

Regenbogen

Gelenktes Entdeckendes Lernen von Manuel Walser

Inhalt und Lernziele:

Die Unterrichtseinheit behandelt das Gesamtphänomen des Regenbogens mit seinen physikalischen, historischen und emotionalen Aspekten.

Unterrichtsmethoden: Entdeckendes Lernen

Die Lernenden stehen im Mittelpunkt: Sie erarbeiten selbstständig neue Zusammenhänge und erkunden Phänomene auf eigene Faust. Dabei werden sie mehr oder weniger von der Lehrperson angeleitet bzw. gelenkt.

Fachliches Review:

Manfred Sigrist, Institut für Theoretische Physik, ETH Zürich

Fachdidaktisches Review:

Wolfgang Grentz, Fachdidaktiker ETH Zürich

Wolfgang Pils, Praxislehrperson, ETH Zürich

Publiziert auf EducETH:

1. Februar 2007

Rechtliches:

Die vorliegende Unterrichtseinheit darf ohne Einschränkung heruntergeladen und für Unterrichtszwecke kostenlos verwendet werden. Dabei sind auch Änderungen und Anpassungen erlaubt. Der Hinweis auf die Herkunft der Materialien (ETH Zürich, EducETH) sowie die Angabe der Autorinnen und Autoren darf aber nicht entfernt werden.

Publizieren auf EducETH?

Möchten Sie eine eigene Unterrichtseinheit auf EducETH publizieren? Auf folgender Seite finden Sie alle wichtigen Informationen: <http://www.educeth.ch/autoren>

Weitere Informationen:

Weitere Informationen zu dieser Unterrichtseinheit und zu EducETH finden Sie im Internet unter <http://www.educ.ethz.ch> oder unter <http://www.educeth.ch>.

Der Regenbogen

Gelenktes Entdeckendes Lernen



Abbildung 1 Regenbogen und Windenergieanlagen in der Landschaft

Autor: Manuel Walser **Betreuer:** Wolfgang Grentz

Unterrichtsfach: Physik **Schultyp:** Gymnasium **Erstellt am** 14. August 2004

Dauer der Unterrichtseinheit: 2 ½ -3 Lektionen (ca. 120-135 min)

Dauer des selbstständigen Entdeckens: 1 Doppelktion (ca. 80 min)

Voraussetzungen:

- Minimale Erfahrungen im selbstständigen Experimentieren
- Elementare geometrische Kenntnisse
- Kenntnis des Lichtspektrums
- Wissen über Reflexion, Brechung und Dispersion eines Lichtstrahls und der Darstellung dieser Phänomene in der Strahlenoptik

Informationsangebot:

- Fotos und historische Dokumente zum Regenbogen
- Experimentiermaterial zur Form des Regenbogens und zum Strahlengang

Abschlussphase:

Jeweils zwei bis drei Schüler aus verschiedenen Arbeitsgruppen kommen zusammen und präsentieren sich ihre persönlichen Erkenntnisse. Zum Schluss erstellt jeder Schüler individuell eine Skizze oder eine Mind-Map zum Thema Regenbogen.

Schulerprobung: Diese Anleitung wurde noch nicht im Unterricht getestet.

Teil A Dokumente für die Lernenden (Lenkung)..... 3

1	Allgemeines	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Ablauf.....	4
1.3	Wichtige Hinweise	5
1.4	Benotung	6
1.5	Nachwort.....	7
2	Informationsangebot.....	8
2.1	Übersicht	8
2.2	Regenbogenfotos.....	10
2.3	Bilder von Regentropfen	15
2.4	Spektrum des sichtbaren Lichtes	17
2.5	Altes und Neues Testament.....	18
2.6	Gedichte	19
2.7	Bauernregeln	19
2.8	Meteorologica von Aristoteles	20
2.9	Legenden.....	23

Teil B Dokumente für die Lehrenden..... 24

1	Vorwissen	24
2	Ablauf der Unterrichtseinheit	25
3	Lösungsvorschläge	26
3.1	Lösungsvorschläge zu Arbeitsstation I.....	26
3.2	Lösungsvorschläge zu Arbeitsstation II	28
3.3	Lösungsvorschläge zu Arbeitsstation III	30
4	Beurteilungsschema	32

Teil C Quellenangaben..... 33

Literatur.....	33
Internetadressen.....	34
Abbildungen	34

Teil A Dokumente für die Lernenden (Lenkung)

1 Allgemeines

1.1 Einleitung

Der Regenbogen ist ein Naturphänomen, das die Menschen schon immer fasziniert hat. Man verbindet positive Emotionen und Freude mit ihm. Seine elegante Form und seine schönen Farben bringen jeden Menschen zum Staunen. Aber wer achtet schon darauf, zu welcher Zeit und wo genau man am Himmel einen Regenbogen gesehen hat? Existiert er wirklich? Oder ist er bloss eine optische Täuschung?

Über solche Fragen werden Sie im Laufe dieser Unterrichtseinheit nachdenken. Das Ziel besteht nicht darin, ein perfektes physikalisches oder mathematisches Modell des Regenbogens zu finden – dazu ist die zur Verfügung stehende Zeit zu knapp. Das bereitgestellte Material dient als Informationsquelle, um neue Aspekte des Regenbogens *selbst zu entdecken*. Was zählt sind eigene Ideen, Gedanken und Fragen.

Sie sind also in den folgenden Lektionen gewissermassen ein Forscher, eine Forscherin.

Versuchen Sie, möglichst viele Verknüpfungen mit dem Stoff herzustellen, den Sie bereits im Unterricht behandelt haben, um damit eigene physikalischen Theorien zu entwickeln. Wichtig ist: Physikalische Überlegungen stehen zwar im Vordergrund, aber auch Erkenntnisse anderer Art sind gefragt.

Die Menschheit musste lange suchen, bis sie eine fundierte wissenschaftliche Erklärung für den Regenbogen gefunden hatte. Auf der Suche danach sind viele Mythen, Erklärungsversuche und Irrwege entstanden, die sehr interessant sind. Sie haben die Forschung in kleinen Schritten vorangebracht.

Fazit: In den folgenden Unterrichtsstunden geht es um das Gesamtphänomen des Regenbogens mit all seinen physikalischen, historischen und emotionalen Aspekten.

1.2 Ablauf

a) Doppelлекtion

Nach dem Lesen dieses Textes (ca. 10 min) arbeiten Sie dreimal 25 Minuten; machen Sie nach dem zweiten Block eine Pause.

Es gibt drei verschiedene Arbeitsstationen, an denen in kleinen Gruppen (2-3 Personen) gearbeitet wird:

- Station I) Dokumente, die hier im Physikzimmer zur Verfügung stehen.
- Station II) Experimente, die einen künstlichen Regenbogen erzeugen.
Im Raum...oder im Freien (nur bei schönem Wetter).
- Station III) Experimente zum Strahlengang: Im Raum ...

Interessant sind möglichst viele und originelle Entdeckungen. Daher dürfen sich die Gruppen untereinander in dieser Doppelлекtion nicht austauschen oder zusammenarbeiten.

Für einen reibungslosen Ablauf soll der folgende Zeitplan sorgen:

Gruppe	Schüler	10:35 – 11:00	11:00 – 11:25	11:35 – 12:00
1	Marco, Roman	I	Platz III.1	Platz II.1
2	Philip, Anna	Platz II.1	I	Platz III.1
3	Carmen, Romy	Platz III.1	Platz II.1	I
...

Zu den angegebenen Zeiten wechseln Sie Ihren Arbeitsplatz gemäss Plan. Wenn Sie mit dem Experimentieren an den Stationen II und III vorzeitig fertig sind, können Sie an Station I noch ungelesene Texte studieren. Da das Informationsangebot recht umfangreich ist, wird die Lesezeit nicht für sämtliches Material reichen.

b) Einzellektion

Hier erhalten Sie die Gelegenheit, Ihre Erkenntnisse mit anderen auszutauschen. Setzen Sie sich spontan zu zweit zusammen und präsentieren Sie Ihre Entdeckungen zum Phänomen „Regenbogen“. Nach zehn Minuten gebe ich ein Zeichen und Sie wechseln die Partner. Achten Sie in beiden Runden darauf, dass Sie nicht mit Kollegen/Kolleginnen aus der eigenen Gruppe zusammenkommen.

Als Abschluss der Unterrichtseinheit erstellt jeder für sich eine kleine Skizze oder Zusammenfassung mit jenen Punkten, die ihm zum Thema Regenbogen am wichtigsten erscheinen. Ich gebe dazu noch einige Tipps [Anleitung Mind-Map, falls noch nicht bekannt].

1.3 Wichtige Hinweise

Arbeitsplatz I

Jeder hat sicher schon einmal einen Regenbogen in der Natur gesehen, doch an die Details kann man sich normalerweise nicht mehr genau erinnern. Und einen wirklich schönen, grossen Regenbogen oder sogar einen Zweiten gleichzeitig sieht man nur sehr selten. Notieren Sie alles, was Ihnen auf den Fotos auffällt, auch wenn Sie noch keine Erklärung dafür haben. Gleiches gilt für die historischen Texte. Selbst wenn diese keinen wissenschaftlichen Ursprung haben, sind sie doch ein Versuch, etwas Gültiges über die Wirklichkeit auszusagen.

Arbeitsplatz II und III

Hier ist verschiedenes Experimentiermaterial bereitgestellt, mit dem Sie den genauen Weg des Lichts von der Sonne über die Wolken zu Ihrem Auge studieren können. Versuchen Sie herauszufinden, wo und weshalb ein Lichtstrahl reflektiert oder gebrochen wird.

Erstellen Sie eine Skizze zu allen Experimenten, die Sie durchführen. Merken Sie sich die Beobachtungen und versuchen Sie, die Phänomene zu erklären. Halten Sie die Erkenntnisse schriftlich fest. Notieren Sie auch interessante Fragestellungen und Gedankengänge, aus denen Sie etwas gelernt haben.

Die Sonnenstrahlen, die unsere Erde erreichen, sind fast parallel. Wäre diese Voraussetzung nicht erfüllt, würde man keinen Regenbogen sehen. Dasselbe gilt auch, wenn Sie einen künstlichen Regenbogen im Labor erzeugen wollen. Würde man für die Experimente einfach eine Tischlampe verwenden, hätte man keinen Erfolg.

Mit der Sprühflasche kann man einen künstlichen Regenbogen erzeugen. Wenn Sie das Experiment anstelle von Sonnenlicht mit einem Projektor durchführen, ist das nicht einfach. Geben Sie nicht gleich auf, falls beim ersten Versuch kein Regenbogen sichtbar ist. Vermutlich muss Ihr Partner/ Ihre Partnerin reichlich Wasser versprühen, bis ein kleines Bogenstück erkennbar ist.

WICHTIG: Wenn der Boden durch das Versprühen von Wasser nass wird, putzen Sie die Lache mit einem Lumpen auf! Dann kann niemand darauf ausrutschen.

Die Laserpointer erzeugen einen sehr gut gebündelten und intensiven Lichtstrahl. Auch wenn ihre Strahlungsleistung gering und für die Augen normalerweise ungefährlich ist, sind sie kein Spielzeug und dürfen nicht missbräuchlich verwendet werden. Richten Sie Laserpointer deshalb nie auf die Augen Ihrer Schulkameraden!

1.4 Benotung

[HINWEIS FÜR DIE LEHRPERSON: Das Kapitel 1.4 muss gelöscht werden, wenn keine Benotung geplant ist.]

Beurteilung der Doppellektion

Am Ende der Doppellektion geben Sie Ihre Notizen mit Namen versehen und sortiert ab. Ich kommentiere und bewerte Ihre Leistung gemäss den separat ausgeteilten Kriterien. Obwohl in kleinen Gruppen gearbeitet wird, macht jeder seine eigenen Aufzeichnungen, die Sie am Anfang der nächsten Stunde kommentiert und benotet zurück erhalten.

Beurteilungskriterien

Für die angefertigten Skizzen, notierten Erkenntnisse, Ideen und Fragen zu den Experimenten gibt es Punkte nach folgendem Schema. Es ist in zwölf Themengebiete eingeteilt:

Arbeitsstation I (12 Punkte)

- 1.a Entstehung (Voraussetzungen zur Beobachtung eines Regenbogens)
- 1.b Form (Generelle Feststellungen zur Form des Regenbogens)
- 1.c Geometrie (Geometrische Begründungen über die Form des Regenbogens, siehe Aristoteles)
- 1.d Kulturelles (Zusammenhänge zwischen dem Regenbogen und kulturellen Themen, wie z. B. Legenden, Bauernregeln, Malerei)
- 1.e Persönliches und Spezielles (Persönliche Erfahrungen, weitere Erkenntnisse, aussergewöhnliche Ideen)

Arbeitsstation II und III (je 6 Punkte, beide zusammen 12 Punkte)

- 2.a + 3.a Durchführung der Experimente (Dokumentation der Experimente durch Skizzen oder Beschreibungen)
- 2.b + 3.b Verständnis des Strahlengangs (Skizzenbeschriftung, Erklärung des Zusammenhangs mit dem Unterrichtsstoff, Erläuterungen zum Verlauf des Experiments)
- 2.c + 3.c Zusammenhang mit dem Regenbogen (Begründung, wie das Experiment zum Wissen über den Regenbogen beiträgt; Schildern der Erkenntnisse und deren Konsequenzen)

Benutzen Sie für jede Arbeitsstation ein neues Blatt. Ordnen Sie bereits beim Aufschreiben der Notizen die Gedanken gemäss dem oben angegebenen Schema. Für jedes Thema erhalten Sie 0, 1 oder 2 Punkte. Am Schluss werden alle Punkte zusammengezählt und in eine Note umgerechnet. Maximal können also 24 Punkte erreicht werden.

- 0 Punkte) **Ungenügende Leistung:** Sie haben keine persönliche Leistung erbracht oder sollten den Unterrichtsstoff nochmals repetieren.
- 1 Punkt) **Gute Leistung:** Sie haben Ihre eigenen Gedanken und Erkenntnisse notiert und scheinen die Grundprinzipien verstanden zu haben.
- 2 Punkte) **Sehr gute Leistung:** Sie haben die Sache intensiv studiert, eine herausragende Idee gehabt oder eine überraschende Entdeckung gemacht.

1.5 *Nachwort*

Diese Unterrichtseinheit war hoffentlich lehrreich und anregend. Vielleicht hat Sie Ihnen als Forscher oder Forscherin auch etwas Spass gemacht und Sie an der einen oder anderen Stelle überrascht.

Wenn Ihr Wissensdurst noch nicht gestillt ist, können Sie in einem Physikbuch der Schulbibliothek oder im Internet unter dem Stichwort „Regenbogen“ noch vieles mehr erfahren.

Der französische Physiker *René Descartes* war 1637 der Erste, der eine korrekte physikalische Erklärung des Regenbogens liefern konnte. In der Folgezeit wurden immer mehr Details, wie zum Beispiel die Sekundär- oder Interferenzregenbögen, erklärt und mathematisch berechnet.

Falls Sie den Regenbogen auch gerne von seiner mathematischen Seite kennenlernen möchten, fragen Sie Ihren Mathematiklehrer, ob er mit Ihnen ein Projekt über den Regenbogen machen möchte. Dazu gibt es eine hervorragende Anleitung von B. D. Wong und H. Henn.

2 Informationsangebot

2.1 Übersicht

Arbeitsstation I: Dokumente rund um den Regenbogen

Die Kopiervorlagen folgen auf den nächsten Seiten.

Arbeitsstation II: Experiment zum künstlichen Regenbogen

Bei schönem Wetter wird dieses Experiment am besten auf dem Pausenplatz durchgeführt. Die Sonne ist eine viel bessere Lichtquelle als ein Projektor, sowohl was die Intensität als auch die Parallelität des Lichts betrifft. Alle unten aufgezählten Hilfsmittel sollten an einem Arbeitsplatz vorhanden sein. In den nummerierten Unterlisten sind jeweils Alternativen genannt, die abhängig von der vorhandenen Ausstattung verwendet werden können.

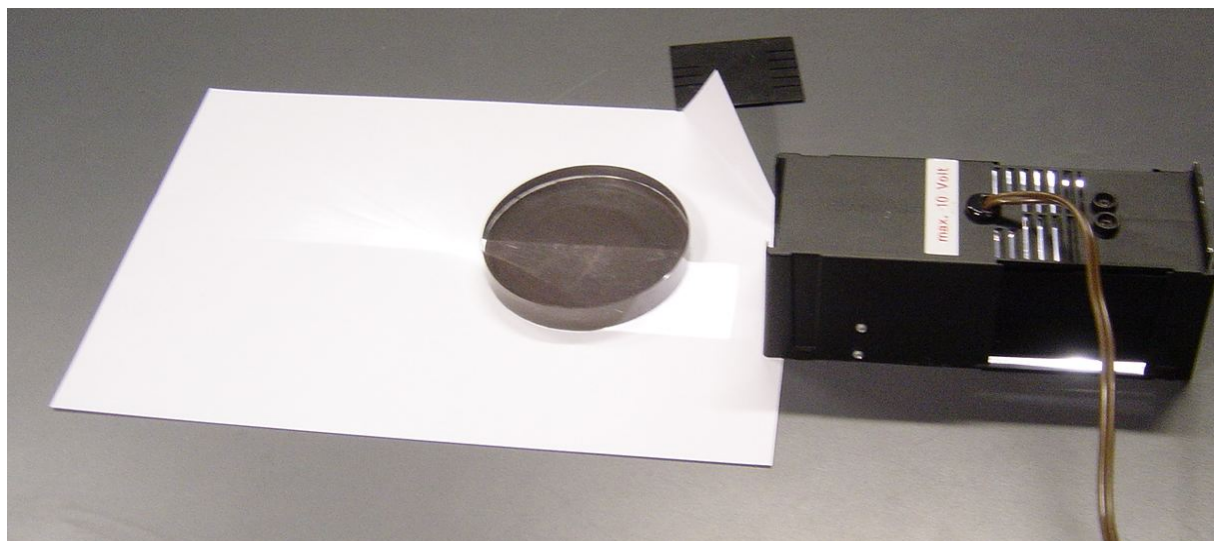
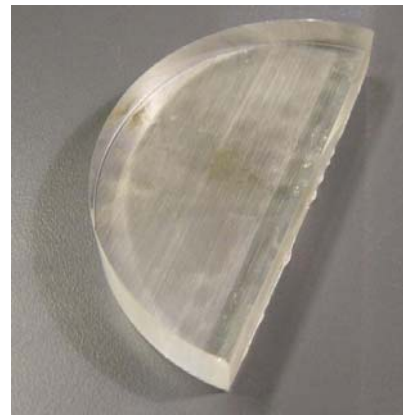
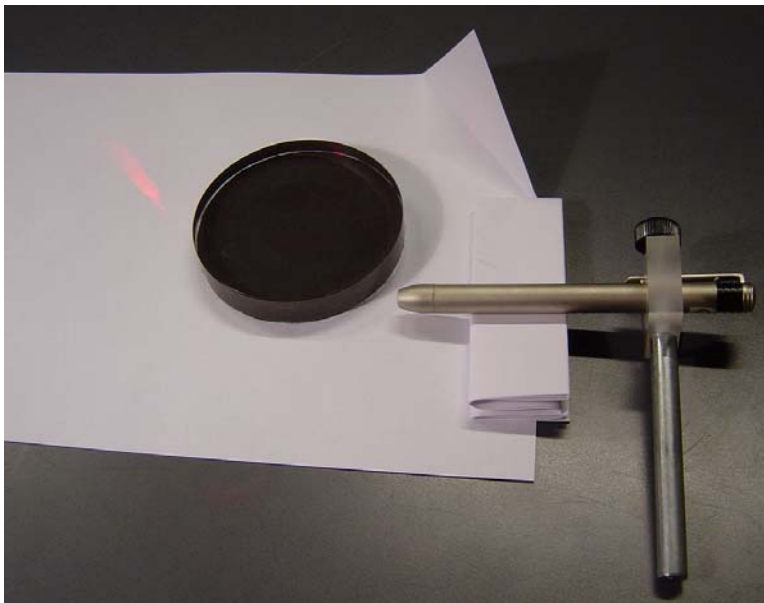
- Abdunkelbarer Raum
- Lichtquelle, die möglichst paralleles Licht erzeugt
 1. Experimentierlampe mit Kondensor: Diese Lampen haben bereits eine Optik eingebaut, die einen sehr stark gebündelten und intensiven Lichtstrahl erzeugt. Da sie weder aufgebaut noch justiert werden müssen, sind sie für die Schülerexperimente am besten geeignet. Der getestete 50W-Projektor hatte einen Öffnungswinkel von 2° bis 3° . Mit ihm lassen sich noch drei Regenbogenfarben unterscheiden.
 2. Diaprojektor mit Blende: Ein Diaprojektor ohne Blende erzeugt normalerweise einen Lichtkegel von 20° . Das Experiment mit der Glaskugel lässt sich damit problemlos durchführen. Um einen Regenbogen beobachten zu können, ist der Lichtstrahl aber viel zu gross. Beim Verfasser dieses Dokumentes reichte das Abblenden auf 6° durch eine vor den Diaprojektor montierte Röhre aus, um einen Regenbogen sehen zu können. Allerdings fehlten dann sämtliche Farben und der Regenbogen erschien nur noch als weisser Nebelbogen. Als Blende eignet sich auch ein schwarzes Dia mit einem Loch in der Mitte. Weniger geeignet ist das blosses Aufstellen einer Blende vor dem Diaprojektor. Dabei entsteht Streulicht, das den Raum erhellt und das Auffinden des Regenbogens erschwert. Als Lehrperson empfiehlt es sich, das Experiment vorher selbst auszuprobieren, um einen guten Kompromiss zwischen Abblendung und Lichtstärke zu finden. Beispielsweise gehen beim Abblenden von 20° auf 6° bereits 90 % der Lichtmenge verloren; das heisst von den üblichen 250W Leistung verbleiben noch 25W.
- Grosse Glaskugel, die einen Regentropfen simuliert
 1. Glaskugel (z. B. Vase, Christbaum- oder Lampenkugel)
 2. Stehkolben (aus dem Chemielabor)
- Weisse Mattscheibe oder ein Stück weisser Karton
- Aluminiumfolie, um den Reflexionskoeffizienten an der Glasrückseite zu erhöhen
- Sprühflasche (Blumenspritze, leere Putzmittelflasche)
- Wasser
- Putzlappen zum Aufwischen des versprühten Wassers
- Winkelmesser (grosses Geodreieck)



- Für fortgeschrittene Schüler eventuell Polarisationsfilter oder Polaroid-Brillen

Arbeitsstation III: Experiment zum Strahlengang

- Abdunkelbarer Raum
- Lichtbox mit verschiedenen Schlitzblenden
- Laserpointer (falls vorhanden mit Haltevorrichtung)
- Flache Petrischalen in verschiedenen Grössen, die man mit Wasser füllen kann
- Flache (Plexi-) Glaszylinder (oder zwei mit Wasser „zusammengeklebte“ Halbmonde)
- Winkelmesser (Geodreieck)
- Papier und Bleistift



2.2 Regenbogenfotos



Abbildung 2 Doppelter Regenbogen, fotografiert von Tobias Thomsch

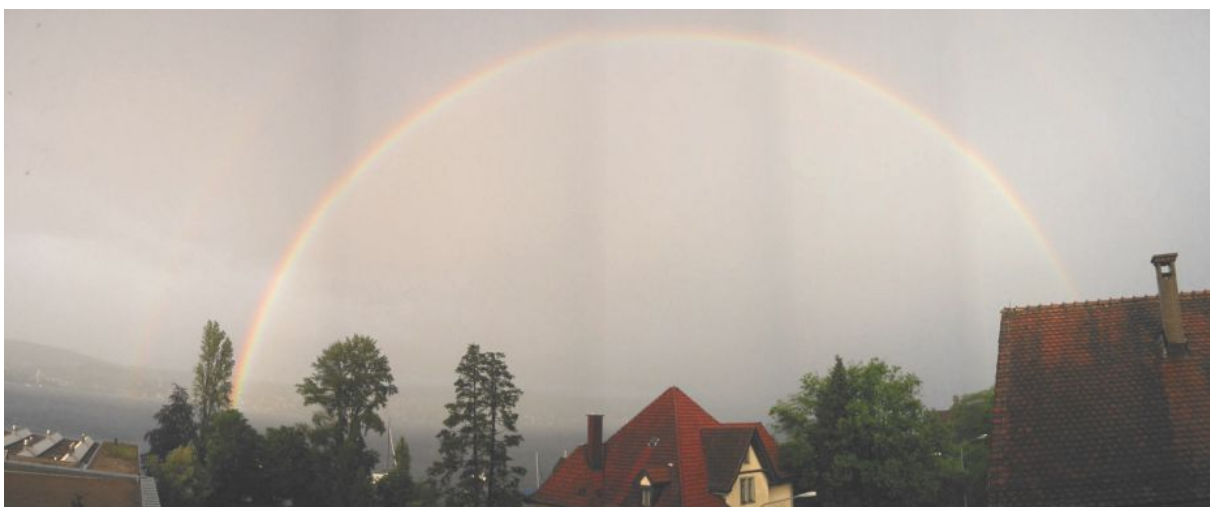


Abbildung 3 Regenbogen über Zürich, fotografiert von Jeremy Anderegg



Abbildung 4 Regenbogen bei den Niagarafällen, fotografiert von Lin Wang



Abbildung 5 Regenbogen im Ingurital in Georgien, fotografiert von Markus Stadler



Abbildung 6 Doppelter Regenbogen nahe Stadt Norton in Ohio



Abbildung 7 Regenbogen bei hohem Sonnenstand, fotografiert von Pat Wright



Abbildung 8 Kreisförmiger Regenbogen, fotografiert aus dem Flugzeug von Anderson Jacobson



Abbildung 9 Weisslicher Regenbogen in der Finnmarksvidda, fotografiert von Lutz Mager



Abbildung 10 Mit dem Gartenschlauch erzeugter Regenbogen, fotografiert von Manuel Walser



Abbildung 11 Vergrößerter Ausschnitt aus obigem Regenbogen, fotografiert von Manuel Walser

2.3 Bilder von Regentropfen



Abbildung 12 Regentropfen in einem Spinnennetz

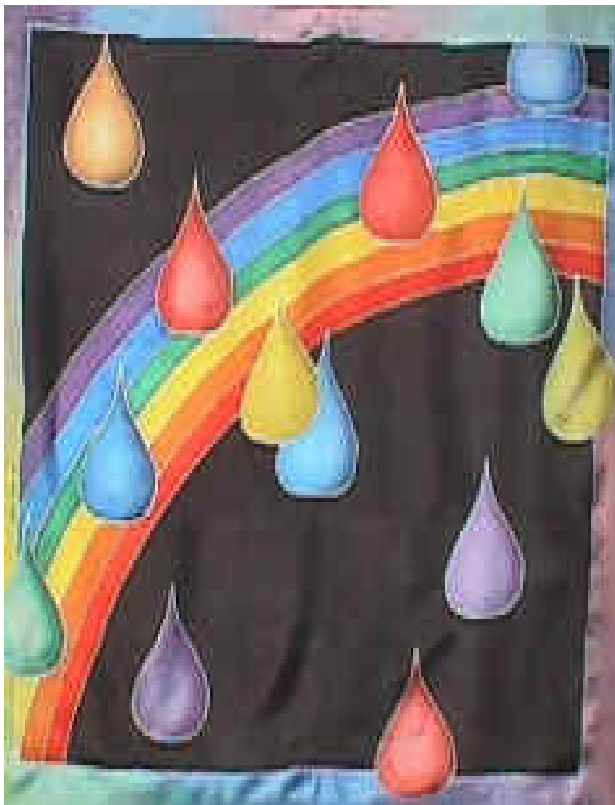


Abbildung 13 Seidentuch mit Regenbogen. Motiv von Ursula Wamister

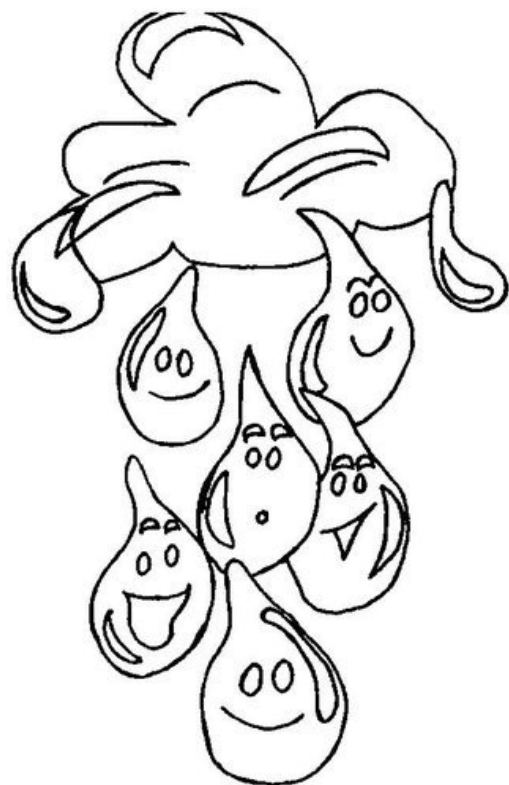


Abbildung 14 Malvorlage für Regentropfen

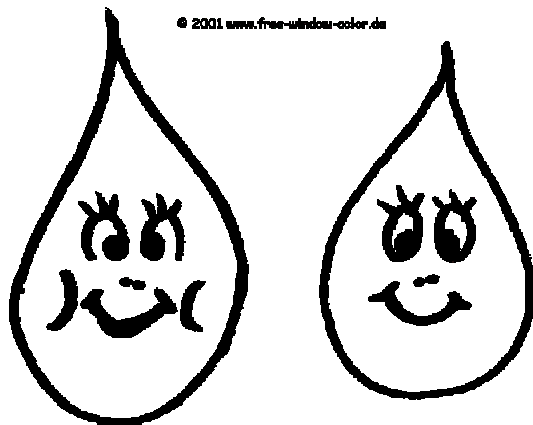


Abbildung 15 Malvorlage für Regentropfen

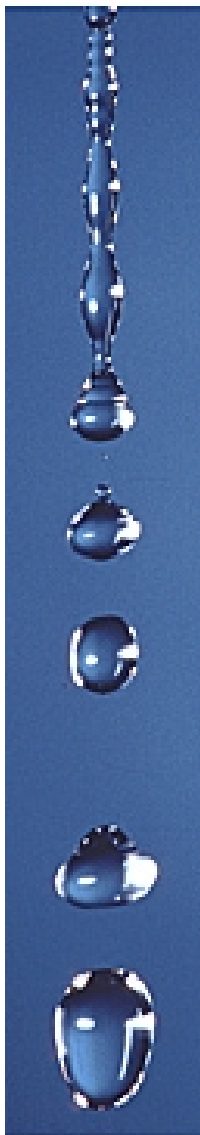


Abbildung 18
Fallender Regentropfen



Abbildung 17 Regentropfen im Windkanal



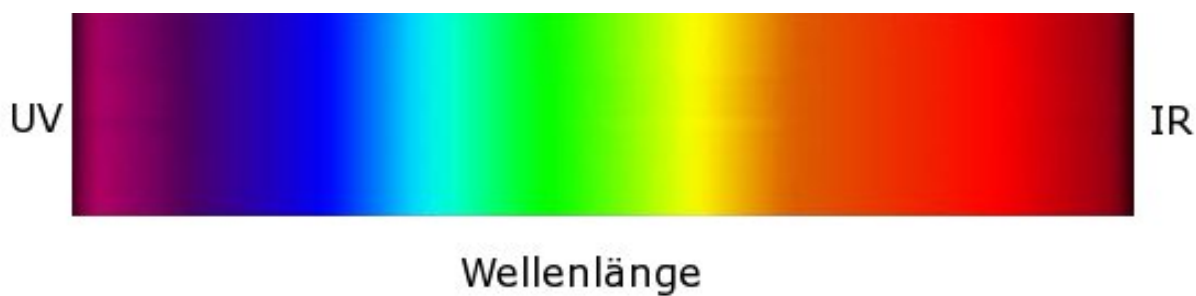
Abbildung 16 Computerzeichnung
eines Regentropfens



Abbildung 19 Regentropfen

Künstler und Physiker scheinen eine unterschiedliche Auffassung von der Gestalt eines Regentropfens zu haben.

2.4 Spektrum des sichtbaren Lichtes



Brechungsindex n	blau (434 nm)	gelb (589 nm)	rot (768 nm)
Luft	1	1	1
Wasser (H ₂ O)	1.340	1.333	1.329
Quarzglas (SiO ₂)	1.467	1.458	1.454
Plexiglas (PMMA)	1.50	1.49	1.48
Quarkristall (SiO ₂)	1.554	1.544	1.539

Tabelle 1 Brechzahlen einiger Stoffe gegen Luft bei 20°C und Normdruck für unterschiedliche Wellenlängen des Lichts

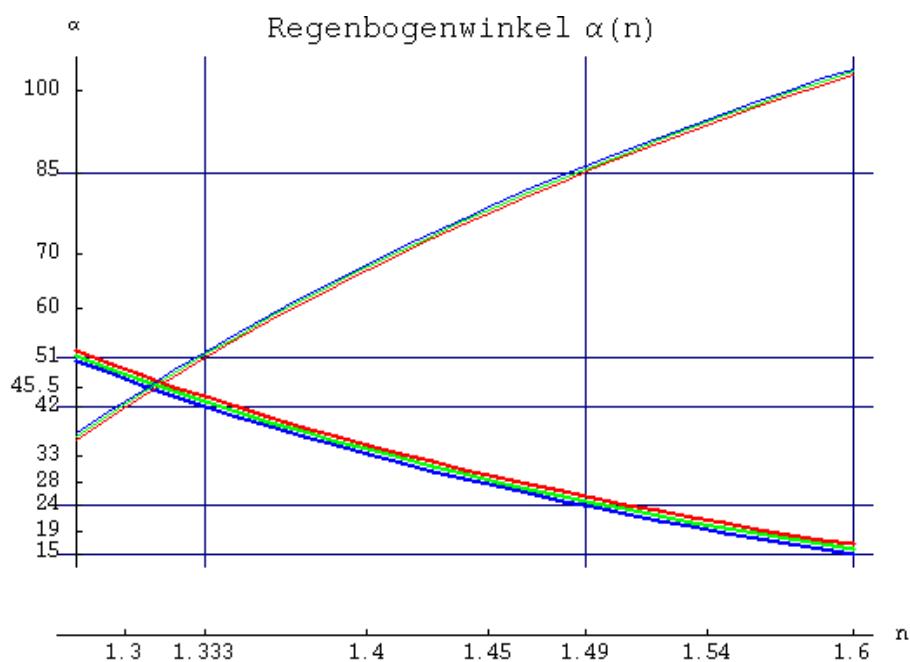


Abbildung 20 Öffnungswinkel α , unter dem man die Farben des Regenbogens sieht. Dargestellt als Funktion des Brechindex n der Regentropfen.

2.5 Altes und Neues Testament

„Und Gott sagte zu Noah und seinen Söhnen mit ihm: Siehe, ich richte mit euch einen Bund auf und mit euren Nachkommen und mit allem lebendigen Getier bei euch, an Vögeln, an Vieh und an allen Tieren des Feldes bei euch, von allem, was aus der Arche gegangen ist, was für Tiere es sind auf Erden. Und ich richte meinen Bund so mit euch auf, dass hinfort nicht mehr alles Fleisch verderbt werden soll durch die Wasser der Sintflut und hinfort keine Sintflut mehr kommen soll, die die Erde verderbe.“

„Und Gott sprach: Das ist das Zeichen des Bundes, den ich geschlossen habe zwischen mir und euch und allem lebendigen Getier bei euch auf ewig: Meinen Bogen habe ich in die Wolken gesetzt; der soll das Zeichen sein des Bundes zwischen mir und der Erde. Und wenn es kommt, dass ich Wetterwolken über die Erde führe, so soll man meinen Bogen sehen in den Wolken. Alsdann will ich gedenken an meinen Bund zwischen mir und euch und allem lebendigen Getier unter allem Fleisch, dass hinfort keine Sintflut mehr komme, die alles Fleisch verderbe. Darum soll mein Bogen in den Wolken sein, dass ich ihn ansehe und gedenke an den ewigen Bund zwischen Gott und allem lebendigen Getier unter allem Fleisch, das auf Erden ist. Und Gott sagte zu Noah: Das sei das Zeichen des Bundes, den ich aufgerichtet habe zwischen mir und allem Fleisch auf Erden.“

Mose, Kapitel 9, Verse 8-17



Abbildung 21 Noah und seine Söhne empfangen Gottes Vereinbarung

Als bald wurde ich vom Geist ergriffen. Und siehe, ein Thron stand im Himmel, und auf dem Thron sass einer. Und der da sass, war anzusehen wie der Stein Jaspis und Sarder; und ein Regenbogen war um den Thron, anzusehen wie ein Smaragd. Und um den Thron waren vierundzwanzig Throne, und auf den Thronen sassen vierundzwanzig Älteste, mit weissen Kleidern angetan, und hatten auf ihren Häuptern goldene Kronen. Und von dem Thron gingen aus Blitze, Stimmen und Donner; und sieben Fackeln mit Feuer brannten vor dem Thron, das sind die sieben Geister Gottes.

Die Offenbarung des Johannes, 4. Kapitel, Verse 2-5

2.6 Gedichte

Magie der Farben

Gottes Atem hin und wieder,
Himmel oben, Himmel unten,
Licht singt tausendfache Lieder,
Gott wird Welt im farbig Bunten.

Weiss zu Schwarz und Warm zum Kühlen
Fühlt sich immer neu gezogen,
Ewig aus chaotischem Wühlen
Klärt sich neu der Regenbogen.

So durch unsre Seele wandelt
Tausendfalt in Qual und Wonne
Gottes Licht, erschafft und handelt,
Und wir preisen ihn als Sonne.

(von Hesse 1918)

Der Regenbogen

Regen biegt das Licht am Himmel
Sonne malt in Farbenpracht
Reichtum ist der Mut zu staunen
erfinderisch die Armut lacht

Die Sehnsucht lässt mich wieder spüren
ich lade sie in mein Leben ein
Tanze meinen Träumen jetzt entgegen
will mit ihnen wieder gänzlich sein

Erst einsam, dann beisammen liegend
sind die Wunder gern willkommen
allabendlich den Regenbogen biegend
zärtlich wiegend und vollkommen

(von Nonhoff 2001)

2.7 Bauernregeln

Regenbogen am Morgen
macht dem Schäfer Sorgen;
Regenbogen am Abend
ist dem Schäfer labend.

Regenbogen im Osten bringt Sonne,
Regenbogen im Westen bringt Regen.

Regenbogen am Abend lässt gut Wetter hoffen,
Regenbogen am Morgen, lässt für Regen sorgen.

2.8 *Meteorologica von Aristoteles (geschrieben 350 v. Chr.)*

Bereits Aristoteles konnte aufgrund geometrischer Überlegungen die Form des Regenbogens erklären. Seine geometrischen Argumente stimmen mit der heutigen Erklärung recht gut überein. Seine physikalische Vorstellung des Wesens von Sonne, Luft, Licht oder Farben und das Verständnis von Reflexion oder Brechung waren aber noch weit entfernt von den heutigen physikalischen Theorien. Er hatte noch nicht die Möglichkeit, die oben genannten optischen Experimente im Labor durchzuführen. Ebenfalls waren ihm die astronomischen Distanzen im Sonnensystem nur sehr ungenau bekannt. Man weiss heute, dass die Sonne etwa 400-mal weiter entfernt ist als der Mond. Er ist immerhin noch 40'000-mal weiter entfernt als die höchsten Wolken in der Atmosphäre. Aristoteles zeichnete in seiner Skizze die Sonne und die Wolken gleich weit vom Auge des Beobachters entfernt.

a) Versuche seine Skizze in diesem Punkt zu verbessern.

Aus Aristoteles Werk „Meteorologica“ sind hauptsächlich die Stellen entfernt worden, die sich mit der geometrischen Form des Regenbogens auseinandersetzen. Andere Textstellen, die sich zum Beispiel mit der Entstehung der Regenbogenfarben befassen, wurden ausgelassen und durch [...] ersetzt. Weil die deutsche Übersetzung dem Original folgt, ist der Text wegen des verschachtelten Satzbaus recht schwierig zu lesen.

b) Versuche den groben Inhalt zu verstehen und mache dir dann eigene Gedanken.

Teil I Meteorologie (von Strohm übersetzt 1970, 76-87)

Buch III

Kapitel 2. Wir wollen nun über Halo-Erscheinungen¹ und über den Regenbogen sprechen, über ihre Natur und ihre Ursachen, ferner über Nebensonnen² und 'Ruten' ('Stäbe')³. Alle diese Naturerscheinungen stammen nämlich von derselben Ursache her.

Zunächst aber müssen die Eigenschaften dieser Phänomene, und was bei jedem einzelnen vorgeht, bestimmt werden. [...]

Beim Regenbogen gibt es nie einen vollen Kreis, auch keinen Bogen, der grösser ist als der Halbkreis. Bei Sonnenuntergang und -aufgang ist der Kreis am kleinsten, das Kreissegment am grössten; steht die Sonne höher, so ist der Kreis grösser, das Segment kleiner. Nach der Herbst-Tagundnachtgleiche, wenn die Tage kürzer sind, kann das Phänomen zu beliebiger Stunde des Tages auftreten, im Sommer aber nicht um die Mittagszeit. [...]

Dies also lässt sich an den genannten Phänomenen im Einzelnen beobachten. Ihre Ursache aber ist in allen Fällen die gleiche: überall handelt es sich um Strahlenbrechung. Die Unterschiede beruhen auf der besonderen Weise der Brechung, auf der Art der reflektierenden Fläche, und darin, ob die Strahlen zur Sonne oder zu einem anderen hellgleissenden Gegenstand hin gebrochen werden.

Ein Regenbogen wird tagsüber sichtbar: an sein Auftreten bei Nacht, vom Mondlicht her, glaubten die Alten nicht. Dieser ihr Eindruck beruhte auf der Seltenheit des Phänomens, das ihnen deswegen verborgen blieb. Es kommt schon vor, aber nicht häufig. Die Ursache ist, dass in der Dunkelheit die Farben nicht zu sehen sind und ausserdem noch viele Bedingungen

¹ Eine Halo-Erscheinung ist ein ähnliches Phänomen wie der Regenbogen. Sie entsteht jedoch nicht durch Wassertropfen, sondern durch kleine Eiskristalle in der Atmosphäre.

² Eine Nebensonne ist eine Halo-Erscheinung um die Sonne herum, bei der das Bogenstück wie eine zweite Sonne am Himmel aussieht.

³ Unter „Ruten“ und „Stäbe“ versteht Aristoteles vermutlich längliche Nebensonnen, also ebenfalls Halo-Erscheinungen.

des Entstehens zusammentreffen müssen – und zwar sämtliche an einem einzelnen Tag im Monat: ausschliesslich bei Vollmond ist ein Mondregenbogen zu erwarten, und auch dann nur, wenn der Mond auf- oder untergeht. Darum haben wir ihn innerhalb von mehr als fünfzig Jahren nur zweimal erlebt. [...]

Kapitel 4. Dass der Regenbogen eine Reflektionserscheinung ist, wurde früher festgestellt; von welcher Art diese ist, wie ihre jeweiligen Besonderheiten zustande kommen und was deren Ursache ist, dies wollen wir nun darlegen. [...]

Vor allem aber findet Brechung von Wasser her statt, und Wasser, das eben in Bildung begriffen ist, wirkt in diesem Sinn stärker als Luft; denn jedes Teilchen, die zusammentretend einen Regentropfen ergeben, ist notwendigerweise ein besserer Spiegel als Nebel. Nun lehrt der Augenschein (wie es auch bereits früher dargestellt wurde), dass in solchen Spiegeln sich bloss die Farbe zeigt, die Form jedoch nicht deutlich wird. Unmittelbar vorm Regnen, also, wenn die Luft im Gewölk sich schon zu Tropfen zusammenschliesst, aber noch kein Regen fällt, muss sich, falls gegenüber die Sonne steht oder eine andere Lichtquelle, die die Wolke zum Spiegel werden lässt und eine Brechung (des Sehens) von der Wolke zum hellen Objekt hin bewirkt, ein Bild der Farbe, nicht der Form ergeben. Jedes einzelne der spiegelnden Teilchen ist klein und nicht zu sehen, nur das ganze ausgedehnte Kontinuum, das sie zusammensetzen, ist sichtbar: folglich muss es das ausgedehnte Kontinuum einer Farbe sein, was da erscheint. Denn jedes spiegelnde Teilchen bietet die gleiche Farbe, wie sie das zusammenhängende Ganze hat. Diese Bedingungen sind theoretisch möglich; und so kann, wenn Sonne und Wolke die entsprechende Position einnehmen und wir (als Beobachter) in der Mitte stehen, damit gerechnet werden, dass die Brechung einen (Farb-)Eindruck hervorruft. [...]

Kapitel 5. Die Tatsache, dass ein Regenbogen weder einen Vollkreis bilden kann noch ein Segment, das grösser ist als ein Halbkreis, sowie die anderen Eigenheiten des Phänomens lassen sich aus der gezeichneten Figur ersehen.

A sei eine Halbkugel über dem Horizontkreis, dessen Mittelpunkt sei K , H ein über dem Horizont aufsteigender Punkt. Wenn nun von K Geraden so gezogen werden, dass sie gewissermassen einen Kegelmantel, mit HK als Achse, bilden, und wenn dann die Verbindungslinien KM dort von der Halbkugel zu H abgewinkelt werden (mit HKM als stumpfem Winkel), werden die so gezogenen Geraden auf eine Kreisperipherie fallen. Geschieht diese Abwinkelung dann, wenn das Gestirn gerade auf- oder untergeht, dann ist der Teil des Kreises oberhalb der Erde (= des Regenbogens), der vom Horizont abgeschnitten wird, ein Halbkreis. Erhebt sich das Gestirn [H] über den Horizont, so wird das Kreissegment immer kleiner, und am kleinsten, wenn das Gestirn seine Mittagshöhe erreicht hat.

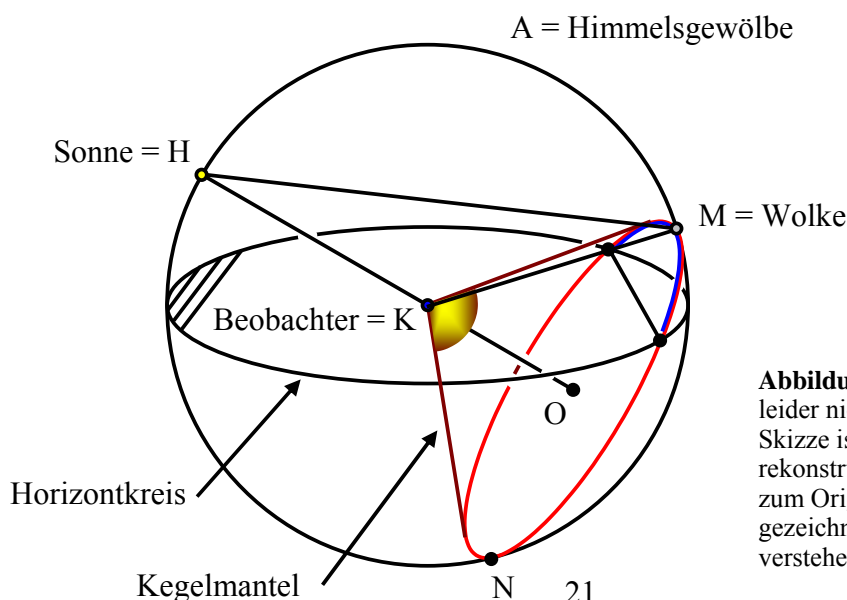


Abbildung 22 Aristoteles' Skizzen sind leider nicht überliefert worden. Diese Skizze ist aus Aristoteles' Text rekonstruiert. Sie ist im Unterschied zum Original dreidimensional gezeichnet, damit der Text leichter zu verstehen ist.

Zunächst sei die Position des Aufgangs, im Punkt H , gegeben, und KM werden zu H abgewinkelt; es sei die Ebene A angelegt, so wie sie durch das Dreieck HKM bestimmt ist. Ihre Schnittebene mit der Halbkugel wird ein grosser Kreis sein, A – dabei kommt es nicht darauf an, welche durch das Dreieck KMH angelegte Ebene es ist von den verschiedenen, die durch HK gehen. Für alle Geraden nun, die von den Punkten H und K gezogen werden und die zueinander in einem bestimmten (gegebenen) Verhältnis stehen, gilt, dass sie nur zu einem Punkt des Halbkreises A konstruiert werden können. Denn da die Punkte K und H und die Gerade HK gegeben sind, muss auch MH gegeben sein, also auch das Verhältnis MH zu MK . Dann wird M auf einer gegebenen Kreisperipherie liegen, die durch NM bezeichnet sei. Damit ist der Schnittpunkt der beiden Kreise gegeben. Keine zwei Geraden lassen sich, mit demselben Verhältnis zueinander und in derselben Fläche, zu einem anderen Punkt konstruieren als zu einem, der auf der Peripherie NM liegt [Apoloniuskreis].

Lässt man nun den Halbkreis A um $HKII$ als Achse rotieren, dann müssen die von H, K zu M gebrochenen Geraden in sämtlichen Ebenen [, die die rotierende Figur nacheinander einnimmt,] gleiche Positionen haben und [durchweg] den gleichen Winkel bilden; und der Winkel, den HM und MI mit HI bilden, muss sich immerfort gleich bleiben. So entsteht über HI und KI eine Reihe von Dreiecken, die sämtlich den Dreiecken HMI und KMI gleich sind. Ihre Höhen müssen auf denselben Punkt der Strecke HI fallen und gleich sein. Dieser Fusspunkt sei O . O ist der Mittelpunkt des Kreises, von dem ein Halbkreis [= als Regenbogen] vom Horizont abgeschnitten wird.

Weiter sei AKT der Horizont, über den sich die Sonne $[H]$ erhoben hat; die Achse (der rotierenden Figur) sei jetzt HI . Dann wiederholen sich alle früheren Beweise, jedoch wird der Pol des Kreises (II) unter dem Horizont AT liegen, weil H sich über ihn erhoben hat. Es liegen dann auf derselben Geraden die Kreismittelpunkte II und O sowie der Mittelpunkt (K) des Kreises, der jetzt die Höhe des aufgestiegenen Himmelskörpers bestimmen lässt; es ist dies der Kreis (mit dem Durchmesser) HI . Nachdem aber KH sich oberhalb des Durchmessers AT befindet, muss der Mittelpunkt – nämlich O (des Regenbogenkreises) – unterhalb des früheren Horizonts AT liegen, auf der Strecke KI . Folglich muss das Kreissegment ΨY , oberhalb des Horizonts, kleiner sein als ein Halbkreis; denn das Segment ΨYZ war (im vorigen Fall) ein Halbkreis, der aber jetzt (teilweise) vom Horizont AT abgeschnitten ist. Das andere Segment Ω (des Regenbogenkreises) muss dann unsichtbar sein, da die Sonne über dem Horizont steht. Der sichtbare Teil wird mittags am kleinsten sein; denn je höher H steht, desto tiefer stehen die Kreismittelpunkte II und O (= Regenbogenkreis).

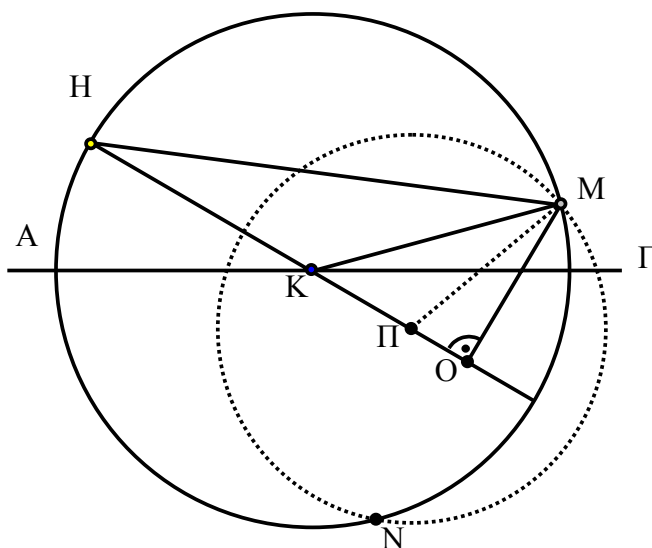


Abbildung 23 Aus obigem Text rekonstruierte, zweidimensionale Zeichnung Aristoteles' zur Erklärung der Form von Regenbögen.

2.9 Legenden



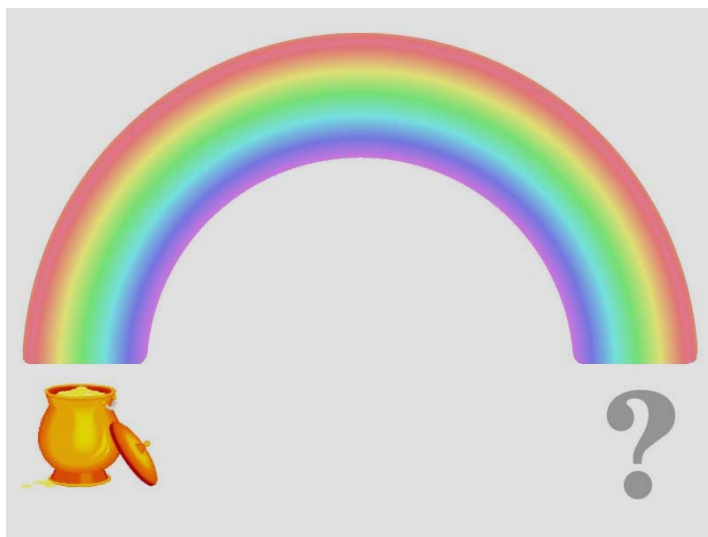
Rund um den Regenbogen werden sehr viele Geschichten erzählt. Eine bekannte Legende ist zum Beispiel: „Wo der Regenbogen drei Tage hintereinander aufliegt, dort ist ein Schatz vergraben.“

In Märchen und Sagen machen sich die Menschen immer wieder auf den Weg zum Ende des Regenbogens in der Hoffnung, dort einen Topf Gold zu finden. In Irland kennt fast jeder die Geschichte, dass am Ende des Regenbogens ein Schatz vergraben sein soll, der von einem Kobold bewacht wird.

Aus den Kobolden entwickelten sich dort die sogenannten Leprechauns. Heutzutage kennt sie jeder in Irland; sie sind so etwas wie die National-Elfen geworden. Leprechauns sind sehr kleine, üblicherweise zwischen einem Daumen und zwei Fuss grosse Erdwesen. Die einzigen typischen Kleidungsstücke sind ein breitkrempiger Hut und die Lederschürze eines Schuhmachers, denn ihr ursprünglicher Beruf ist Schuhmacher. Wenn sie nicht gerade arbeiten, rauchen sie oft Pfeife oder betrinken sich mit Bier und Whisky.

Neben der Tätigkeit als Branntweinbrenner, Schmied oder Musiker sind sie vor allem als Bankmanager bekannt geworden⁴. Im Allgemeinen sind sie viele hundert Jahre alt und haben ein sehr gutes Gedächtnis. Deshalb kennen sie noch sämtliche Orte, wo die alten irischen Könige und die Wikinger ihre Schätze versteckt haben. Da Leprechauns ziemlich geizig sind, wollen sie dieses Wissen mit niemandem teilen. Jeder Leprechaun ist somit Bewacher der geheimen, irischen Reichtümer. Um unerwartete Ausgaben bezahlen zu können, bewart ein Leprechaun einen kleinen Teil seines Reichtums als Goldmünzen in einem Topf auf. Dies führte zu der Annahme, dass jeder Leprechaun einen Topf voll Gold besitzt, dessen Versteck er durch das Ende eines Regenbogens markiert.

Wenn es diese verborgen Schätze der Leprechauns wirklich gäbe, würdest du dich dann auf die Suche begeben? – Wo befindet sich den eigentlich genau das Ende eines Regenbogens?



⁴ Vergleiche zum Beispiel die Gringotts-Bank der Koolde in Joanne K. Rowling's Buch „Harry Potter and the Philosopher's Stone“.

Teil B Dokumente für die Lehrenden

1 Vorwissen

Diese Unterrichtseinheit über den Regenbogen ist für Schüler geeignet, die im gymnasialen Physikunterricht bereits eine Einführung in die Optik erhalten haben. Aus der Mathematik sollten sie elementare geometrische Objekte und Konstruktionen kennen. Weil hier keine Berechnungen verlangt werden, brauchen die Schüler die genauen physikalischen Formeln nicht zu kennen. Ein qualitatives Verständnis von Reflexion, Brechung und Dispersion in grafischer Form ist jedoch vorausgesetzt.

Aristoteles' Text über das Phänomen des Regenbogens ist aufgrund des komplexen Satzbaus relativ schwer verständlich. Daher empfiehlt sich in vielen Fällen, die letzte Seite seines Textes auszulassen.

Das Thema Regenbogen ist anspruchsvoll und stellt selbst an Schüler der oberen Gymnasialklassen noch genügend Herausforderungen. Das Niveau der Erkenntnisse wird dort entsprechend höher ausfallen.

Allgemeine Voraussetzungen:

- Die Schüler haben bereits Experimentiererfahrung gesammelt. Sie können selbstständig die Projektoren, Laserpointer, etc. bedienen und wissen, wie man mit dem Experimentiermaterial umgeht.
- Die Schüler kennen geometrische Objekte wie Winkel, Dreiecke, Kugeln und Kegel. Sie wissen, wann man zwei Objekte als ähnlich bezeichnet.
- Dreidimensionales Vorstellungsvermögen ist von Vorteil. Die Schüler können beispielsweise erläutern, dass der Schnitt einer Ebene durch eine Kugel ein Kreis ist und bei der Rotation eines rechtwinkligen Dreiecks um eine Achse ein Kegel entsteht.
- Die Schüler haben gelernt, dass sichtbares Licht ein Ausschnitt aus dem Spektrum der elektromagnetischen Wellen ist und auf der Netzhaut des Auges Helligkeits- und Farbempfindungen hervorruft. Jede Farbe breitet sich im homogenen Medium gradlinig und unabhängig von den anderen Farben aus.
- Die Lernenden haben ein qualitatives Verständnis von Reflexion und Brechung an Grenzflächen und von Dispersion in Medien. Sie wissen, in welche Richtung ein Lichtstrahl beim Übergang von Luft in Wasser abgelenkt wird und können eine Skizze davon anfertigen. Ebenfalls wissen sie, dass weisses Licht durch ein Prisma spektral zerlegt wird und dabei blaues Licht mehr abgelenkt wird als rotes.

Für das Gelingen der Unterrichtseinheit entscheidend ist es, den Schülerinnen und Schülern zu verdeutlichen, dass von ihnen keine physikalisch fundierte Theorien über den Regenbogen erwartet werden. Vielmehr sollen sie ermutigt werden, die Rolle einer Forscherin oder eines Forschers einzunehmen, um das Staunen über den Regenbogen in Erklärungen umzusetzen. Dieser Versuch sollte ernsthaft unternommen werden, da es nicht ausschliesslich um den Spass geht.

2 Ablauf der Unterrichtseinheit

1. Der Lehrer bereitet das Material für die Arbeitsstationen vor. Jede der drei Arbeitsstationen sollte die gleiche Anzahl Plätze haben, damit jeweils nach einem Drittel der Zeit rotiert werden kann.
2. An Station I sollten die Dokumente in mehreren Kopien vorliegen, damit jeder Schüler ein eigenes Exemplar hat. Abhängig vom verfügbaren Material und der Klassengröße werden die Schüler in Zweier-, maximal Dreiergruppen aufgeteilt. Zweiergruppen sind für die Durchführung der Experimente am besten geeignet. Einzeln ist es recht mühsam, gleichzeitig die Lampe zu justieren, Wasser zu zerstäuben und noch nach einem Regenbogen zu suchen.
3. Nach einem Drittel der Zeit werden die Arbeitsplätze getauscht. In dieser Unterrichtseinheit wird für das selbstständige Entdecken eine Doppelstunde à je 45 Minuten kalkuliert. Das ist sicherlich die Minimalzeit für das Entdeckende Lernen. Die ersten 10 Minuten werden für die Information der Klasse verwendet, die Restzeit für das Experimentieren. Zusätzliche Zeit für die Experimente wäre wünschenswert, wohl jedoch selten realisierbar.
4. Für die Benotung sollen die Schüler und Schülerinnen ihre Notizen und Skizzen nach Arbeitsstationen ordnen, mit Namen beschriften und am Ende der Unterrichtseinheit dem Lehrer geben.
5. In der nächsten Stunde können die Schüler/innen ihre Erkenntnisse untereinander austauschen. Dazu setzen sich jeweils zwei Schüler aus zwei verschiedenen Gruppen zusammen und präsentieren sich gegenseitig die ihre Erfahrungen. Den Partner darf man selbst wählen. Das Vorgehen kann mit neuen Partnern ein- bis zweimal wiederholt werden, danach wird der Dialog vermutlich keine weiteren fruchtbaren Erkenntnisse bringen.
6. Zum Abschluss erstellt jeder Schüler einen kurzen Aufsatz, eine Skizze oder eine Mind-Map zum Thema Regenbogen. Darin soll eine individuelle Erklärung festgehalten werden, wie ein Regenbogen entsteht und was persönlich das wichtigste Lernergebnis dieser Einheit war.

3 Lösungsvorschläge

Im Folgenden sind mögliche Ergebnisse und Antworten der Schüler/innen an den drei Arbeitsstationen gemäss dem Bewertungsschema zusammengestellt. Denkbare Probleme und Irrwege sind in Klammern vermerkt.

Viele Erkenntnisse kann man an mehreren Stationen erlangen. Diese müssen von den Schülern natürlich nicht genau nach dem Schema eingeordnet werden. Sie dokumentieren ihre Experimente nicht mit Fotos, sondern mit eigenen Skizzen.

3.1 Lösungsvorschläge zu Arbeitsstation I

a) Entstehung (Fotos)

- Einen Regenbogen kann man dann sehen, wenn die Sonne in eine gegenüberliegende Wolkenwand scheint.
- Wechselndes Wetter mit Niederschlag und Sonne ist für das Beobachten eines Regenbogens günstig.
- Ein natürlicher Regenbogen kann in Wolken, Nebel, Dunst oder in einem Wasserfall entstehen. Einen Regenbogen kann man auch im Garten durch das Verspritzen von Wasser erzeugen.
- Ein Regenbogen kann immer dann entstehen, wenn es viele Wassertropfen gibt, die sich gegenseitig verstärken.
- In seltenen Fällen sieht man einen zweiten, schwächeren Regenbogen ausserhalb des Hauptbogens. (Dieser könnte die Schüler auch verwirren, da sie ihn vermutlich noch nie gesehen haben.)
- Der Regenbogen steht immer der Sonne gegenüber. Die Sonne ist immer im Rücken des Beobachters. (Leider sieht man auf den Fotos nie die Sonne, deshalb ist das relativ schwierig herauszufinden.)
- Morgens und abends sieht man häufiger einen Regenbogen als mittags. (Auf den Fotos sind keine Uhrzeiten angegeben. Aristoteles' Text oder persönliche Erfahrungen geben eventuell einen Hinweis.)

b) Farben (Fotos und Spektrum)

- Das Sonnenlicht wird von den Wolken reflektiert und in seine Farben aufgespaltet. Warum das genau passiert, ist noch nicht klar.
- Der Regenbogen hat wie das Lichtspektrum unendlich viele Farben.
- Manchmal ist der Regenbogen sehr farbig, manchmal nur weiss.
- Sieben Farben im Spektrum des Lichts kann das Auge und unsere Sprache gut unterscheiden: Rot, Orange, Gelb, Grün, (Hell-) Blau, Indigo (Dunkelblau) und Violett. Im Regenbogen sieht man meistens weniger.
- Nur die Friedensflagge B weiss die richtige Farbreihenfolge auf.
- Rot ist im Hauptbogen immer innen, Violett immer aussen. (Den Schülern entgeht vielleicht diese Erkenntnis und sie suchen nicht nach dem tieferen Grund dafür an Arbeitsstation 3.)
- "Die Farben des Regenbogens entsprechen den Spektralfarben des weissen Lichtes. Diese überlappen sich jedoch wegen der Ausdehnung der Sonne. Daderen Durchmesser rund 0.5° beträgt, ist auch jede Spektralfarbe im Regenbogen über diesen Winkelbereich verschmiert."
- Die Qualität der Regenbogenfarben hängt vermutlich mit der Wolkenart und der Luft zusammen.
- Im unteren Bereich ist der Regenbogen oft etwas heller als oben in der Mitte. (Die Schüler

stellen vielleicht fest, dass Regentropfen keine perfekten Kugeln sind, wissen aber natürlich nicht, wie sich eine mögliche Abplattung genau auswirkt.)

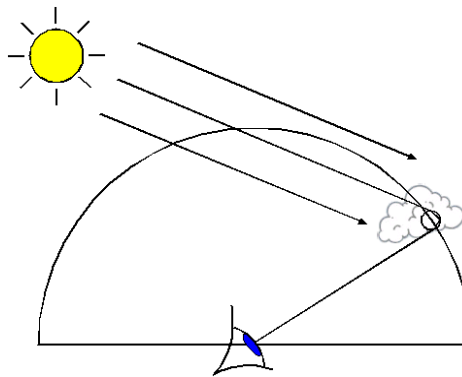
- Innerhalb des Regenbogens ist der Himmel heller als ausserhalb.
- Die Farbreihenfolge des Nebenbogens ist umgekehrt. (Leider kann man an Arbeitsstation III die Farben des zweifach reflektierten Strahls fast nicht mehr erkennen.)

c) **Form (Fotos)**

- Der Regenbogen hat immer die Form eines Kreissegments.
- Der Regenbogen erscheint immer unter dem gleichen Winkel. (Durch die Fotos kann man das unmöglich herausfinden. Hoffentlich bringen die bereitgelegten Geodreiecke die Schüler auf die Idee, das in den anderen Experimenten nachzumessen.)
- Der Regenbogen ist immer kleiner als ein Halbkreis.
- Die Grösse eines Regenbogens ist davon abhängig, wie weit er entfernt ist. Im Garten ist er klein, am Himmel gross.
- Der Nebenbogen hat einen grösseren Radius als der Hauptbogen.
- Von einem Flugzeug, einer Brücke oder einer Bergspitze aus kann man einen Regenbogen sehen, der grösser als ein Halbkreis ist. (Das steht nicht in Widerspruch zum Text von Aristoteles.)

d) **Geometrie (Aristoteles, Grafik zum Regenbogenwinkel)**

- Bei Sonnenauf- und Untergang ist der Regenbogen am grössten, am Mittag am kleinsten.
- Einen Regenbogen sieht man immer unter einem Winkel von 42° .
- Wenn es Quarzkristalle regnen würde, wäre der Regenbogen viel kleiner. Er hätte dann nur einen Öffnungswinkel von 19° .
- Wenn Wasser einen Brechungsindex von 1.31 hätte, würde der erste Nebenbogen mit dem Hauptbogen zusammenfallen.
- Jemand macht seine eigene Zeichnung zur Entstehung des Regenbogens.
- Jemand verbessert Aristoteles' Zeichnung, indem er die Sonne ins Unendliche versetzt. (Viele Schüler werden es wegen des eher schwierigen Textes gar nicht erst versuchen.)



- Jeder Regentropfen reflektiert nur einen sehr kleinen Anteil des Regenbogenlichts. Erst die Überlagerung des Lichts aller Regentropfen erzeugt den ganzen Bogen.
- Der Regenbogen ist die Schnittmenge zwischen einem Kegelmantel mit der Achse Sonne-Beobachter und einer Wolke.

e) **Kulturelles (Gedichte, Bibel, Legenden, Bauernregeln)**

- Den Regenbogen findet man morgens im Westen, weil die Sonne im Osten aufgeht. Am Abend ist es umgekehrt. Der Regenbogen ist im Osten, weil die Sonne im Westen untergeht.
- In Europa kommt das schlechte Wetter meistens vom Atlantischen Ozean, also von Westen. Wenn man einen Regenbogen im Westen sieht, muss es Morgen sein, weil dann

die Sonne im Osten ist. Das lässt schlechtes Wetter vermuten, da die Wolken weiter nach Osten ziehen werden. Am Abend ist es umgekehrt. Dann sind die Wolken schon im Osten und werden nicht mehr an uns vorbeiziehen. (Nicht jede Bauernregel lässt sich so wissenschaftlich erklären. Erfordert viel interdisziplinäres Wissen.)

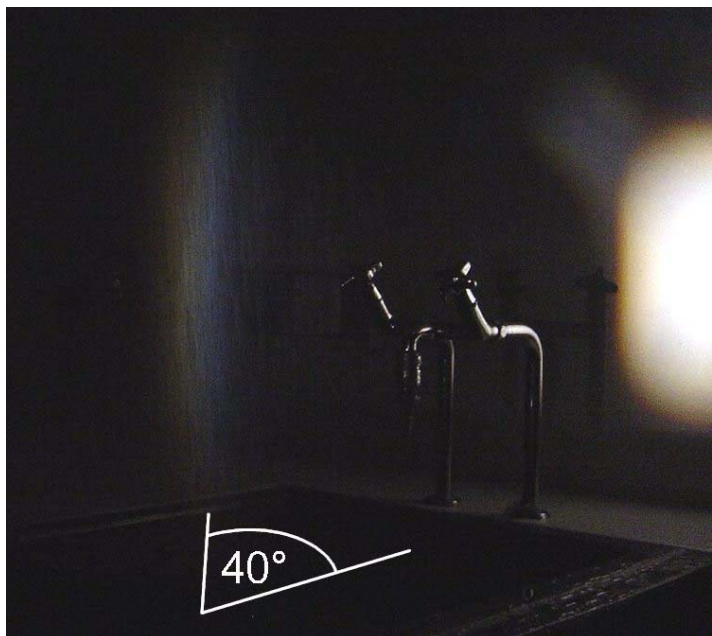
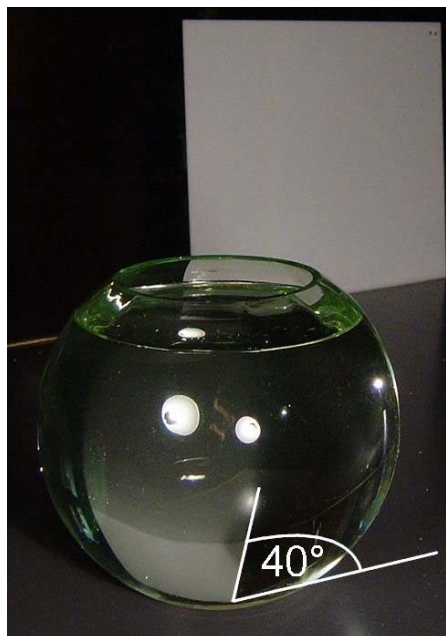
- In der Bibel ist der Regenbogen ein Symbol für den Bund zwischen Gott und den Lebewesen auf der Erde.
- Der Regenbogen ist ein Symbol des Friedens, der Schönheit, Einfachheit und Eleganz.
- Der Regenbogen ist das Symbol verschiedener gemeinnütziger Organisationen, etwa der Friedensbewegung, von Greenpeace oder der Gemeinschaft der homosexuellen Menschen.
- Das Ende des Regenbogens existiert nicht wirklich. Jeder Beobachter sieht einen eigenen Regenbogen und dadurch ein anderes Ende.
- Ich würde mich nie auf die Suche nach einem Schatz am Ende des Regenbogens begeben, weil es völlig zufällig ist, wo man ein Regenbogen sieht.

f) **Persönliches, Spezielles**

- Ein Schüler oder eine Schülerin schildert ein interessantes Erlebnis mit einem Regenbogen.
- Jemand schreibt ein eigenes Gedicht.
- Regentropfen sind wegen der starken Oberflächenspannung von Wasser kugelförmig.
- Regentropfen werden nicht grösser als einige Millimeter, denn sie werden durch den Luftwiderstand zerteilt.
- Schnell fallende Tropfen werden durch den Luftwiderstand abgeplattet.
- Alle Lebewesen können den Regenbogen sehen – die (Ur-) Menschen, Katzen und sogar Bienen.

3.2 Lösungsvorschläge zu Arbeitsstation II

a) **Durchführung des Experiments**



b) *Verständnis des Strahlengangs*

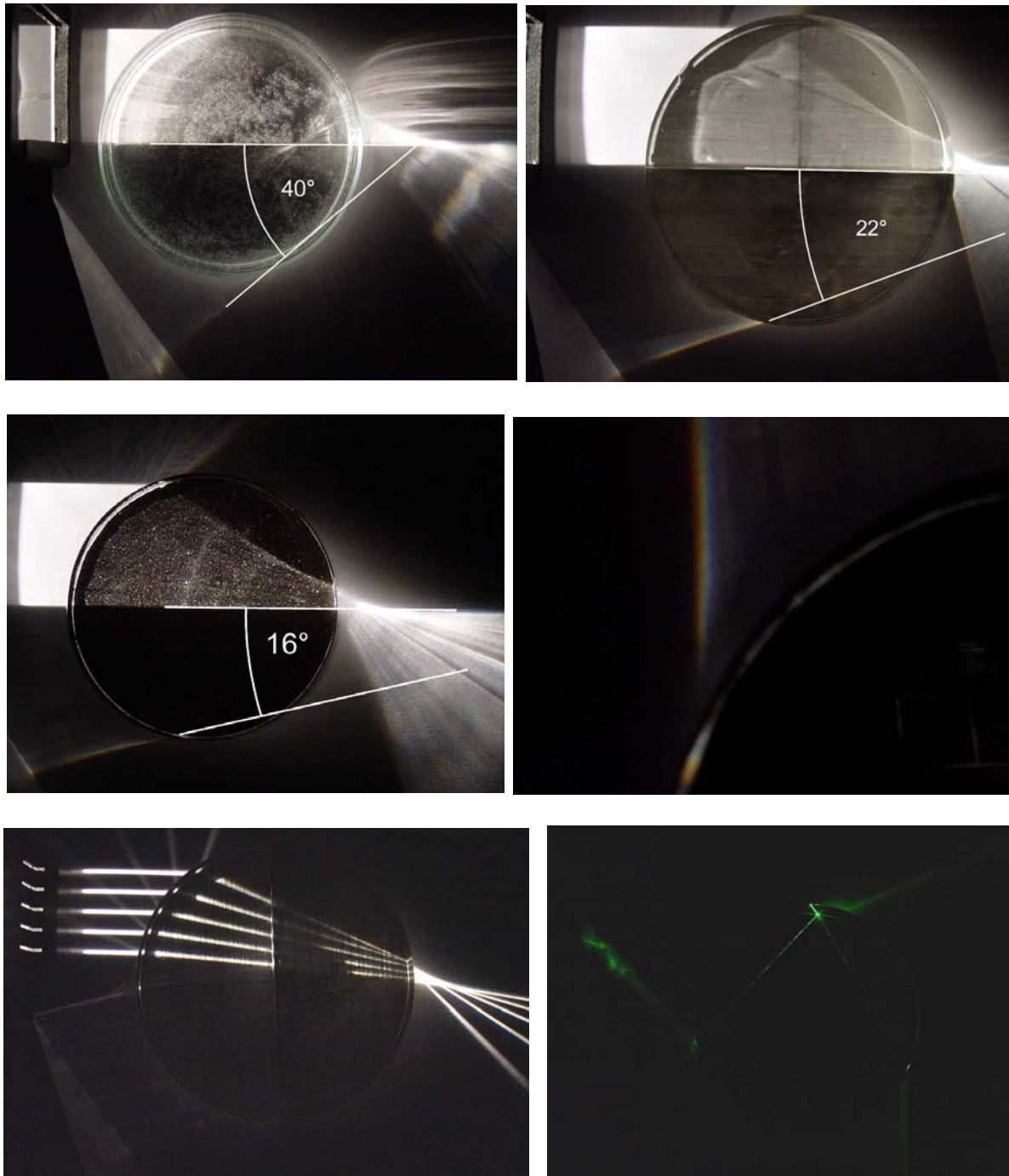
- Das Licht des Projektors fällt parallel auf die Glaskugel und wird kegelförmig zurückgeworfen.
- Man sieht einen kreisrunden Regenbogen, wenn man zwischen Projektor und Glaskugel einen Karton mit einem Loch in der Mitte hält. (Dieser Regenbogen kann von den Schülern irrtümlich für eine Analogie mit dem am Himmel sichtbaren Regenbogen gehalten werden. Der Regenbogen wird aber nicht an den Himmel projiziert, sondern entsteht durch die reflektierten Lichtkegel der Regentropfen.)
- Im Innern dieses Kreises ist es heller als an der Aussenseite.
- Wenn man direkt auf die Kugel schaut, sieht man keinen Regenbogen.
- Ein einzelner Tropfen reflektiert nur sehr wenig Licht. Erst alle Tropfen zusammen erzeugen einen Regenbogen.
- Man findet Regenbögen lediglich an geeigneten Orten, da sie nur unter einem bestimmten Winkel sichtbar sind.
- Ein Stück Alufolie an der Rückseite der Glaskugel macht den Regenbogen deutlicher. Die Folie verbessert den Reflexionskoeffizienten. Es geht weniger Licht bei der Reflexion an der Rückseite verloren.

c) *Zusammenhang mit dem Regenbogen*

- Bewegt man sich selbst, bewegt sich auch der Regenbogen: Geht man auf den Regenbogen zu, entfernt er sich. Bewegt man sich zu weit, sieht man ihn nicht mehr, weil die Wassertropfen nicht mehr unter dem richtigen Winkel zu sehen sind.
- Der Regenbogen ist nur eine optische Täuschung. Man kann ihn nicht anfassen.
- Der Regenbogen entsteht immer auf der Himmelsseite, die der Sonne gegenüberliegt.
- Der Regenbogen ist immer kreisförmig. Der Kreisradius kann variieren. Der Bogen erscheint immer im gleichen Winkel zur Sonne.
- Wenn ein Wolkenschleier vor die Wolke zieht, kann man den Regenbogen nicht mehr sehen, weil das diffus gestreute Licht dann nicht mehr parallel ist.

3.3 Lösungsvorschläge zu Arbeitsstation III

a) Durchführung des Experiments



b) Verständnis des Strahlengangs

- Das Licht wird immer zweifach gebrochen – beim Eintritt und beim Austritt aus dem Tropfen. Die Brechung fächert das weisse Licht in seine Spektralfarben auf.
- Legt man unter die Versuchsanordnung ein Blatt Papier, kann man das Experiment sehr leicht mit einem Bleistift übertragen und ausmessen. Man kann einen oder mehrere Strahlengänge einzeichnen.
- Das zurückgeworfene Licht wird maximal um 42° abgelenkt. Im maximalen Ablenkwinkel tritt das meiste Licht aus. Dieses Licht erzeugt den Regenbogen.
- Der Ablenkwinkel hängt vom Material ab: In Wasser beträgt er ca. 42° , bei Plexiglas ca. 24° . Diese Messungen stimmen mit den Tabellenangaben von Arbeitsstation I überein.
- Ist das einfallende Licht nicht parallel, kann man beim Austritt des Lichts aus dem Glaszylinder keinen Regenbogen erkennen.
- Der austretende Regenbogen ist nur wenige Grad breit.
- Der Ablenkwinkel eines Lichtstrahls hängt vom Stossparameter ab, d. h. von seinem Abstand zur Mitte der Schale.
- An der Rückseite der Schale gibt es keine Totalreflektion.

c) Zusammenhang mit Regenbogen

- Wegen der Rotationssymmetrie einer Kugel ist es ausreichend, den Strahlengang an einer kleinen Scheibe des Regentropfens (d. h. an einem flachen Zylinder) zu demonstrieren.
- Der Lichtstrahl wird bei jeder Brechung oder Reflektion schwächer, deshalb ist das Regenbogenlicht viel schwächer als die Lichtquelle.
- Nur ein sehr kleiner Teil des einfallenden Lichts erzeugt den Regenbogen. (Hier liegt die Gefahr, dass die Schüler den Regenbogen an der falschen Stelle suchen. Sie lassen sich durch das nach hinten austretende Licht verwirren)
- Das Licht im Inneren des Tropfens wird für den Hauptbogen einmal, für die Nebenbögen mehrmals reflektiert.
- Regenbögen höherer Ordnung kann man nicht sehen, weil sie für das Auge zu schwach sind.
- Weil viele Lichtstrahlen nach innen abgelenkt werden, ist der Himmel innerhalb des Regenbogens heller.
- Rotes Licht liegt am weitesten aussen und erscheint im Regenbogen innen.
- Wenn das einfallende Licht nicht parallel ist, werden die Spektralfarben vermischt.

4 Beurteilungsschema

Das Beurteilungsschema gleicht der Wegbewertung mit Häckchen von Gallin und Ruf im Reisetagebuch. Dabei steht nicht das korrekte Schulbuchwissen im Vordergrund, sondern die Auseinandersetzung des Schülers mit dem Lernstoff. Das Informationsmaterial ist in verschiedene Themen eingeteilt, für die jeweils null bis zwei Punkte vergeben werden. Die Themeneinteilung ist die selbe, wie sie in der Lenkung für die Schüler angegeben wurde.

- 0 Punkte) Es ist nur eine ungenügende Leistung erkennbar. Die Notizen haben nichts mit dem Thema Regenbogen zu tun oder sind abgeschrieben. Dem Schüler scheinen die Voraussetzungen zu fehlen. Er sollte sich vor der nächsten Prüfung nochmals mit den Phänomenen der Strahlenoptik beschäftigen.
- 1 Punkt) Das Informationsmaterial wurde durchschnittlich bearbeitet. Es wurden eigene Gedanken und Ideen notiert. Der Schüler scheint die Grundprinzipien der Strahlenoptik verstanden zu haben.
- 2 Punkte) Es ist eine intensive Auseinandersetzung mit dem Material erkennbar. Es sind interessante Gedankengänge, gute Erklärungen und Ideen oder überraschende Schlussfolgerungen zu finden. Der Schüler hat den Mut aufgebracht, etwas Unkonventionelles zu versuchen.

Das Informationsmaterial besteht aus einem Teil mit Experimenten und einem Teil mit Dokumenten. In beiden Teilen können maximal 12 Punkte erreicht werden. Viele Gedankengänge lassen sich mehreren Themen zuordnen. Wurde die gleiche herausragende Idee mehrfach genannt, wird sie nur einmal mit zwei Punkten honoriert. Ein genaueres Notenschema wird nicht angegeben, da es vom Stand der Schüler und der verfügbaren Zeit abhängt.

Teil C Quellenangaben

Literatur

1. Boyer C. B.: The Rainbow From Myth to Mathematics. Princeton 1959 (Macmillan Education Ltd), [Der Klassiker in der Literatur über den Regenbogen.]
2. Aristoteles: Meteorologie, Über die Welt. 350 v. Chr. (Übersetzt von Hans Strohm und 1970 herausgegeben von E. Grumach und H. Flasher bei Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt), [Deutsche Übersetzung von Aristoteles' griechischem Original „Meteorologica“.]
3. Descartes R.: Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences, Les météores, De l'arc-en-ciel. 1637 (Erschienen 1966 bei Granier-Flammarion, Paris.)
4. Tipler P. A.: Physik. Heidelberg Berlin Oxford 1994 (Spektrum Akademischer Verlag), [Sehr umfassendes Lehrbuch der Physik; enthält eine anschauliche Berechnung des Beobachtungswinkels des Regenbogens.]
5. Lee R. L. Jr., Fraser A. B.: The Rainbow Bridge, Rainbows in Art, Myth, and Science. Bellingham 2001 (The Pennsylvania State University Press), [Interdisziplinäre Beschreibung des Regenbogens von seinen Ursprüngen bis heute; sehr umfangreich und schön illustriert.]
6. Curran B.: The Truth about the Leprechaun, Dublin 2000, (Wolfhound Press), [Sammlung von überlieferten Beschreibungen der Herkunft und des Lebens irischer Kobolde.]
7. Deutschschweizerische Mathematik- und Physikkommission: Formeln und Tafeln, Mathematik - Physik. Zürich 1992, 5. Auflage (Orell Füssli Verlag Zürich), [Enthält Kennzahlen üblicher optischer Materialien und viele Formeln der Mathematik und Physik.]
8. Humphreys W. J.: Physics of the Air, New York und London 1940, 3. Auflage (McGraw-Hill Book Company), [Klassiker der Phänomene in der Erdatmosphäre; erfordert höhere mathematische Fähigkeiten und berechnet zum Beispiel auch die durch die Welleneigenschaften des Lichts verursachten überzähligen Regenbögen.]
9. Wong B. D., Henn H.-W.: Der Regenbogen, Berichte über Mathematik und Unterricht. Zürich 1998 (Eidgenössische Technische Hochschule), [Sehr gut ausgearbeitetes Projekt zum Thema Regenbogen für den Mathematikunterricht.]
10. Hesse H.: Magie der Farben, Aquarelle aus dem Tessin, Mit Betrachtungen und Gedichten. Frankfurt am Main 1980 (Insel Verlag)
11. Nonhoff B. L. F.: Liebend gerne Liebend, Poesie und Märchen. Norderstedt 2001 (Books on Demand GmbH)

Internetadressen

1. Aristotle: The Internet Classics Archive: Meteorology.
<http://classics.mit.edu/Aristotle/meteorology.3.iii.html>, [Englische Version von Aristoteles' Werk „Meteorologica“.]
2. Hwang F.-K.: Rainbow. <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/Rainbow/rainbow.html>, [Demonstration des Strahlengangs und der Intensitätsverteilung an einem Regentropfen mit einem Java Applet.]
3. Lynds B. T.: About Rainbows. <http://www.unidata.ucar.edu/staff/blynds/rnbw.html>, [Guter Überblick über die Geschichte und Physik des Regenbogens.]
4. Wicklin F. J., Edelman P.: Circles of Light, The Mathematics of Rainbows.
<http://www.geom.uiuc.edu/education/calc-init/rainbow/>, [Kurs der University of Minnesota über den Regenbogen, der viele Fragen beantwortet.]
5. Lee R. L.: The Rainbow Bridge, Chapter 8.
http://www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter_8.html, [Beantwortet, woher die Farben des Regenbogens kommen, insbesondere die der überzähligen Bögen.]
6. Boisset G.: Luxpop: Index of refraction values and photonics calculations.
<http://www.luxpop.com>, [Berechnet Brechungsindizes für viele verschiedene Wellenlängen und Temperaturen.]
7. Macnamara N, Anderson W.: The Leprechaun Companion.
<http://www.unicornsgarden.com/bkleprec.htm>, [Homepage of the Book „The Leprechaun Companion“, 1999 (Pavillion Books).]
8. Luther L.: Die Bibel nach der Übersetzung Martin Luthers in der revidierten Fassung von 1984. <http://www.bibel-online.de>,
9. Seidenfaden E.: Bildergalerie mit digitalen und analogen Aufnahmen von Himmelsobjekten und atmosphärischen Erscheinungen wie Regenbögen, Halos und vielem mehr. <http://www.paraselene.de>

Abbildungen

1. Bundesverband Windenergie: Bildergalerie, Windenergieanlagen in der Landschaft.
<http://www.wind-energie.de/images/galerie/landschaft/wea-regenbogen.jpg>
2. Tobias Thomsch: Bilder Galerie.
http://www.tobiasth.de/gallery/details.php?image_id=1343
3. Katja und Jeremy Anderegg: Website, Regenbogen an der Streetparade 2004 in Zürich.
<http://www.anderegg-web.ch/fotos/regenbogen.jpg>
4. Lin Wang: Homepage, Niagra Fall. <http://www.andrew.cmu.edu/user/hyu/rainbow.html>
5. Markus Stadler: Internet Panorama, Kaukasus – Georgien, Regenbogen im Ingurital.
[Publiziert mit freundlicher Genehmigung des Fotografen.]
http://www.stadler-markus.de/files/galerie/kaukasus/13_regenbogen.htm
6. Highlights of the City of Norton, September 2003.
<http://www.cityofnorton.org/General%20Info/Pic%20Gallery/9-28-03%20Rainbow%203.JPG>
7. Pat Wright: Photo Gallery.
<http://maunakea.com/patsadv/images/MNTvalley%20rainbow.jpg>

8. Anderson Jacobsen: Kreisförmiger Regenbogen, Oktober 2003, Im Flugzeug über Südfrankreich. [Publiziert mit freundlicher Genehmigung des Fotografen.]
http://www.extrospection.com/archives/2003/10/circular_rainbow.html
9. Lutz Mager: Nebelbogen in der Finnmarksvidda, Oktober 1999 um 8 Uhr 30 morgens.
<http://www.meteoros.de/nebel/nb7.htm>
10. Manuel Walser: Regenbogen im Garten, erzeugt mit einem Wasserschlauch, August 2004, Uitikon Waldegg.
11. Manuel Walser: Regenbogen im Garten, erzeugt mit einem Wasserschlauch, August 2004, Uitikon Waldegg.
12. Fuji Foto Film Wettbewerb 1998. <http://www.fujifilm.co.jp/fpc/fpc98/fpc04s1w08.html>
13. Ursula Wamister: Seidentuch mit Regenbogenmotiv.
<http://www.wamister.ch/silk/tuecher.htm>
14. Malvorlage für Wassertropfen.
<http://www.windowcolor-und-mehr.de/Vorlagen/Herbst/imagepages/image14.html>
15. Malvorlage für Wassertropfen.
<http://www.free-window-color.de/Malvorlagen/Kategorien/Comic/Regentropfen-1.gif>
16. Wassertropfen Workshop mit Fireworks MX/2004.
http://www.traum-projekt.com/html/fire_works/wassertropfen/img/Wassertropfen.png
17. Johannes Schneider: Max Planck Institut für Chemie, Schülerpraktikum: Versuche zur Physik von Aerosolen, Niederschlägen und Luftströmungen.
http://www2.mpgch-mainz.mpg.de/~schneid/schpr_2.html
18. Heinz-Jürgen Visser: Fotohomepage, Spielereien mit Wassertropfen.
<http://www.hjvisser.de/wasser/master02.htm>
19. Creative Photo Gallery, Rain drops.
<http://home.tiscalinet.ch/creativephoto/Regentropfen.jpg>
20. Manuel Walser: Regenbogenwinkel des Haupt- und Nebengebogens, geplottet mit Mathematica
21. Noah und seine Söhne empfangen Gottes Vereinbarung, 6. Jahrhundert v. Chr., Vienna Genesis (Ms. Teol. graec 31, folio III, p. 5), Österreichische Nationalbibliothek, Porträtsammlung, Wien. (Entnommen aus Lee, Seite 37)
22. Manuel Walser: Aus Aristoteles Text Meteorologica rekonstruierte, dreidimensionale Skizze zur Erklärung des Regenbogens
23. Manuel Walser: Aus Aristoteles Text Meteorologica rekonstruierte, zweidimensionale Skizze zur Erklärung des Regenbogens