

Phänomen Regenbogen

(Vortrag: P. Volkmer)

Inhaltsverzeichnis

1. GRUNDLAGEN UND THEORETISCHE ERLÄUTERUNGEN	1
1.1 HUYGENSCHES PRINZIP	2
1.2 BRECHUNGSGESETZ (SNELLIUS).....	3
1.2.1 <i>Formelableitung für Brechungsgesetz</i>	4
1.2.2 <i>Brechungsindex und Brechungsgesetz</i>	5
1.2.3 <i>Reflexion und Totalreflexion</i>	6
1.3 INTERFERENZ.....	7
2. REGENBOGEN	8
2.1 ENTSTEHUNG VON HAUPT- UND NEBENREGENBOGEN	9
2.2 EIGENHEITEN DES REGENBOGENPHÄNOMENS.....	12
3. BESONDERHEITEN VON REGENBÖGEN.....	15
3.1 ERZEUGUNG VON REGENBÖGEN DURCH SPIEGELUNG	15
3.2 ANNORMALE REGENBÖGEN.....	17
4. GALERIE DER REGENBOGENBILDER.....	17
5. DEMONSTRATIONSVERSUCH.....	18
5.1 MESSUNG DES MAXIMALEN ABLENKWINKELS.....	19
5.2 MESSUNG DER INTERNEN REFLEXIONEN.....	20
5.2.1 <i>Darstellung höherer interner Reflexionen</i>	21
6. QUELLENNACHWEIS	21

1. Grundlagen und theoretische Erläuterungen

Erste ernsthafte Erklärungen des Regenbogenphänomens gehen auf René Descartes (1637) zurück, basierend auf der geometrischen Optik. Nachdem die Wellennatur des Lichts in die Wissenschaft Eingang gefunden hatte, gelang es Georg Airy (1836) auch die bis dahin nicht zu erklärenden Sekundärbögen mit Hilfe der Interferenz zu deuten.

Um diese Entwicklung nachzuvollziehen, sollen kurz die wichtigsten Grundlagen erläutert werden:

- das Huygensche Prinzip (Huygens, 1629 –1695)
- das Brechungsgesetz (Snellius, 1621),
- die Interferenz.

1.1 Huygensches Prinzip

Von dem holländischen Physiker Christiaan Huygens wurde folgendes Prinzip sinngemäß formuliert:

„Den Ausbreitungsvorgang einer Welle kann man so konstruieren, dass man von jedem Punkt einer bestehenden Wellenfläche eine neue kugelförmige Elementarwelle ausgehen lässt. Die Umhüllende aller Elementarwellen (deren Zentren auf der ursprünglichen Wellenfläche liegen) ergibt die neue Wellenfläche zum späteren Zeitpunkt.“

Dieses Prinzip ist die Grundlage für alle Beugungserscheinungen. Um das Prinzip zu verstehen, sollen kurz die Begriffe „Elementarwelle“ und „Wellenfläche“ erläutert werden, Abbildung 1.

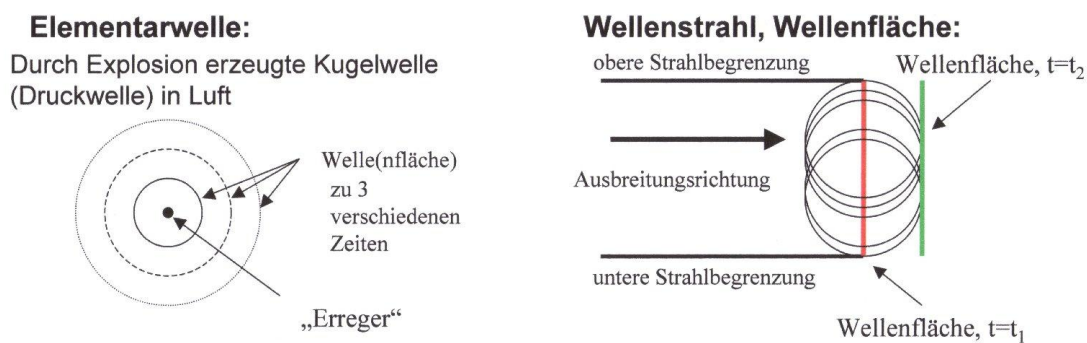


Abbildung 1: Elementarwelle und Wellenfläche

Linker Teil der Abb. 1:

Annahme: Am Ort eines in der Atmosphäre befindlichen „Erregers“ wird eine Explosion erzeugt, die kurzzeitige Störung bildet eine Kugelwelle (Elementarwelle), die sich in das ungestörte Medium (Luft) ausbreitet. Die Grenzfläche zwischen dem ungestörten Medium und der einsetzenden „Störung“ (Druckwelle) kann als Wellenfläche bezeichnet werden.

In zwei Dimensionen ist dieses Störungsereignis gut erkennbar, wenn man einen Stein in ein vorher unbewegtes Wasser senkrecht fallen lässt, auf der Wasseroberfläche breitet sich eine Kreiswelle aus.

Rechter Teil der Abb. 1:

Ebene Wellenflächen entstehen durch die Überlagerung von Elementarwellen z.B. eines Wellenstrahls. Dabei bildet die ursprüngliche Wellenfläche das Zentrum für unendliche viele kugelförmige Elementarwellen. Die Umhüllende zu diesen Elementarwellen zu einem späteren Zeitpunkt bilden die neue ebene Wellenfläche und damit das Fortschreiten der Störung in Ausbreitungsrichtung.

1.2 Brechungsgesetz (Snellius)

Das Brechungsgesetz von Lichtstrahlen (u.a. beschrieben vom holländischen Physiker / Naturforscher Snellius, 1621) kann mit dem Huygenschen Prinzip erklärt werden (eine andere Interpretation ist das Fermatsche Prinzip, nach dem Licht auf dem Weg von Punkt A nach Punkt B immer den kürzesten, schnellsten Weg zurücklegt).

Die Abbildung 2 verdeutlicht die Herleitung des Brechungsgesetzes:

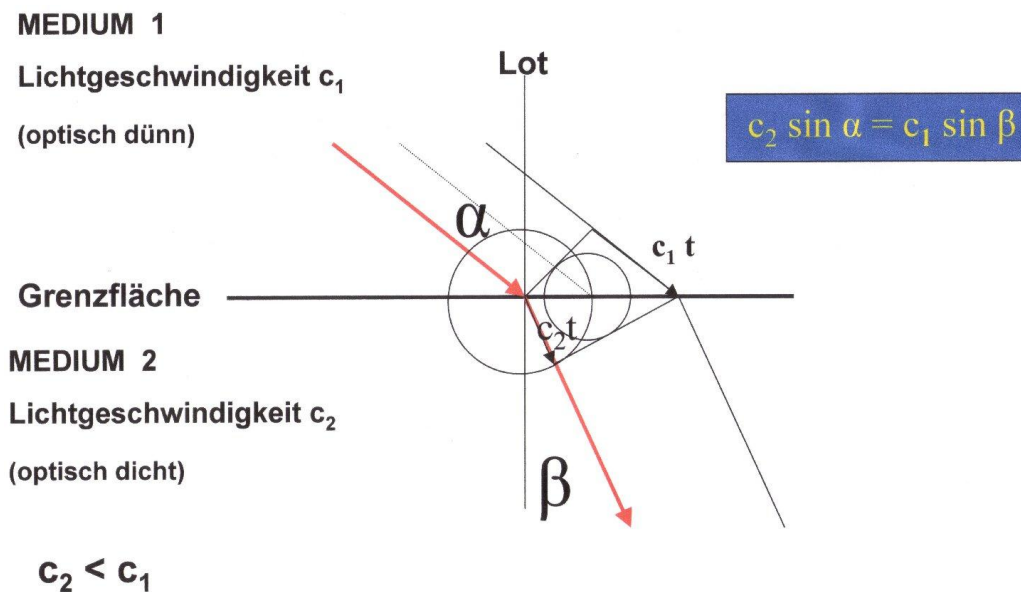


Abbildung 2: Herleitung des Brechungsgesetzes

Eine ebene Grenzfläche trennt das Medium 1, in dem die Lichtgeschwindigkeit die Größe c_1 hat, vom Medium 2, in dem die Lichtgeschwindigkeit die Größe c_2 hat. Es soll hier gelten: $c_2 < c_1$, d.h. die Lichtgeschwindigkeit c_1 im Medium 1 ist größer als die Lichtgeschwindigkeit c_2 im Medium 2; man spricht auch davon, dass das Medium 1 optisch „dünn“ ist, während das Medium 2 optisch „dicht“ ist.

Es möge ein sich geradlinig ausbreitendes Lichtbündel unter dem Winkel α (gemessen gegen das Lot auf die Grenzfläche) auf diese Grenzfläche auftreffen. Da das Lichtbündel eine gewisse Breite hat (repräsentiert durch die Wellenfläche), wird die rechte Bündelbegrenzung (in der Abb. 2 der rot gezeichnete Lichtstrahl) zuerst Berührung mit der Grenzfläche haben, während der andere Endpunkt der Wellenfläche (die linke Bündelbegrenzung) noch voll im Medium 1 „unterwegs“ ist und noch eine Zeit t benötigt, um die Strecke $c_1 t$ zurückzulegen, bevor auch hier die Grenzfläche erreicht wird.

Erreicht der rechte (rot gezeichnete) Lichtstrahl die Grenzfläche, entsteht am Treffpunkt eine (kugelförmige) Elementarwelle, die sich jetzt mit der kleineren Geschwindigkeit c_2 (des Mediums 2) in das Medium 2 hinein bewegt. (In der Zeichenebene der Abb. 2 wird aus der Kugelwelle eine Kreiswelle, die sich in der

Zeit t um den Weg $c_2 t$ in das Medium 2 hinein bewegt hat.) In der Zeit t legt die Welle/der Lichtstrahl die Strecke $c_2 t$ im Medium 2 zurück (in der Abb. 2 durch einen Kreis mit dem Radius $c_2 t$ dargestellt, es gilt dabei nur der Halbkreis im Medium 2).

In der Zeit t hat jetzt auch der rechte Lichtstrahl des Bündels die Grenzfläche erreicht. Von seinem Treffpunkt mit der Grenzfläche kann jetzt eine Tangente an den Kreis (mit dem Radius $c_2 t$) im Medium 2 gezeichnet werden. Diese Tangente bildet die neue Wellenfläche des Lichtbündels nach der Zeit t im Medium 2. Die Tangente ist die Umhüllende aller Elementarwellen, die sich beim Auftreffen des Lichtbündels auf der Grenzfläche zwischen dem Treffpunkt des linken und des rechten Lichtstrahls des Lichtbündels entlang der Grenzfläche bilden.

Ergebnis ist, dass der Lichtstrahl in das Medium 2 hinein gebrochen wird und dabei den Winkel β mit dem Lot bildet.

1.2.1 Formelableitung für Brechungsgesetz

Ausgehend von der Abbildung 2 betrachtet man zur Herleitung der Formel für das Brechungsgesetz folgende Geometrie, siehe Abbildung 3:

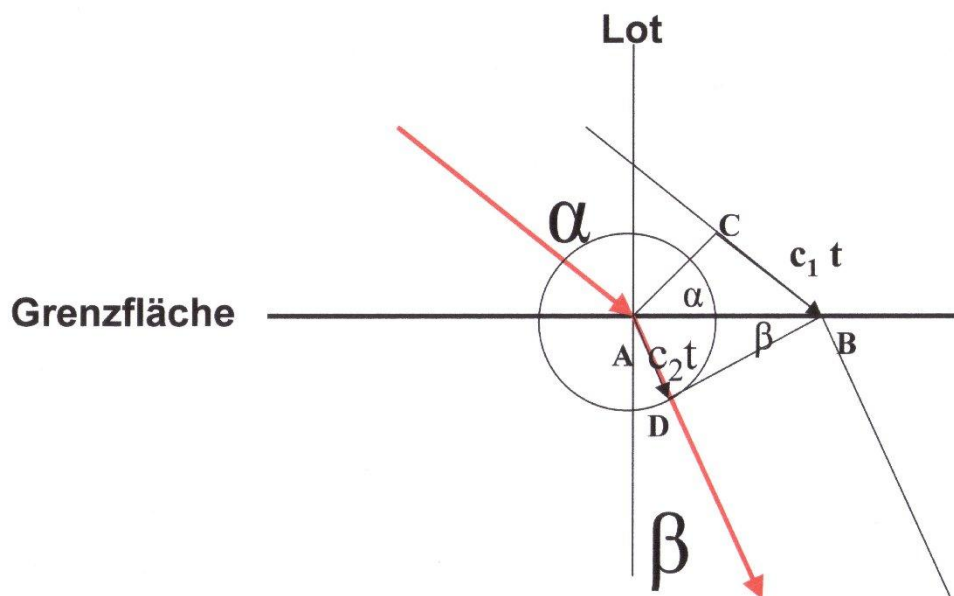


Abbildung 3 : Formelableitung des Brechungsgesetzes

Im Medium 1 (oberhalb der Grenzfläche) existiert das rechtwinklige Dreieck ABC (gebildet aus den Punkten A, B und C), im Medium 2 ist das ebenfalls rechtwinklige Dreieck ABD (gebildet aus den Punkten A, B und D) zu betrachten.

Wegen eines Grundsatzes in der Geometrie, nach dem Winkel, deren Schenkel senkrecht aufeinander stehen, gleich groß sind, wiederholt sich der Winkel α im Dreieck ABC am Punkt A, während sich der Winkel β im Dreieck ABD am Punkt B wiederholt.

Dreieck ABC:

Relevante Seiten: CB mit der Länge $c_1 t$,
AB mit der Länge L ,
Winkel α am Punkt A;

Dreieck ABD:

Relevante Seiten: AD mit der Länge $c_2 t$,
AB mit der Länge L ,
Winkel β am Punkt B;

Aus der Trigonometrie folgt durch Anwendung der Sinus-Funktion
im Dreieck ABC:

$$\sin \alpha = c_1 t / L \quad (\text{Gl. 1})$$

und

im Dreieck ABD:

$$\sin \beta = c_2 t / L \quad (\text{Gl. 2})$$

Löst man die Gleichungen Gl.1 und Gl.2 nach der Unbekannten L auf, ergibt sich:

$$L = c_1 t / \sin \alpha \quad (\text{Gl. 1.1})$$

$$L = c_2 t / \sin \beta \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Da $L = L$ ist, ergibt sich daraus: $c_1 t / \sin \alpha = c_2 t / \sin \beta$

und daraus nach Division durch t und anschließender Umformung das bekannte Brechungsgesetz:

$$\mathbf{c_2 \sin \alpha = c_1 \sin \beta} \quad (\text{Gl. 3})$$

1.2.2 Brechungsindex und Brechungsgesetz

Die Gleichung Gl. 3 ist wegen des expliziten Auftretens der Lichtgeschwindigkeiten c_1 und c_2 „unhandlich“. Man definiert deshalb eine neue Größe n , die das Ausbreitungsmedium charakterisiert und sich aus dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum und der Lichtgeschwindigkeit c_1 im betrachteten Medium 1 ergibt; diese Größe heißt:

$$\mathbf{\text{Brechungsindex} \quad n_1 = c_0 / c_1}$$

Mit Medium 1, Brechungsindex $n_1 = c_0 / c_1$,
und Medium 2, Brechungsindex $n_2 = c_0 / c_2$ folgt durch Umformung und
Einsetze in Gleichung Gl.3 das bekannte Gesetz:

$$\mathbf{n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta}$$

Für Vakuum gilt $n = 1$ (wegen c_0 / c_0);

für alle anderen Stoffe ist $n > 1$, da die Lichtgeschwindigkeiten in diesen Stoffen kleiner sind als die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Typische Größenordnungen für den Brechungsindex sind:

Luft : $n = 1,00027$
 Wasser : $n = 1,333$
 Kronglas: $n = 1,510$
 Flintglas : $n = 1,613$

1.2.3 Reflexion und Totalreflexion

Die Abb. 4 zeigt die Strahlengänge bei verschiedenen Übergängen; im oberen Teil fällt Licht vom optisch dünnen Medium ins optisch dichtere Medium ($n_2 > n_1$), dabei wird der Lichtstrahl zum Lot hingebrochen ($\beta < \alpha$); ein Anteil des auf die Grenzfläche fallenden Lichts wird auch reflektiert, wobei „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ ist.

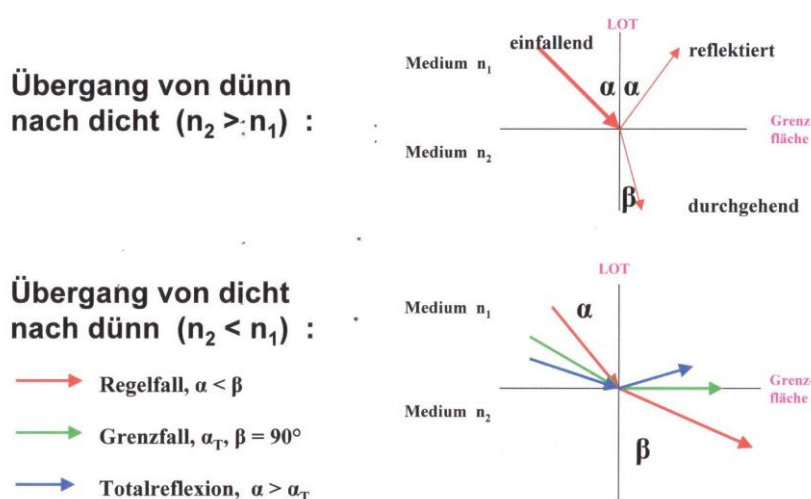


Abbildung 4: Strahlengänge bei Brechung, Reflexion, Totalreflexion

Im unteren Abbildungsteil ist der Übergang vom optisch dichten Medium ins optisch dünnere Medium gezeigt (auf die Darstellung des reflektierten Anteils ist hier verzichtet worden). In diesem Fall wird der einfallende Lichtstrahl vom Lot weggebrochen ($\beta > \alpha$) – rot gezeichneter Strahlverlauf. Bei größer werdenden Einfallswinkel α nähert sich der gebrochene Strahl immer mehr der Grenzfläche und verläuft schließlich bei dem Grenzwinkel α_T in der Grenzfläche ($\beta = 90^\circ$) – grün gezeichneter Strahlverlauf.

Für größere Einfallswinkel $\alpha > \alpha_T$ dringt der Lichtstrahl nicht mehr in das dünnere Medium 2 ein, sondern wird vollständig (total) in das Medium 1 reflektiert – blau gezeichneter Strahlverlauf.

1.3 Interferenz

Erst als sich die Interpretation durchgesetzt hatte, dass Licht auch als Ergebnis eines Schwingungsvorgangs = Welle beschrieben werden kann mit einer bestimmten Amplitude (= Intensität) und einer bestimmten Frequenz bzw. Wellenlänge (= „Farbe“), war es möglich, Phänomene der Lichtauslöschung und Lichtverstärkung zu erklären. Das Hilfsmittel dazu ist der Vorgang der Interferenz.

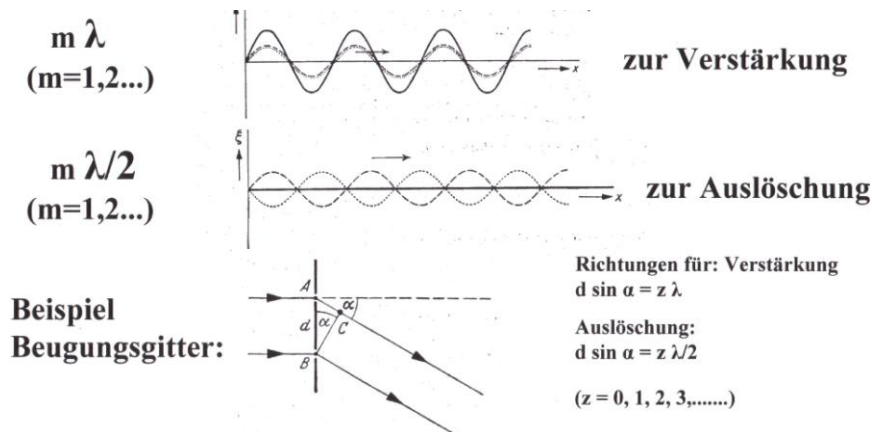


Abbildung 4: Wirkung der Interferenz (aus: Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik)

Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Frequenz können sich an einem Ort so überlagern (interferieren), dass entweder Verstärkung oder Auslöschung der Welle passiert. Dies hängt davon ab, welcher Gangunterschied (unterschiedliche Weglänge) der beiden ursprünglichen Wellen auf dem Weg zum Überlagerungsort entstanden ist. In der Abbildung 4 ist im oberen Teil die Überlagerung der punktierten und gestrichelten Welle dargestellt, wobei gilt:

Fall der Verstärkung: wenn der Gangunterschied (unterschiedliche Weglänge) der Wellen ein mehrfaches der Wellenlänge λ beträgt;

Fall der Auslöschung: wenn der Gangunterschied (unterschiedliche Weglänge) der Wellen ein mehrfaches der halben Wellenlänge λ beträgt.

Im unteren Teil der Abbildung 4 ist die Anwendung eines Beugungsgitters zu sehen, im einfachsten Fall ein Doppelspalt. Licht trifft auf eine Fläche, in die 2 lichtdurchlässige Spalte im Abstand d eingearbeitet sind, sodass hinter der Fläche zwei Teilstrahlen entstehen. Durch Lichtbeugung an den Spalten (über die Entstehung von „Elementarwellen“) entsteht hinter der Fläche eine abwechselnde Folge von Lichtverstärkung und Lichtauslöschung.

2. Regenbogen

Die Abbildung 5 verdeutlicht die prinzipielle Anordnung für die Beobachtung eines Regenbogens.

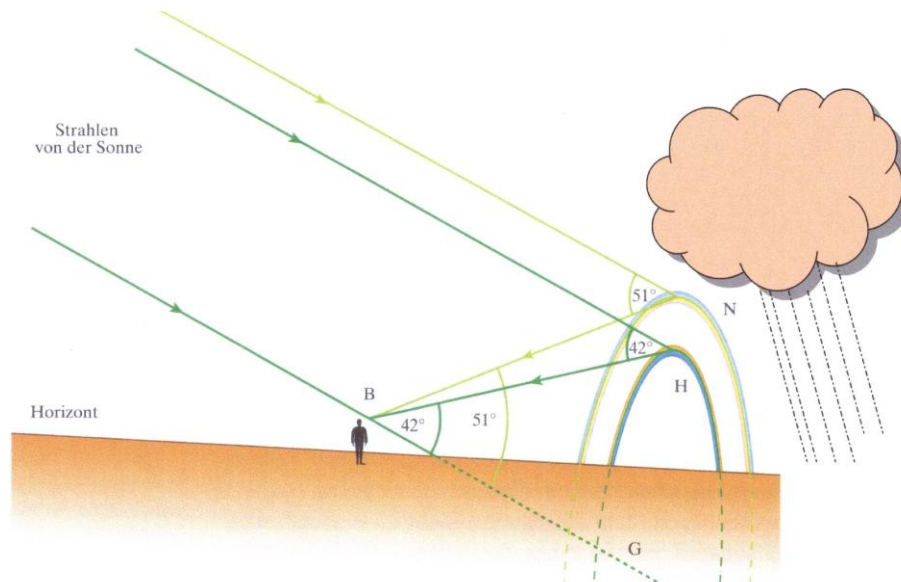


Abbildung 5 : Entstehung des Regenbogens
(Quelle: K.Schlegel, „Vom Regenbogen zum Polarlicht“)

Ein Beobachter B hat in seinem Rücken die Sonne, die eine vor dem Beobachter (entgegen gesetzt zur Sonne) befindliche Regenfront beleuchtet. Dabei entstehen i.d.R. zwei Regenbögen, der Hauptregenbogen H und der Nebenregenbogen N. Beide sind Kreise, die sich um die unmittelbare Gegenrichtung G der Sonne bilden. Dabei schließt der Hauptregenbogen H mit dieser Gegenrichtung G einen Winkel von 42° ein, während der Nebenregenbogen N mit dieser Richtung einen Winkel von 51° bildet. Da die Anordnung (gerade Verbindungslinie Sonne-Beobachter-Regenfront) den Beobachter einbezieht, sehen 2 Beobachter, die sich an zwei verschiedenen Orten befinden, nicht denselben, sondern immer ihren „eigenen“ Regenbogen (erkennbar an den jeweiligen Schnittpunkten der Bögen mit dem Horizont).

Die Höhe der Bögen über dem Horizont hängt von der Sonnenhöhe über dem Horizont ab. Bei Sonnenaufgang oder Sonnenuntergang ist die Scheitelhöhe der Regenbögen über Horizont maximal (nämlich 42° für den Haupt- und 51° für den Nebenregenbogen). Mit steigender Sonnenhöhe rücken die Scheitelhöhen der Bögen näher an den Horizont. Ab einer Sonnenhöhe von 42° ist der Hauptregenbogen, ab 51° der Nebenregenbogen nicht mehr zu sehen.

Verantwortlich für die Kreisstruktur der Bögen ist der Entstehungsmechanismus, die Rückreflexion des Sonnenlichts in den i.d.R. kugelförmigen Wassertropfen des Regens (wie in den folgenden Abbildungen erläutert).

2.1 Entstehung von Haupt- und Nebenregenbogen

Die Abbildung 6 veranschaulicht die Entstehung des Hauptregenbogens.

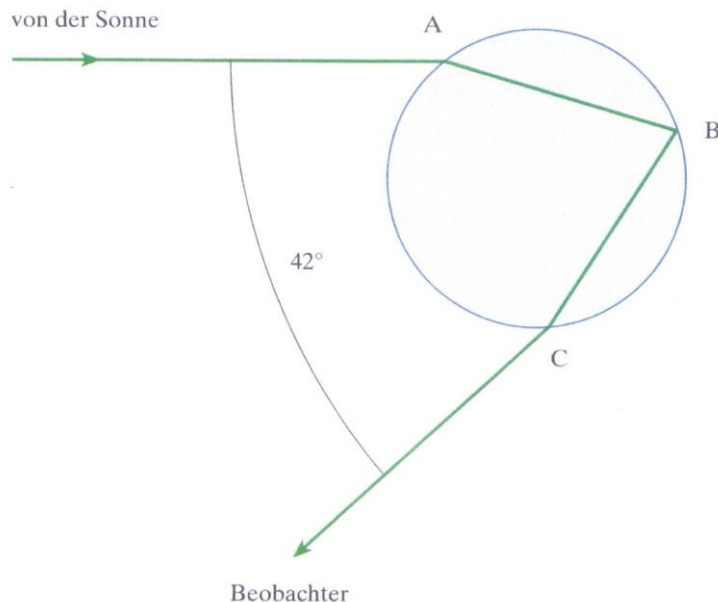


Abbildung 6 : Entstehung des Hauptregenbogens
(Quelle: K.Schlegel, „Vom Regenbogen zum Polarlicht“)

Das einfallende Sonnenlicht trifft einen Regentropfen im Punkt A. Dabei wird der Lichtstrahl in den Wassertropfen hineingebrochen (gemäß des bekannten Snelliusschen Brechungsgesetzes), durchläuft den Wassertropfen und trifft die rückseitige Tropfenbegrenzung im Punkt B. Dort wird er reflektiert und tritt im Punkt C wieder aus dem Tropfen heraus.

Da der Tropfen über seinen gesamten Durchmesser vom Sonnenlicht getroffen wird, ist

- a) der Austrittspunkt C abhängig von der Lage A des Eintrittspunktes relativ gemessen zum Abstand vom Mittelpunkt des kugelförmigen Wassertropfens und erreicht mit 42° seinen größten Ablenkwinkel;
- b) der Kreis des Regenbogens das Ergebnis Lichteinfallssymmetrie um die Richtung zur „Gegensonne“; in obiger Abbildung wird ja nur eine Ebene der Ablenkungsgeometrie dargestellt. Tatsächlich muss man diese Darstellung drehend um 360° um die Sonnen“richtung“ vorstellen.

Phänomen Regenbogen

Die Abbildung 7 veranschaulicht die Geometrie, die zur Entstehung des Nebenregenbogens führt.

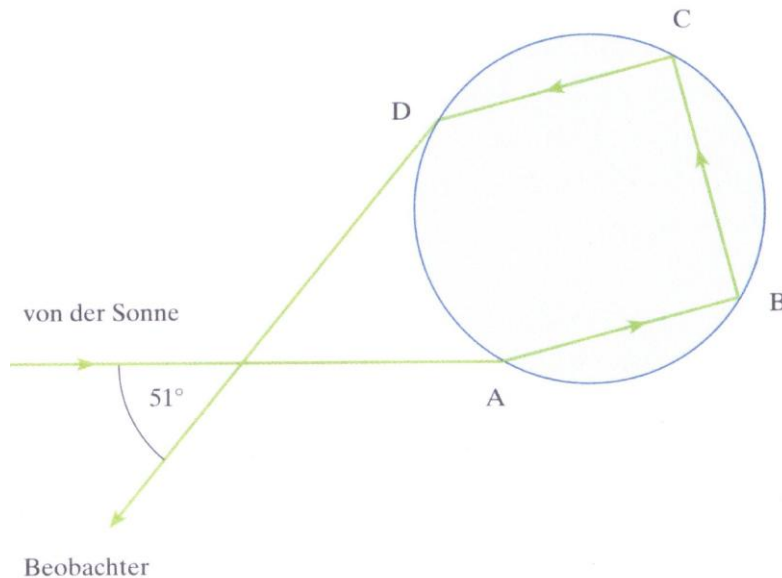


Abbildung 7 : Entstehung des Nebenregenbogens
(Quelle: K.Schlegel, „Vom Regenbogen zum Polarlicht“)

Verantwortlich hierfür ist nämlich eine zweifache interne Reflexion des bei A eintretenden Lichtstrahls in den Punkten B und C, bevor der Lichtstrahl im Punkt D wieder den Wassertropfen in Richtung Beobachter verlässt. Der maximal abgelenkte Strahl beträgt in diesem Fall 51° .

„Beim Vergleich der Abbildungen der Abbildungen 6 und 7 fällt auf, dass der Punkt A einmal oben am tropfen und einmal auf der unteren Hälfte gezeichnet wurde. Das liegt daran, dass generell ein Beobachter am Erdboden angenommen wurde.“ (Zitat aus K.Schlegel, „Vom Regenbogen zum Polarlicht“).

Der Nebenregenbogen ist schwächer als der Hauptregenbogen ausgeprägt, weshalb er nicht immer gut zu sehen ist. Grund dafür sind Lichtverluste bei der doppelten Reflexion im Tropfeninneren.

Phänomen Regenbogen

Wegen der Dispersion des Lichts, d.h. die wellenlängenabhängige Brechung des Lichts, wird der auf den Wassertropfen einfallende „weiße“ Lichtstrahl im Punkt A in seine Farben zerlegt. Dies veranschaulicht die Abbildung 8:

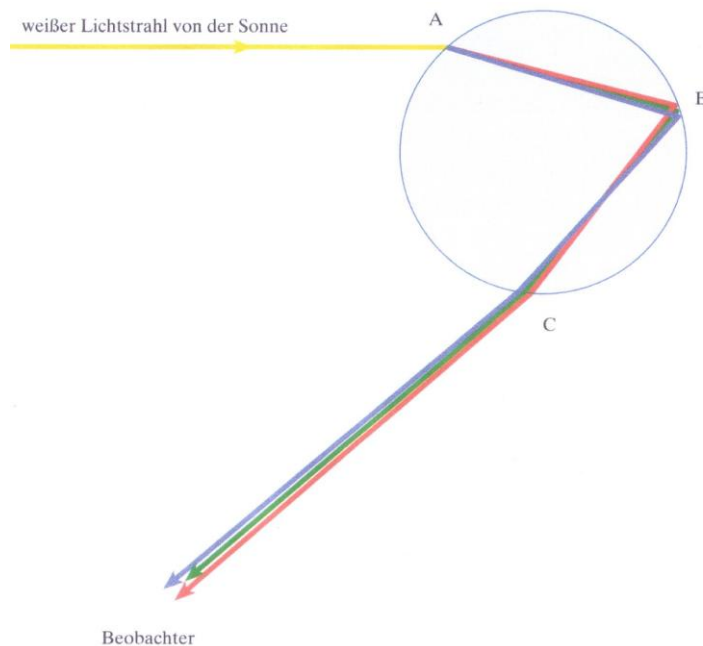


Abbildung 8 : Entstehung der Regenbogenfarben
(Quelle: K.Schlegel, „Vom Regenbogenbogen zum Polarlicht“)

Blaues Licht wird stärker gebrochen als rotes Licht, der Lichtstrahl fächert sich farbig auf, wobei durch die Reflexion bei B und die erneute Brechung bei C (beim Austritt aus dem Tropfen) der Grad der Auffächerung zunimmt. Auch die Tropfengröße bestimmt den Grad der Auffächerung, denn in kleinen Wassertropfen ist der Lichtweg innerhalb des Tropfens kleiner als in großen Wassertropfen.

Deshalb sind zum Beispiel die Regenbögen bei Nebelwänden nahezu farblos (weiß), weil die Nebeltröpfchen sehr klein sind.

Auch die Intensität der Farben hängt vom Tropfendurchmesser ab, bei größeren Tropfen wirken die Farben intensiver, teilweise werden bestimmte Farben auch betont.

Die Farbreihenfolge geht von außen nach innen

beim Hauptregenbogen von rot nach blau/violett,
beim Nebenregenbogen von blau/violett nach rot.

Die Farbumkehr rührt her von der zweiten Reflexion des Lichtstrahls im Tropfeninneren.

Neben der Farbigkeit fallen aber weitere Eigentümlichkeiten beim Regenbogen auf, die im Folgenden erläutert werden.

2.2 Eigenheiten des Regenbogenphänomens

Bei der Beobachtung von Regenbögen fallen folgende Eigentümlichkeiten auf:

1. Die Farbumkehr bei der Farbreihenfolge von Haupt- und Nebenregenbogen,
2. ein hellerer Himmel innerhalb des Hauptregenbogens (und prinzipiell auch außerhalb des Nebenregenbogens),
3. ein dunklerer Himmel zwischen Haupt- und Nebenregenbogen,
4. Sekundärbögen, die sich manchmal innerhalb des Hauptregenbogens direkt am Regenbogen anschließen.

Diese Eigentümlichkeiten findet man in dem folgenden Foto wieder, Abbildung 9.



Abbildung 9: Regenbogen über Karlsruhe
(Quelle: <http://www.wolkenatlas.de/wolken/gregb01.htm>;
Foto: B.Mühr, Karlsruhe, 22.4.1999, 17:30 Uhr MESZ)

Die Entstehung der Farben und die Farbumkehr bei den Regenbögen sind bereits oben erklärt worden.

Im Folgenden sollen die anderen Eigentümlichkeiten erläutert werden.

Phänomen Regenbogen

Die Abbildung 10 verdeutlicht noch einmal die Geometrie der Lichtstrahlablenkung beim Hauptregenbogen. Im Gegensatz zur Abbildung 6 wird aber nicht nur ein Strahl gezeigt, sondern ein ganzes Strahlenbündel, wobei nur diejenigen Teilstrahlen verfolgt werden, die den Wassertropfen von der Mitte beginnend bis radial nach außen treffen.

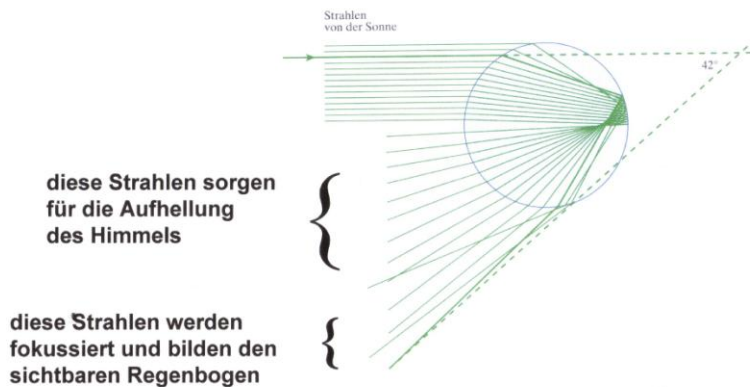


Abbildung 10 : Zur Interpretation der Regenbogenercheinungen
(Quelle: K.Schlegel, „Vom Regenbogen zum Polarlicht“)

Verfolgt man den Strahlenverlauf des am weitesten innen gelegenen Strahls (der den Tropfen fast zentral trifft), so erkennt man, dass der reflektierte Strahl den Tropfen ebenfalls in der Nähe des Tropfenmittelpunkts verlässt. Je weiter nun der einfallende Lichtstrahl vom Tropfenzentrum den Wassertropfen trifft, umso größer ist der Ablenkwinkel des zurückgeworfenen Strahls (gleichbedeutend mit der Wanderung des „Austrittspunktes C“ in Abbildung 6 entlang des Tropfenumfangs). Diese Ablenkung erreicht ein Maximum bei 42° , etwa zugehörig zu einem einfallenden Lichtstrahl, der den Tropfen im Abstand von ca. $0,85 R$ (R =Tropfenradius) vom Zentrum trifft.

Dieser einfallende Strahl ist in der in Abb. 10 zur Verdeutlichung besonders verlängert eingezeichnet. Alle Strahlen, die den Tropfen in einem größeren Abstand als $0,85 R$ treffen (in der Abb. 10 sind beispielhaft zwei weitere Strahlen dargestellt), führen wieder zu Ablenkungen, die kleiner sind als 42° : in der Abbildung ist dies durch die beiden zugehörigen verlängert gezeichneten Austrittsstrahlen demonstriert.

Zur Aufhellung:

Die Ablenkung um 42° herum ist also die maximale Ablenkung, durch die in dieser Nähe befindlichen Strahlen wird der Regenbogen gebildet. Die weiter nach „innen“ abgelenkten Lichtstrahlen sorgen für die Aufhellung des Himmelshintergrundes innerhalb des Hauptregenbogens. Diese Aufhellung ist jedoch nur selten zu beobachten, weil sie von den örtlichen Gegebenheiten der Beobachtung abhängt.

Zum Dunkelraum zwischen Haupt- und Nebenregenbogen:

Betrachtet man den Strahlenverlauf im Tropfen für die Erzeugung des Haupt- und Nebenregenbogens, so fällt auf, dass im Bereich zwischen 42° und 51° der austretenden Strahlen nicht mehr so viele Strahlen austreten (es werden zwischen

ein- und zweimaliger Reflexion im Tropfeninneren nicht mehr so viele Strahlen zurück gestreut), der Beobachter erlebt diesen Bereich „dunkler“.

Dieser Bereich wird auch „Alexanders Dunkelraum“ genannt, nach Alexander von Aphrodisias (um 300 n.Chr.).

Zu den Sekundärbögen:

Die Entstehung der Sekundärbögen konnte Descartes mit Hilfe der geometrischen Optik nicht erklären. Das war erst möglich, als man das Licht auch mit seiner Wellennatur verstand und den damit verbundenen Möglichkeiten der Interferenz.

Der Physiker Georg Airy erklärte die Sekundärbögen mit Hilfe der Interferenz 1836 zum ersten Mal.

Zur Erklärung betrachtet man diejenigen Lichtstrahlen, die als Eintritts- und Austrittsstrahlen den ursprünglichen Regenbogen bilden, die Strahlen also um den maximalen Ablenkwinkel von 42° , siehe auch Abb. 10.

Diese Strahlen treten als paralleles Lichtbündel bei etwa $0,85 R$ (R =Tropfenradius) in den Wassertropfen ein, wobei ihre zugehörige Wellenfläche eben ist. Auf Grund der Brechungen treten diese Strahlen als divergentes Strahlenbündel wieder aus dem Wassertropfen aus, ihre Wellenfläche ist am Austrittsort gebogen. Das führt dazu, dass für hinreichend dicht nebeneinander gelegene Lichtstrahlen kleine Gangunterschiede (verschieden lange Weglängen) entstehen und trotzdem Interferenzbedingungen erfüllt werden. Diese Überlagerung sorgt für weitere Sekundärbögen (Intensitätsstreifen) innerhalb des Hauptbogens. Diese Bögen sind ebenfalls farbig, jedoch nur mit einigen Farben des Spektrums ausgestattet.

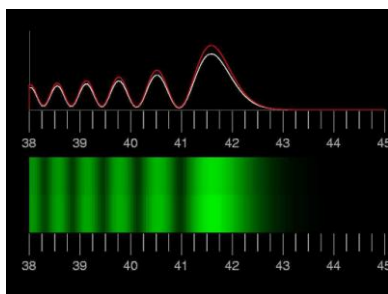


Abbildung 11:
Berechnete Intensitätsverteilung der
Sekundärbögen für einfarbiges Licht,
 $\lambda = 550 \text{ nm}$.
Hauptbogen bei ca. 42° , Sekundärbögen
als Helligkeitsstreifen links davon.
Quelle:

<http://www.itp.uni-hannover.de/~zawischa/ITP/regnbgv03.pdf>

In der Abbildung 11 ist die Intensitätsverteilung der Sekundärbögen für einfarbiges Licht berechnet worden unter Zugrundelegung einer ebenen Geometrie (rote Kurve) und einer 3dimensionalen Geometrie (weiße Kurve).

3. Besonderheiten von Regenbögen

Neben dem „klassischen“ Entstehungsmechanismus eines Regenbogens (durch Sonne beleuchtete Regenfront einer Wolke) sind auch andere Entstehungsszenarien möglich. Doch immer gilt die Grundanordnung: der beobachter hat vor sich eine Tropfenfront und in seinem Rücken die Lichtquelle (i.a. die Sonne), die die Tropfenfront beleuchtet.

Folgende Szenarien sind möglich:

- Regenbögen vor Wasserfällen,
- Gischt, Wasserstaub (z.B. bei der Gartenwässerung!),
- Tau,
- Nebel,
- durch Spiegelung erzeugte zusätzliche Regenbögen.

3.1 Erzeugung von Regenbögen durch Spiegelung

Befindet sich in der Nähe des Beobachters (vor oder hinter ihm) eine ruhige, ebene Wasserfläche (z.B. See) und spiegelt sich die im Rücken des Beobachters befindliche Sonne in dieser Wasserfläche, kann es zur Bildung weiterer Regenbögen kommen.

Abbildung 12 veranschaulicht ein solches Szenario, bei dem sich im Rücken des Beobachters eine große glatte Wasserfläche befindet.

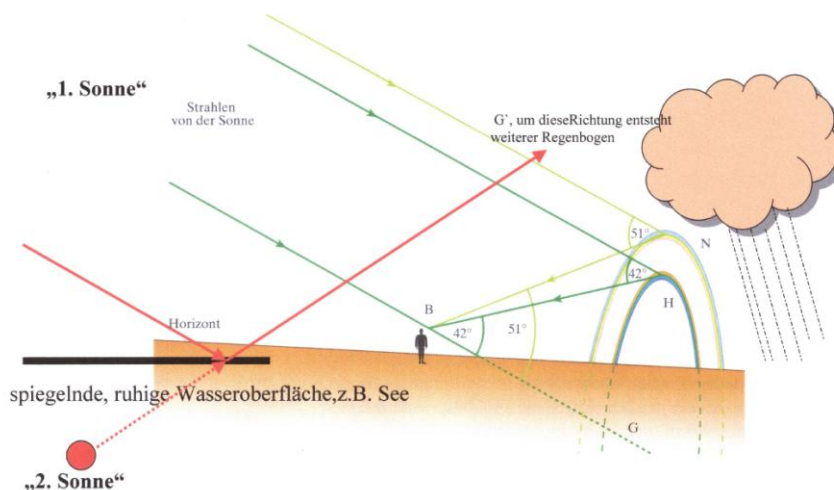


Abbildung 12: Prinzip der gespiegelten Sonne

Die Spiegelung der „realen“ Sonne in der Wasseroberfläche bewirkt, dass eine zweite „fiktive“ Sonne entsteht, die sich gemäß der geradlinigen Rückverlängerung des reflektierten Sonnenstrahls unterhalb des Horizonts (der Wasseroberfläche) befindet. Diese „fiktive“ 2. Sonne beleuchtet nun ebenfalls die Regenwolke. Um die Gegenrichtung G' , die sich jetzt oberhalb des Horizontes befindet, bilden sich

Phänomen Regenbogen

ebenfalls Haupt- und Nebenregenbogen aus (mit jeweils den bekannten 42° bzw. 51° Öffnungswinkeln gegenüber der Gegenrichtung).

Die beiden Hauptbögen, zugehörig zur 1. und 2. (reflektierten) Sonne, schneiden sich immer am Horizont. Das gilt auch für die beiden Nebenregenbögen.

Abbildung 13 veranschaulicht dies für verschiedene Sonnenhöhen.

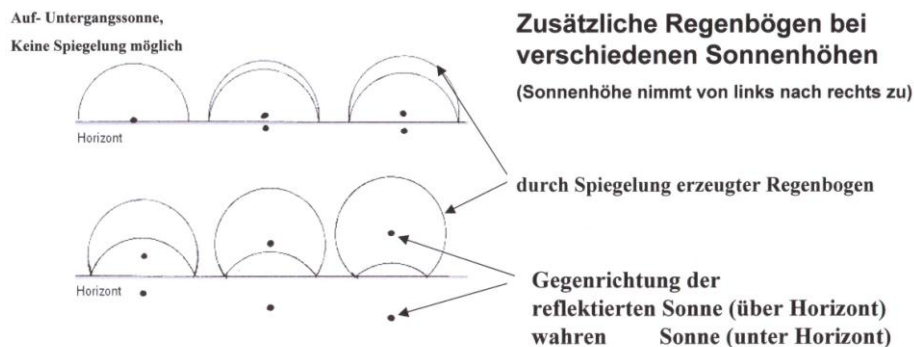


Abbildung 13: Regenbogenhöhen bei gespiegelter Sonne
(Quelle: <http://www.meteoros.de/indexatmo.htm>)

In den einzelnen Sequenzen ist jeweils z.B. der Hauptregenbogen dargestellt, die Sonnenhöhe nimmt von links nach rechts zu. In dem ersten Bild ist die Sonnenaufgangssituation dargestellt, hierbei ist definitionsgemäß keine Spiegelung möglich, weil ja die Sonnenstrahlen parallel zum „Spiegel“ (des Sees) verlaufen. Zu sehen und besonders dargestellt ist die Gegenrichtung zur Sonne und der Kreisbogen des Regenbogens. Mit zunehmender Höhe der Sonne wandert die Gegenrichtung der „wahren“ Sonne unter den Horizont und der zugehörige Kreisbogen nähert sich mit seiner Scheitelhöhe ebenfalls dem Horizont.

Die Gegenrichtung zur reflektierten Sonne dagegen erhebt sich über den Horizont, ebenso die Scheitelhöhe des zugehörigen Kreisbogens, beide mit wachsender Tendenz bei ansteigender Sonnenhöhe.

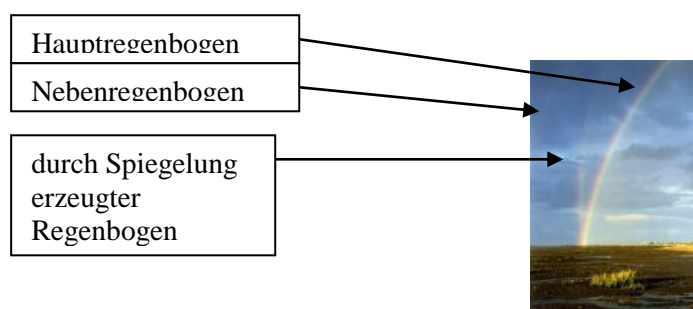


Abbildung 14: Beobachtung eines durch Spiegelung entstandenen weiteren Regenbogens
(Quelle: <http://www.meteoros.de/indexatmo.htm>; Foto: M.Zschamack, Dresden, 16.8.1999)

Die Abbildung 14 zeigt ein seltenes Foto dieses Szenarios. Es wurde am (ruhigen) Wattenmeer (Nordsee) in Norddeutschland aufgenommen.

3.2 Annormale Regenbögen

Neben den bekannten Regenbogenbildern gibt es auch Beobachtungen von ungewöhnlichen Regenbögen.

Auf der Internetseite <http://www.meteoros.de/indexatmo.htm> sind einige Erscheinungen nachzulesen:

- a) Regenbögen im divergenten Licht (Lichtquelle: Autoscheinwerfer),
- b) ungeklärte Regenbogenbeobachtungen (durch Zeichnungen dokumentiert),
- c) gespaltene Regenbögen.

Insbesondere die Beobachtung gespaltener Regenbögen ist in diesem Link durch Fotos belegt. Dabei spaltet sich z.B. der Hauptregenbogen im Kreisbogenverlauf in zwei getrennt nahe beieinander weiter verlaufende Regenbögen auf. Das Verhalten ist noch nicht ganz geklärt, doch gilt folgende Annahme als der Schritt in die richtige Richtung:

Die den Regenbogen bildenden Wassertropfen in der Regenfront sind nicht überall gleichmäßig kugelförmig. Durch lokale atmosphärische Bedingungen in den Wolken (z.B. starke Auf- oder Abwinde) werden die Regentropfen deformiert und bilden möglicherweise birnenähnliche Strukturen. In diesen Strukturen ist der interne Strahlenverlauf aber ein ganz anderer als in einem kugelförmigen Regentropfen, so dass durch zusätzliche Brechungen weitere aus dem Tropfen austretende Strahlen entstehen, die zur Spaltung des ursprünglichen Regentropfens führen.

4. Galerie der Regenbogenbilder

Bestimmt finden die meisten in ihren Fotosammlungen entsprechende Motive von Regenbögen.

Auf folgenden Internetseiten sind einige schöne Beispiele veröffentlicht:

<http://www.wolkenatlas.de/wolken/gregb01.htm>,
<http://www.meteoros.de/indexatmo.htm>

Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

5. Demonstrationsversuch

Die theoretischen Erklärungen der vorgenannten Kapitel lassen sich durch einen relativ einfachen Demonstrationsversuch nachvollziehen (Konzeption, Durchführung und Auswertung : Peter Volkmer, Autor dieser Unterlage).

Benötigt werden:

- a) ein Gefäß mit rundem Querschnitt (Glaskugel / Vase, Becherglas / Zylinder),
- b) eine stark gebündelte Lichtquelle, vorzugsweise ein Laserpointer,
- c) eine Messvorrichtung zur Ablesung der Ablenkwinkel.

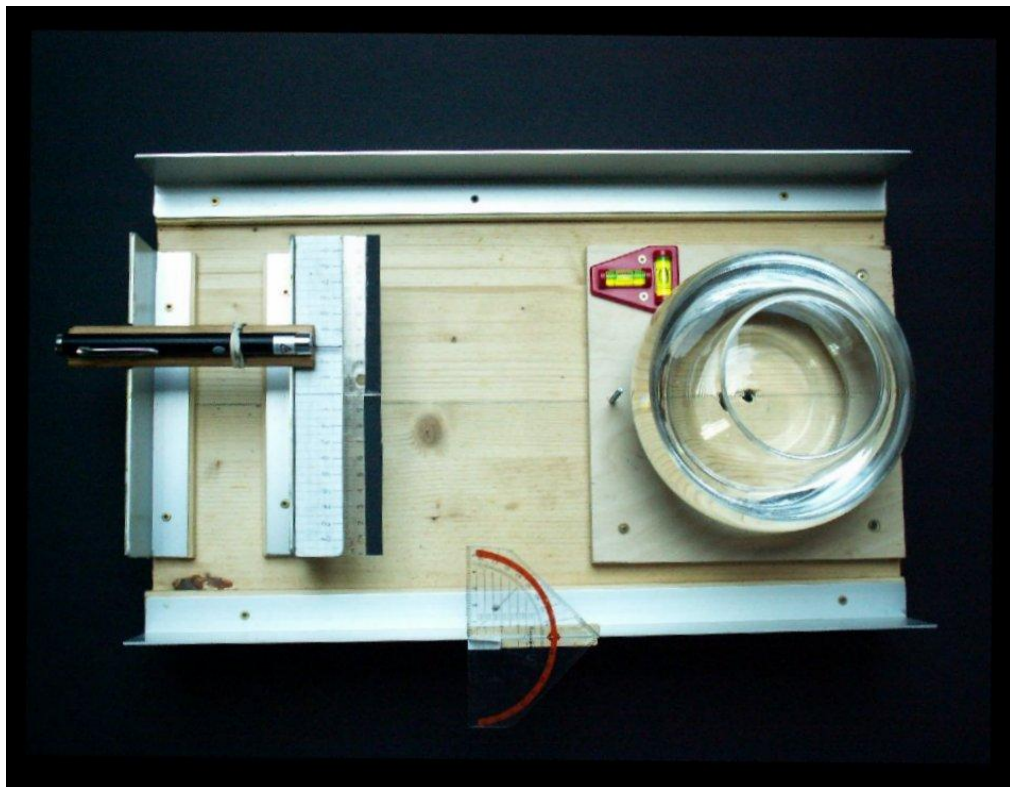


Abbildung 15: Aufbau des Demonstrationsversuchs (Foto: Peter Volkmer)

Abbildung 15 zeigt den Aufbau mit einem kugelförmigen Glas, das mit Wasser aufgefüllt wird. Davor ist auf einem „Schlitten“ der Laserpointer montiert. Der Schlitten wird von zwei L-förmigen Alu-Profilen geführt, so dass eine seitliche ruckelfreie Verschiebung des Laserpointers möglich ist. Genau senkrecht dazu angeordnet sind wieder zwei L-förmige Alu-Profile, auf denen ein Geo-Dreieck zur Messung des Ablenkwinkels hin und her bewegt werden kann. Diese L-Profile zeigen in „Sonnengegenrichtung“. Das tragende Holzbrett ist mit Nivellierfüßen ausgerüstet, so dass eine genau horizontale Ausrichtung des Versuchsaufbaus ermöglicht werden kann. Dies wird mit einer gekreuzten Wasserwaage überprüft. Die Horizontale Ausrichtung ist wichtig, um die Ablenkwinkel mit dem Geodreieck zu messen. Das Geodreieck ist dabei so angeordnet, dass der zu messende abgelenkte Strahl in der Skalenebene des Geodreiecks verläuft.

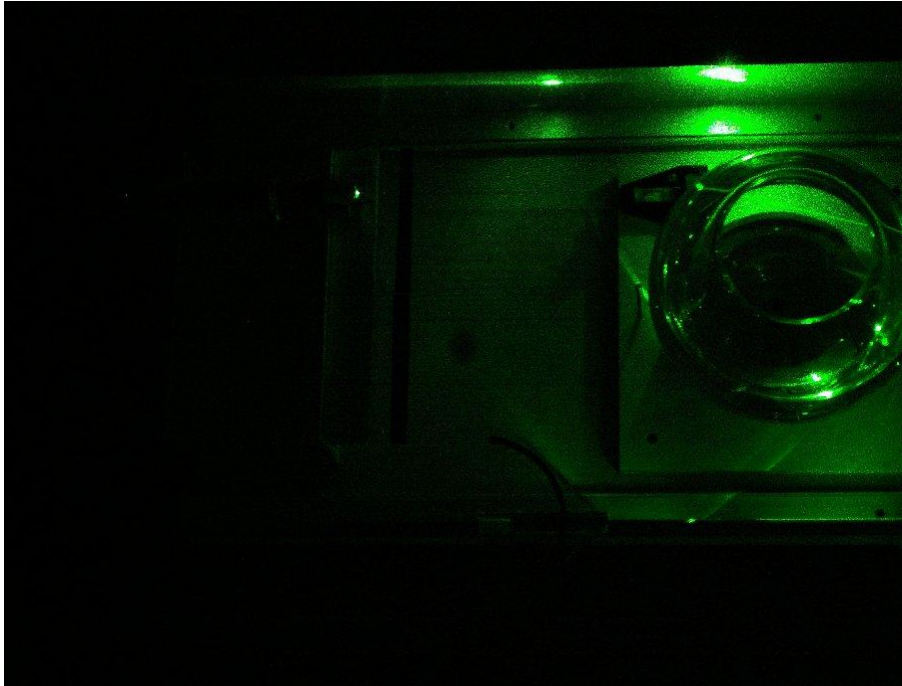


Abbildung 16: Einsatz der Messapparatur (Foto: Peter Volkmer)

5.1 Messung des maximalen Ablenkungswinkels

Durch Verschieben des Laserpointers von der Gefäßmitte („Tropfenmitte“) bis hin zum Gefäßrand lassen sich die zu dem jeweiligen Abstand von der Mitte zugehörigen Ablenkungswinkel messen. Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt. Das Maximum liegt bei einem Abstand von 7,45 cm (Radius = 8,75 cm) entsprechend dem 0,85fachen des Radiuses. Der gemessene Winkel ist etwas größer als 42° , was durch den Einfluss der Wandstärke des Gefäßes zu erklären ist.

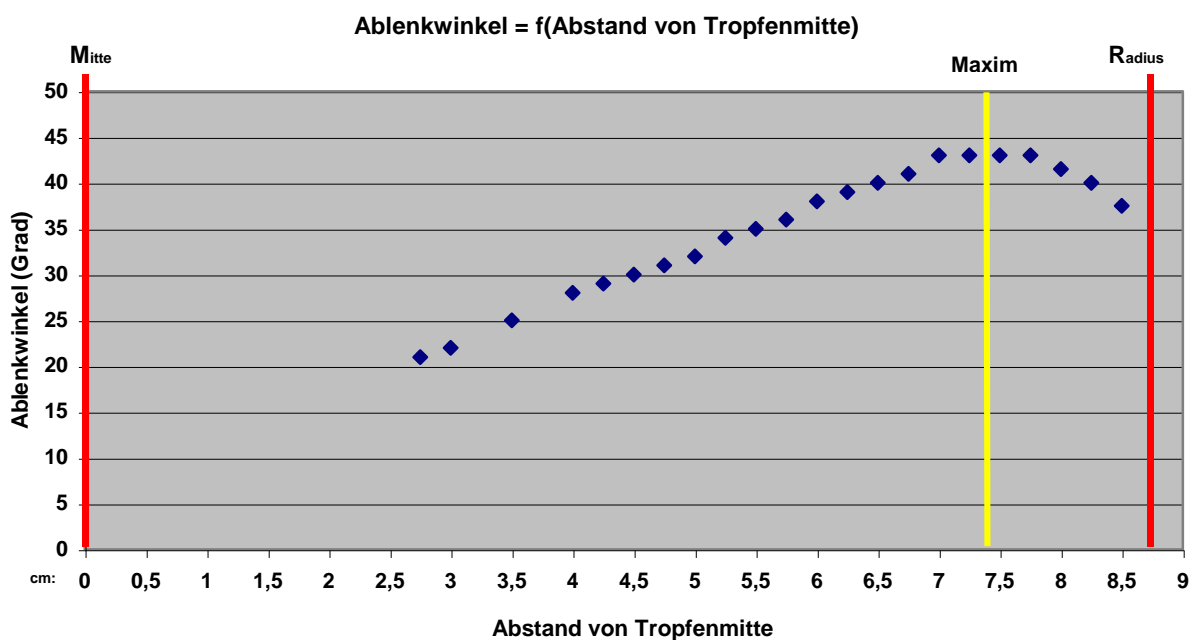


Abbildung 16: Messung des maximalen Ablenkungswinkels (Auswertung: Peter Volkmer)

5.2 Messung der internen Reflexionen

Trifft der einfallende Strahl genau die „Tropfenmitte“, wird u.a. auch ein in sich zurückreflektierter Strahl erzeugt. Bei zunehmendem Abstand von der „Tropfenmitte“ nimmt die Zahl der internen Mehrfachreflexionen zu, wobei Mehrfachreflexionen erst bei großen r/R -Verhältnissen entstehen.

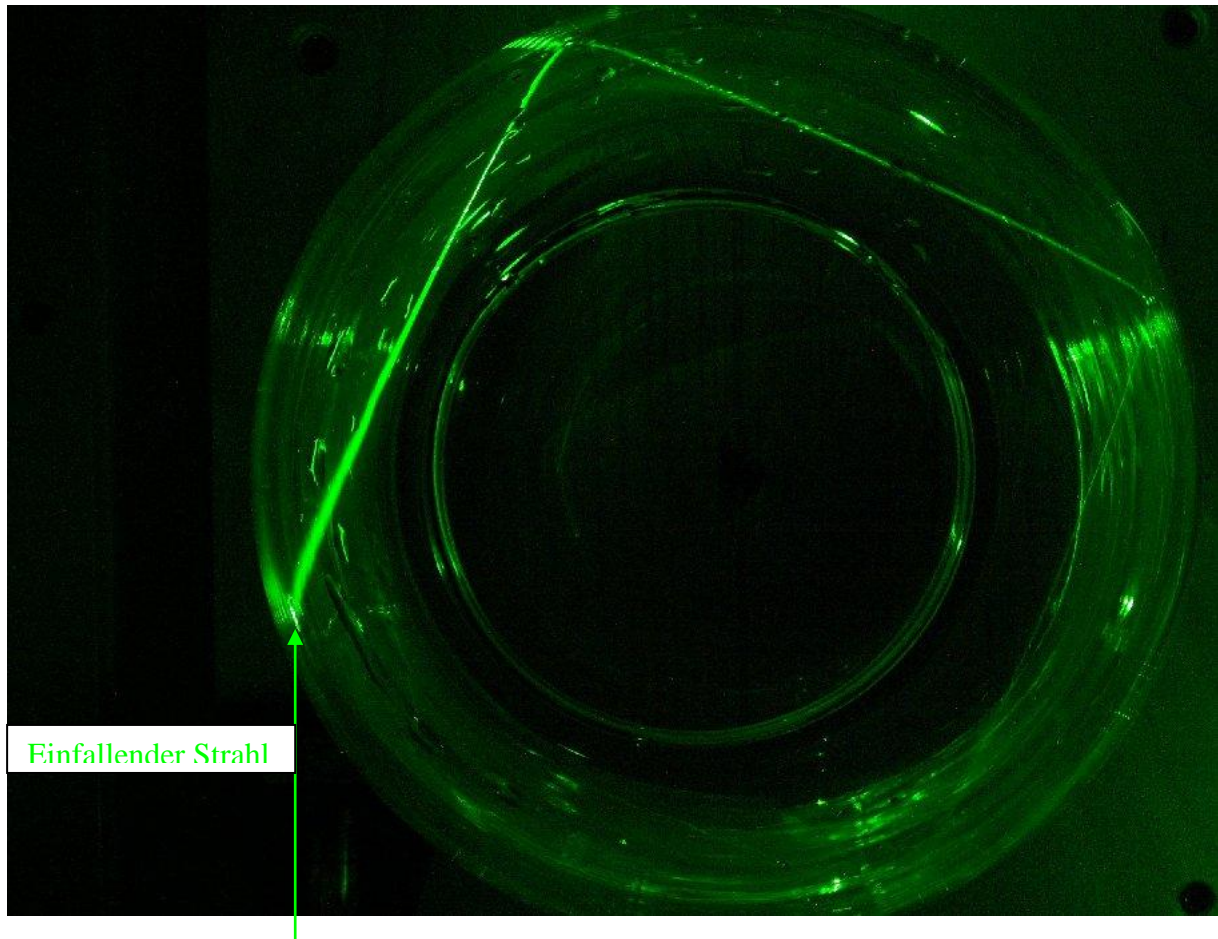


Abbildung 17: Interne Mehrfachreflexion, es sind intern drei Reflexionen zu erkennen
 $r / R = 0,91$ (r = Abstand von Tropfenmitte, R = Tropfenradius), Foto: Peter Volkmer

Das kugelförmige Glas kommt der Simulation eines „überdimensionalen Wassertropfens“ schon sehr nahe. Für Bildaufnahmen „von oben“ (zur Dokumentation der internen Mehrfachreflexionen) stört allerdings das Glas oberhalb der Einfallsebene des Laserstrahls, das für eine Aufhellung des Bildes sorgt und damit den Anteil höherer interner Reflexionen nicht mehr gut wiedergibt (die höheren internen Reflexionen werden ja immer lichtschwächer!).

Für Abhilfe kann da ein zylinderförmiges Becherglas sorgen, das man für den Simulationsversuch benutzt. Die Geometrie des Glases ist für den Versuch unerheblich, da ja die internen Strahlreflexionen sämtlich in der Einfallsebene des Laserstrahls erfolgen. Die folgenden Abbildungen zeigen interne Reflexionen höherer Ordnung bei Verwendung eines zylindrischen Becherglases ausreichenden Durchmessers.

5.2.1 Darstellung höherer interner Reflexionen

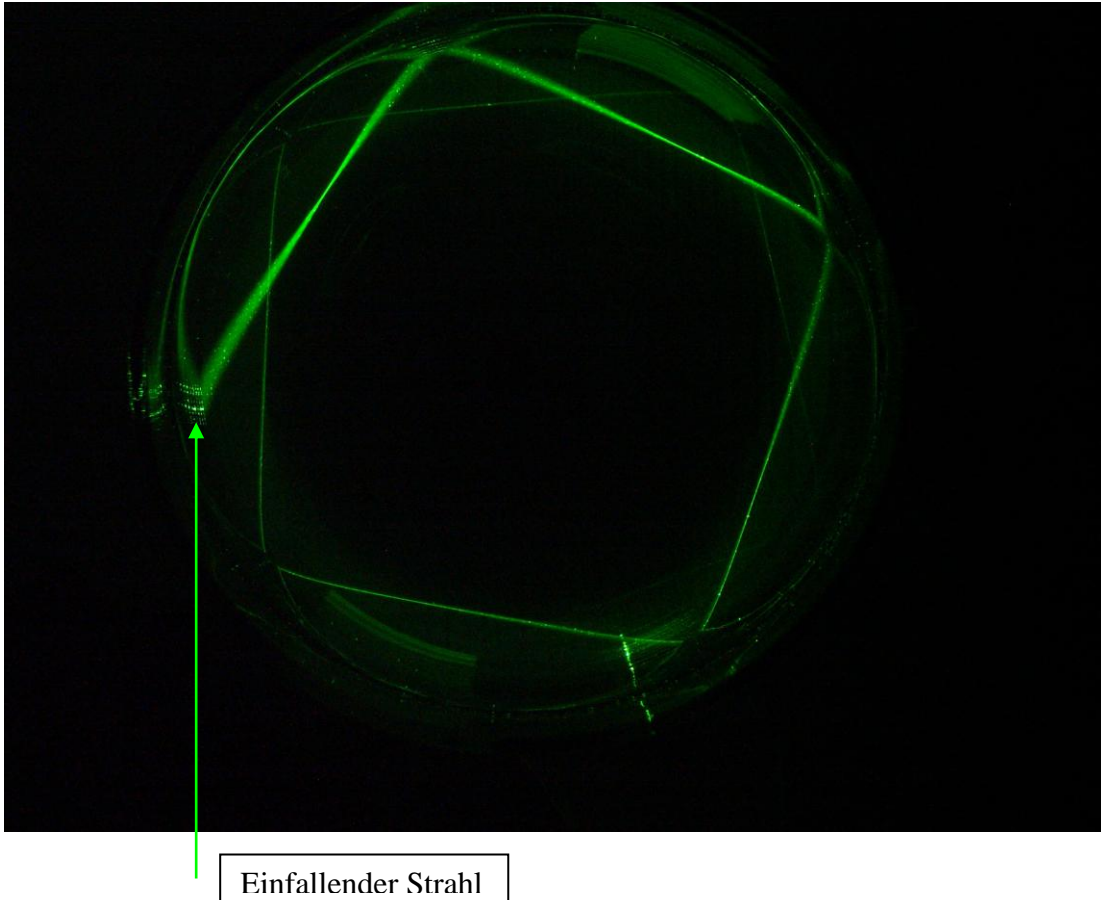


Abbildung 18: Interne Mehrfachreflexionen, es sind intern 7 Reflexionen zu erkennen (bei Verwendung eines zylindrischen Becherglases), Foto: Peter Volkmer

Die Abbildung 18 lässt maximal 7 Reflexionen erkennen, die Strahlen werden immer lichtschwächer (wegen Lichtverlusts durch Austritt aus dem Glas).

6. Quellennachweis

- 1.) Kristian Schlegel, „Vom Regenbogen zum Polarlicht“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, 2001
- 2.) Gerthsen, Kneser, Vogel, „Physik“, Springer Verlag, 1974
- 3.) <http://www.wolkenatlas.de/wolken/gregb01.htm>
- 4.) <http://www.itp.uni-hannover.de/~zawischa/ITP/regnbqv03.pdf>
- 5.) <http://www.meteoros.de/indexatmo.htm>