Mitte befindet sich ein relativ kleines und schwaches Leuchtenbild – ein Spiegelbild der Leuchte in der gewölbten Kugelvorderseite. Am rechten Rand der Kugelsicht ist ein weiteres, jedoch kleineres und schwächeres Bildpaar sichtbar; hierbei handelt es sich wieder um Hohlspiegelbilder der Leuchte. Womit wir es also beim Blick in das beleuchtete Tropfenmodell zunächst zu tun bekommen, sind verschiedene *Spiegelbilder der Leuchte*.

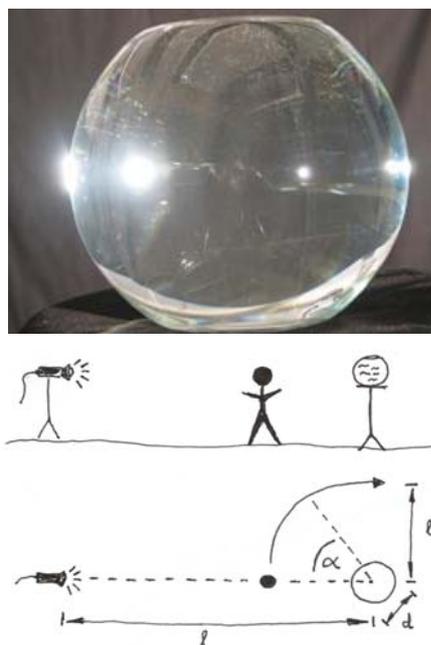


Abb. 3 oben: Blick in eine beleuchtete Wasserkugel; unten: räumliche Situation des Beleuchtungszusammenhangs mit variablen Parametern.

Die Anordnung der verschiedenen Leuchtenbilder in der Kugelsicht variiert mit dem Standpunkt des Beobachters, den er bezüglich der Leuchte und der Kugel einnimmt. In Abbildung 3 (unten) sind sowohl die räumliche Situation des Beleuchtungszusammenhanges skizziert als auch in Draufsicht die verschiedenen variablen Parameter eingetragen. Bewegt sich der Beobachter unter konstantem Abstand um die beleuchtete Kugel herum, verändern sich die relative Lage und auch die Farbigkeit der Leuchtenbilder. Ein Ausschnitt aus einem solchen Rundgang im interessantesten Winkelbereich zwischen $\alpha = 30^\circ$ - 70° wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Auf den Regenbogen bezogen eröffnet der Rundgang um das Tropfenmodell die Möglichkeit, die Gesamtheit der für einen festen Beobachtungsstandpunkt gegenüber einer ausgebreiteten Regenwand *gleichzeitig* realisierten Blickrichtungen *nacheinander* zu durchlaufen.

4. Rundgang um eine beleuchtete Wasserkugel

Bewegt sich der Beobachter aus der Position zwischen Leuchte und Kugel heraus (in diesem Fall nach links), erscheinen in der Kugelmittle zwei Leuchtenbilder. Das hellere der beiden ist das erste Hohlspiegelbild der Leuchte. Es bewegt sich während des Rundgangs zum linken Kugelrand, wo es schließlich verschwindet (siehe weiter unten). Das etwas schwächere und auch kleinere der beiden ist das Wölbspiegelbild der Leuchte. Es bewegt sich zum rechten Kugelrand und verschwindet erst, wenn der Beobachter schon fast hinter der Kugel steht.

Die Abbildungen 4 a-p zeigen den „kritischen Winkelbereich“ zwischen 30° und 70° . Auf den linken Seiten der Kugeln ist zu sehen, wie das eben beschriebene Hohlspiegelbild der Leuchte von der Mitte nach links zum Rand hin wandert und dabei immer heller wird. Je näher es dem Rand kommt, desto deutlicher erscheint an der Stelle des Randes, auf den sich das Leuchtenbild zubewegt, ein weiteres, das rasch an Helligkeit gewinnt. Im Moment, wenn die beiden Bilder zu verschmelzen beginnen, erreichen sie die stärkste Helligkeit und verfärben sich: von Weiß nach Blau, über Grün, Gelb und Orange bis hin zu Rot – und verschwinden dann (in einem geringen aber deutlichen Abstand vom Rand der Kugel!). Im Hintergrund der beiden Bilder wandert außerdem ein immer heller werdender Schein zum selben Rand, wo er ebenfalls verschwindet.

Auf den rechten Seiten der Kugeln wiederholt sich dieses Schauspiel in umgekehrter Reihenfolge (Abb. 4 a-h): Ein zweites kleineres Hohlspiegelbildpaar der Leuchte erscheint. Aus einem hellen Fleck sehr nahe am Rand trennen sich unter Verfärbungen zwei Leuchtenbilder, von denen eines nach links wandert, während das andere nach rechts zum Rand hin läuft und dort verschwindet.

Stellt man die Aufgabe, zuerst eine bestimmte Ansicht – z.B. eine der farbigen Bildpaarvereinigungen – aufzusuchen und sich anschließend im Raum zu

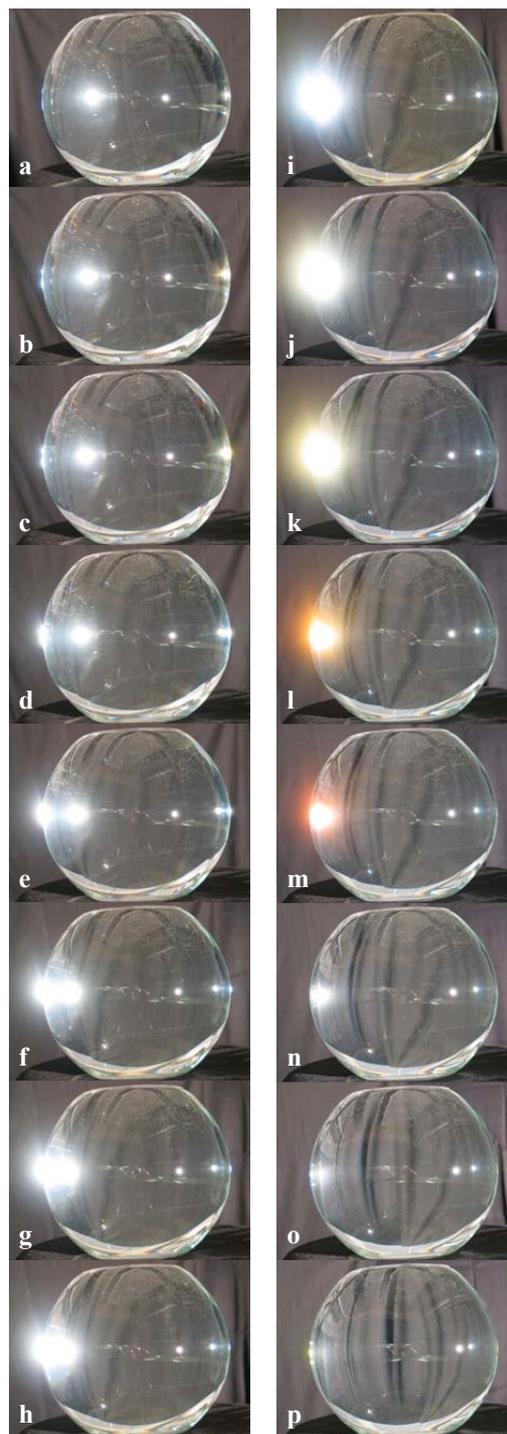


Abb. 4 a-p: Leuchtenbilder in der Wasserkugel im Winkelbereich von 30° bis 70° .

bewegen, aber so, dass die Ansicht erhalten bleibt, so wird man sich auf einer Geraden bewegen. Die auf diese Weise für verschiedene Ansichten ermittelten Geraden (vgl. Abb. 5) verlaufen für beide Vereinigungszyklen unter verschiedenen Winkeln zur Achse zwischen Leuchte und Kugel: α (Vereinigung 1. Bildpaar) $\approx 42^\circ$, α (Vereinigung 2. Bildpaar) $\approx 51^\circ$. Die beiden Zyklen sind demnach räumlich entkoppelt. Die konkrete Ansicht der Leuchten-

bzw. Sonnenbilder im Tropfen(modell) ist daher abhängig vom konkreten Standpunkt des Beobachters im Raum.

Der Abstand a , in dem sich die beiden ausgewählten Geraden schneiden, variiert mit dem Durchmesser d des Tropfenmodells bzw. des Tropfens. Im Falle der ca. 20 cm großen wassergefüllten Glasschale liegt er bei ca. 1,4 m, im Falle eines 2 mm großen Wassertropfens bei ca. 1,4 cm. Der oben beschriebene Rundgang wurde also in einem Abstand durchgeführt, der dem in Abbildung 5 eingezeichneten Weg 1 entspricht, während sich der Betrachter eines Regenbogens in einer noch deutlich über Weg 3 hinausgehenden Entfernung von den Regentropfen befindet.

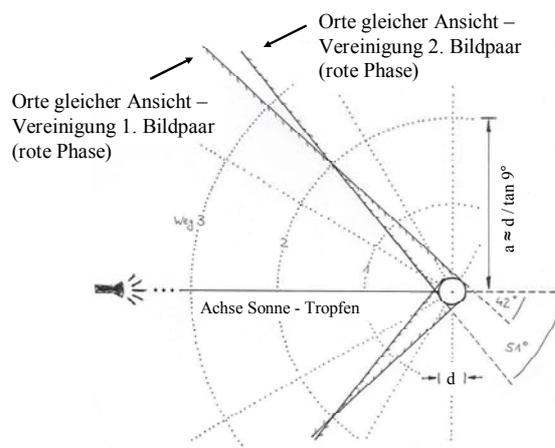


Abb. 5: Rundwege um das Tropfenmodell und Wege, auf denen die jeweilige Ansicht erhalten bleibt

Vor dem Hintergrund dieser geometrischen Analyse lassen sich die Beobachtungen beim Rundgang um eine Wasserkugel leicht auf die Erscheinung des Regenbogens beziehen: Während im Falle einer einzelnen Kugel der Beobachter sich um diese herum bewegen muss, um farbige Ansichten zu erhalten, braucht er im Falle einer sonnenbeleuchteten Regenwand nur seinen Blick „von Tropfen zu Tropfen“ schweifen zu lassen. Beim Regenbogen ist eine *Gesamtheit von Standpunktbedingungen* eines Rundgangs um eine einzelne Wasserkugel *zugleich* erfüllt.

Somit ist es leicht möglich, die zu Beginn von Abschnitt 2 beschriebene Ordnung der verschiedenen Strukturen des Regenbogens zu verstehen: Die aufgehellten Bereiche der Atmosphäre innerhalb des Primär- bzw. außerhalb des Sekundärbogens entsprechen den Kugelansichten in denjenigen Winkelbereichen des Rundgangs, in denen das jeweilige Bildpaar zu sehen ist: Der Primärbogen entspricht der Vereinigungsphase des ersten Bildpaares, der Sekundärbogen derjenigen des zweiten. Im Bereich von ALEXANDERS Dunklem Band ist einzig das schwache Wölbspiegelbild der Sonne zu sehen. Dieses Band ist also nicht etwa dunkel, es ist nur

nicht so hell, wie die es umgebenden farbigen Bögen. ALEXANDERS Dunkles Band ist somit eine Art *Fenster* im Regenbogen, das Durchsicht auf die hinter der Regenwand liegende und von dieser abgedunkelten Atmosphäre erlaubt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl die zu Beginn von Abschnitt 2 beschriebene Ordnung der verschiedenen Strukturen des Regenbogens sowie seine Erscheinungsbedingungen ergeben sich zwanglos aus der phänomenologischen Untersuchung des Rundgangs um eine Wasserkugel. Hierbei nimmt der Beobachter die Perspektive ein, aus der er auch den Regenbogen beobachtet.

Der Rundgang stellt somit den ersten Schritt einer phänomenologischen Erschließung des Regenbogens dar. Außerdem ist offensichtlich, worin die nächsten Schritte bestehen: Es muss untersucht werden, wie die verschiedenen Hohlspiegelbilder der Leuchte bzw. der Sonne und ihre verschiedenen Färbungen zustande kommen (→ Phänomenologie der Bildentstehung an sphärischen Spiegeln und an Kugellinsen). Eine Variation der Tropfengröße gibt Aufschluss über die Erscheinung der Überzähligen Bögen (→ Phänomenologie der Beugung und Interferenz, siehe z.B. [6]). Nicht zuletzt ist die Regenbogenansicht polarisiert, so dass auch die Polarisationszustände der Ansichten während des Rundgangs berücksichtigt werden können (→ Phänomenologie der Polarisation, [3]).

Damit wird offensichtlich, dass im Regenbogen alle typischen optischen Phänomenbereiche gemeinsam wirken. Er eignet sich daher sowohl als Ausgangspunkt einer (phänomenologischen) Optik, da diese von ihm aus in alle Richtungen „durchschritten“ werden kann, oder aber als End- bzw. Kulminationspunkt einer solchen, da zu seinem Verständnis alle Erfahrungen mit der Optik wieder zusammengebracht werden müssen. Der Regenbogen kann in diesem Sinne als ein Bild der phänomenologischen Optik selbst gesehen werden.

6. Literatur und Abbildungen

- [1] MAIER, Georg (2004). *blicken-sehen-schauen*. Dürna: Verlag Kooperative Dürna.
- [2] SCHÖN, Lutz (1994). Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32, 1, 2-5.
- [3] GREBE-ELLIS, Johannes (2005). *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation*. Berlin: Logos.
- [4] Der Karlsruher Wolkenatlas: <http://www.wolkenatlas.de/wolken/me10.htm> (Stand 8/2006)
- [5] MINNAERT, Marcel (1992). *Licht und Farbe in der Natur*. Basel: Birkhäuser, 248-249.
- [6] SOMMER, Wilfried (2005). *Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept optischer Wege*. Berlin: Logos.