

So können zum einen ziehende Wolken nahezu unsichtbar gemacht, aber auch schwache farbige Erscheinungen hervorgehoben werden. Ein geeignetes Programm ist zum Beispiel „Giotto“ von Georg Dittié [1]

Um unsichere Bögen noch besser identifizieren zu können, hilft (einzeln oder noch besser in Kombination mit gestackten Bildern) eine Unschärfemaske (USM), wobei die Bilder komplett un bearbeitet sein müssen. Verschiedene Programme zur Bildbearbeitung bringen die Unschärfemaskierung als Bildbearbeitungsfunktion mit. Mit Adobe Photoshop

funktioniert es ebenso gut, wie z.B. auch mit dem freien Programm „The Gimp“. Die Einstellungen sind abhängig von der Bildgröße und der verwendeten Brennweite. Generell nimmt der Radius mit zunehmender Bildgröße zu.

**Folgende Werte können als Orientierung für gebräuchliche 4- bis 8-Megapixelkameras dienen:**

Eigenschaft	Stellwerte
Radius (Pixel)	40
Stärke/Menge/Betrag	400% oder 4
Schwellenwert	0

Wenn man Regenbogenbilder derart bearbeitet, sollte dies allerdings immer vermerkt werden, um nicht den Eindruck zu erwecken, dass eine Erscheinung auch visuell so wahrgenommen wurde. Bei Veröffentlichung der Bilder empfiehlt sich deshalb als Vergleich ein Gegenüberstellen des Originalfotos.

*Internethinweise:*

[1] „Giotto“ von Georg Dittié, Software-Download unter: <http://www.giotto-software.de/>

[2] Adresse für Anfragen, „Pollux 3“ betreffend: [frank.killich@meteoros.de](mailto:frank.killich@meteoros.de)

# Nach innen gekrümmte Regenbogenreflexion

von G.P. Können und C. Floor

Vor kurzem wurden im Internet Fotos von einer seltsamen Regenbogenspiegelung veröffentlicht, wo die Spiegelung nahe am Horizont nach innen gekrümmt ist. Die Reflexion trat auf einer leicht gekräuselten Wasseroberfläche auf. Die Ursache der Krümmung ist, dass wir bei der Reflexion an weit entfernten Wasserwellen nur die Vorderseite der Wellen sehen. Daher wird der Regenbogen in Horizontnähe nicht von einer horizontalen Ebene, sondern von einer schiefen Ebene gespiegelt.

Abbildung 1 zeigt einen klaren Regenbogen, fotografiert bei Sonnenuntergang am Westufer des Ontariosees in Kanada. Die genaue Zeit des Fotos wurde nicht übermittelt, doch kann man diese einfach rekonstruieren, weil wir wissen, dass der Radius des Regenbogens 42 Grad beträgt. Daher kann man aus der einfachen Vermessung der Fotografie eine Sonnenhöhe von 3,6 Grad ermitteln. Dies bedeutet, dass das Foto um 20:36 Uhr lokaler



1

**Regenbogen über dem Ontariosee, 23. Juni 2008. Nahe dem Horizont weicht seine Spiegelung nach rechts ab. Photo: Gary Lynch, Burlington, Kanada (43°19' N, 79° 48'W). Quelle: Weather Underground.**



2

### Detail von Abbildung 1

(Sommer-) Zeit gemacht wurde (00:36 UTC), also 26 Minuten vor Sonnenuntergang [1]. Die Sonne stand im Nordwesten und das Azimut betrug 299,4 Grad. Für den Gegenpunkt der Sonne ergibt dies folglich ein Azimut von  $299 - 180 \text{ Grad} = 119 \text{ Grad}$  und für den Fuß des Regenbogens  $119 - 42 \text{ Grad} = 77 \text{ Grad}$ . Das bedeutet, dass das Foto fast genau in Längsrichtung des 300 Kilometer langen Sees gemacht wurde, so dass keine Landpunkte über dem Horizont ragen.

Was können wir weiterhin aus dem Foto ableiten? Wir sehen, dass der Regenbogen scharf am Horizont endet. Daraus kann man schließen, dass sich der untere Teil des Regenschauers hinter dem Horizont befindet, da der Bogen andernfalls durch den Horizont durchgehen müsste. Bei einer Augenhöhe von zwei Metern ist der Horizont fünf Kilometer vom Beobachter entfernt. Die scharfe Abgrenzung des Regenbogens zeigt uns, dass der Schauer mindestens fünf Kilometer vom Beobachter entfernt war.

3

**Minnaert's Illustration [2] als Ursache der Neigung der spiegelnden Fläche von gekräuseltem Wasser bei streifender Schaurichtung. Da der Beobachter nur die Vorderseiten der Wellen sieht, wirken die Wellen als schiefe Spiegel.**

Das bemerkenswerteste am Foto ist aber nicht der Bogen selbst, sondern seine Reflexion. Die Form ist weitestgehend so, wie von einem horizontalen Spiegel zu erwarten, in Horizontnähe jedoch weicht die Spiegelung nach rechts ab (Abb. 2).

Ein Schlüssel zur Erklärung dieser Erscheinung befindet sich in Minnaert's Buch „Licht und Farbe in der Natur“ [2], in dem das seltsame Phänomen behandelt wird, dass sich auf einer welligen Oberfläche fast nie Schiffe, Bäume oder andere niedrige Objekte auf der anderen Uferseite spiegeln. Die unteren 30 Grad des Himmels werden in der Regel gar nicht reflektiert! Bevor wir weiter auf die sonderbare Regenbogenreflexion eingehen, besprechen wir zuerst den von Minnaert erwähnten Effekt.

### Wellenoberflächen als Spiegel

Spiegelbilder auf Wellen stammen hauptsächlich von Reflexionen an den steilsten Teilen der Wellen, das heißt: von den Wendepunkten der Wellen, also den Stellen auf den Wellen, wo die Wellenkrümmung von konvex nach konkav übergeht (Anmerkung 1). Die Reflexion von anderen Teilen einer Welle – die als konvexer Spiegel oder als Hohlspiegel wirken – ergibt ein so viel schwächeres und unscharfes Bild, dass sie in dieser Betrachtung vernachlässigt werden können. Selbstverständlich hat jede vor uns herlaufende Welle zwei Wendepunkte: einen, der zu uns und einen, der von uns weg geneigt ist. Da eine wogende Oberfläche normalerweise aus vielen Wellen von verschiedener Größe und Steilheit besteht, gibt es auf dem Wasser Spiegelungsflächen verschiedener Neigung.

Wenn wir nun steil nach unten auf die wellige Wasseroberfläche schauen, dann sehen wir ein Reflexionsbild wie man es von einem flachen horizontalen Spiegel erwarten würde, denn der Eintrittswinkel ist gleich dem Austrittswinkel. Zwar tanzt das Spiegelbild eines hellen, weit ent-

fernten Lichtpunkts kontinuierlich nach allen Seiten hin und her, aber im Großen und Ganzen bleibt es immer in der Nähe des Punktes, wo man das Spiegelbild erwarten würde. Die Tatsache, dass eine wogende Oberfläche trotz seiner Wellen als ein horizontaler Spiegel fungiert – sei es auch ein schlechter – wird dadurch verursacht, dass die Wellen in etwa gleichen Maßen ihre Vorder- und ihre Hinterseite dem Beobachter zuwenden.

Anders wird es, wenn wir in die Ferne schauen, also die spiegelnde Wirkung von Wellen nahe dem Horizont betrachten [2, 3]. In diesem Fall spielen die Wendepunkte an den Hinterseiten der Wellen keine Rolle, weil wir sie nicht sehen können (Abb. 3). Nur die Vorderseiten der Wellen spiegeln das Licht zum Beobachter. Da diese Wellenteile zu uns geneigt sind, werden höhere Teile des Himmels gespiegelt, als man es von einem horizontalen Spiegel erwarten würde.

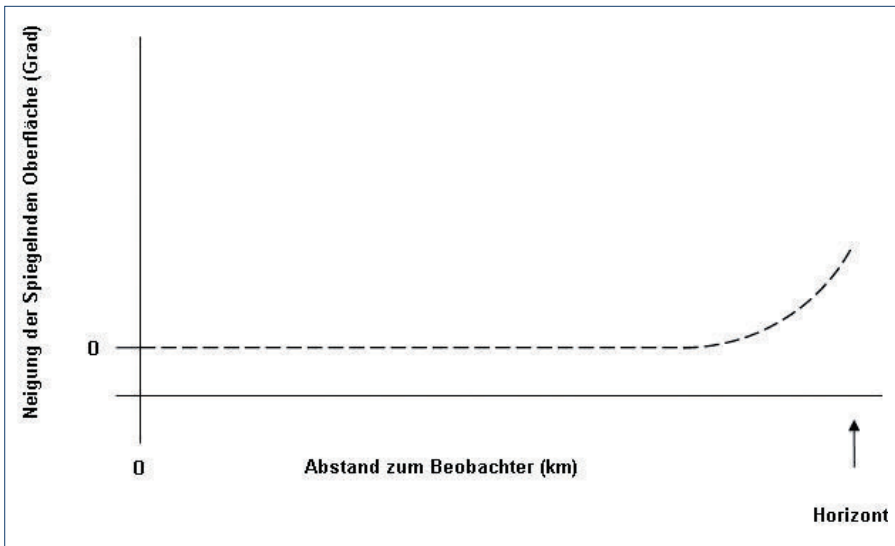
Durch dies alles wirkt welliges Wasser wie ein Spiegel, der in der Ferne zum Beobachter geneigt ist, was in dem von Minnaert erwähntem Effekt resultiert, dass man von weit entfernten Objekten wie Schiffen oder Bäumen fast nie ein Spiegelbild sieht. Abbildung 4 zeigt schematisch die Form der reflektierenden Oberfläche in Abhängigkeit vom Abstand (in Kilometern) zum Beobachter (Anmerkung 2); Abbildung 5 zeigt die Neigung des „effektiven Spiegel“ in Abhängigkeit vom Abstand (in Grad) unter dem Horizont (Anmerkung 3).

Der Zusammenhang zwischen der Neigung einer spiegelnden Oberfläche und der Wellensteilheit wird in Infokasten 1 detailliert erklärt.

### Messung und Interpretation der Neigung spiegelnder Wasserflächen

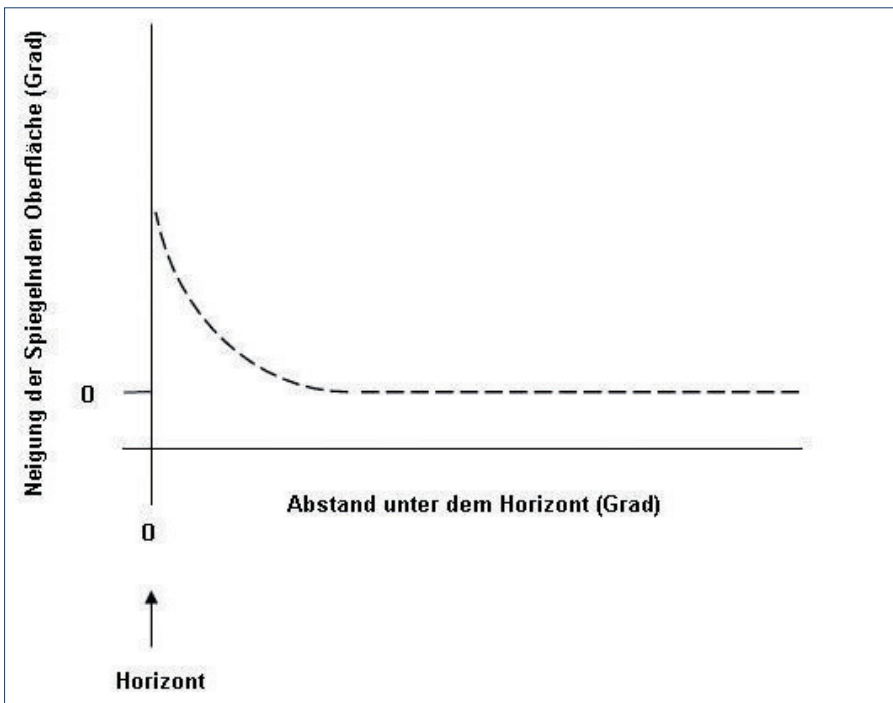
Nach Ausmessen des Abstandes von Punkten am Regenbogen und ihrer Reflexionen können wir eine empirische





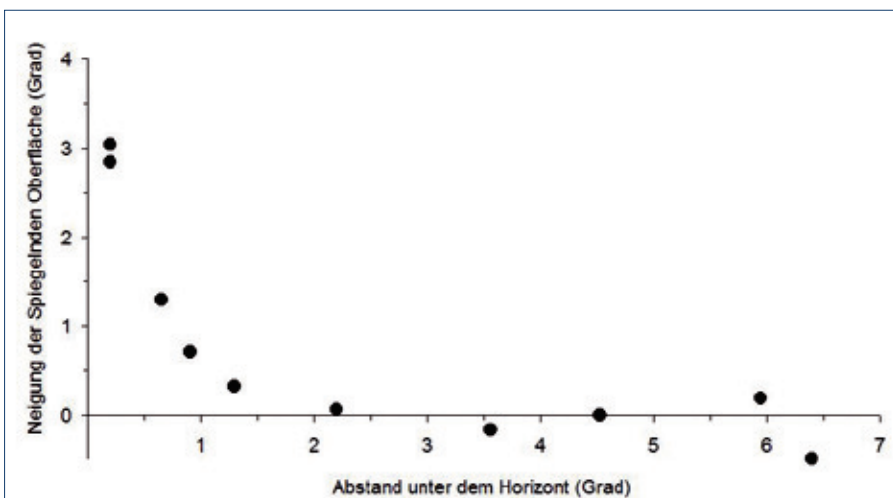
**4** Schematische Wiedergabe der Neigung der Spiegelnde Fläche im gekräuseltes Wasser. Nahe beim Beobachter spiegelt die Wasseroberfläche wie man es von einem horizontalen Spiegel erwarten kann - weiter weg wie ein schief stehender Spiegel.

**5** Wie Abbildung 4, aber jetzt die Neigung als Funktion vom Winkel, womit der Beobachter unter den Horizont schaut.



Version von Abbildung 5 konstruieren. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis. Die Graphische Vorstellung entstand zuerst durch die Bestimmung der Mitte der Verbindungslinien zwischen den Regenbogenpunkten und ihren Reflexionen und dann der Vermessung wie weit die jeweilige Mitte vom Horizont entfernt ist. Weitere Einzelheiten: siehe Infokasten II. Bei den Ausmessungen wurden die Punkte an der roten Außenseite des Bogens betrachtet (also nicht im Grünen, wie im Infokasten) – was zu größerer Genauigkeit führt.

Abbildung 6 zeigt, dass sich die Schiefheit der reflektierenden Wasseroberfläche erst bemerkbar macht für Spiegelungen, die weniger als zwei Grad vom Horizont entfernt sind, also nur für Wellen, die mehr als 30 Meter weit weg sind. Am Horizont ist die Neigung der Spiegelnde Fläche maximal. Der Maximalwert von 3 Grad kommt überein mit einer Wellensteilheit  $H/L$  von  $1/60$ . Diese Steilheit ist aber viel niedriger als die Steilheit von ausgewachsenen Seegangswellen (siehe Infokasten II). Dies zeigt, dass es sich hier um Dünungswellen handelte und deutet zudem darauf hin, dass die Windstärke vor der Aufnahme nachgelassen hat. Die Höhe der Wellen ist nicht aus der Kurve in Abbildung 6 herzuleiten.



#### Warum so selten?

Mit dieser Analyse scheint die sonderbare Krümmung in Abbildung 1 zur Zufriedenheit erklärt zu sein. Bleibt aber die Frage warum die gekrümmte Regenbogenreflexion so selten zu beobachten ist. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Zuerst sollten die Wellen nicht zu rau sein, so dass sie eine ziemlich glatte Oberfläche bilden, die das Licht gut genug reflektieren kann. Eine wilde See mit viel

**6** Gemessene Neigung der spiegelnden Oberfläche als Funktion vom Winkel unter dem Horizont. Die Messpunkte sind berechnet aus dem Abstand der Punkte am roten Äußeren des Regenbogens bis zu ihrem Spiegelbild [Kasten II].

Wind zeigt überhaupt keine Regenbogenreflexion (Abb. 7). Es scheint daher kein Zufall, dass die Wellen in Abbildung 1, welche die gekrümmte Regenbogenreflexion zeigen, Dünungswellen waren, weil diese normalerweise glatter sind als bei ausgewachsenem Seegang. Bei einem großen See – wie dem Ontariosee – ist die Chance höher es mit Dünung zu tun zu haben als bei einem kleineren See, da die Wellen weiter laufen können ehe sie die Küste erreichen. Ein Faktor der ebenfalls eine Rolle spielt, ist die Richtung der Wellen – wenn die Wellenkämme senkrecht zur Sichtrichtung stehen, bilden sie vertikale Strukturen besser ab.

### Was der Bauer nicht kennt ...

All dies genügt uns aber nicht, um die Seltenheit der gekrümmten Regenbogenreflexion vollständig zu erklären. Es gibt nämlich auch noch einen psychologischen Faktor: Menschen haben die Neigung ein unbekanntes Phänomen nicht zu bemerken, selbst wenn es noch so deutlich zu sehen ist [7]. In der Geschichte gibt es zahllose Beispiele: der grüne Strahl bei Sonnenuntergang, die Sonnenkorona während einer totalen Sonnenfinsternis, normale und „ungewöhnliche“ Halos, die umgekehrte Reihenfolge der Farben des Nebenregenbogen oder der dunkle Himmel zwischen den Hauptregenbogen und dem Nebenregenbogen, die Polarisation der Innenseite der Nebensonnen, die Haidinger-Büschel, und so weiter [2, 8-10].

„Was der Bauer nicht kennt, das sieht er nicht“, um mal ein altes bekanntes Sprichwort zu paraphrasieren. Und umgekehrt, wenn man weiß worauf man achten muss, dann offenbart sich das Phänomen wie automatisch und man kann gar nicht mehr verstehen, dass man das je übersehen hat. Beim Schreiben dieses Artikels wurden die Autoren unmittelbar mit dieser Wahrheit dieses „Sprichwortes“ konfrontiert, als nach einiger Spürarbeit im Internet mehrere Beispiele von gekrümmten Regenbogenreflexionen auftauchten. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel.

Dieser Artikel ist eine Wiedergabe des Niederländischen Artikels von G.P. Können und C. Floor, 'Een regenboogreflectie die naar binnen krult', Zenit 38, 172-177 (2011), ergänzt mit

## Höhe, Form und Steilheit von Wasserwellen

In der Ozeanographie wird die Wellenhöhe  $H$  von der Wellenspitze zum Wellental gemessen – also die Wellenhöhe entspricht der doppelten Amplitude. Diese Definition stammt aus der Nautischen Messpraxis und ist zurück zu führen auf die Tatsache, dass Wellen nicht symmetrisch sind: die Spitzen sind schärfer als die Täler. Im Allgemeinen kann das Profil einer Einzelwelle als ein umgekehrter Trochoide beschrieben werden – wo ein Trochoide die Bahnkurve darstellt, welche eine Wäscheklammer beschreibt die irgendwo an einer Radspeiche eines fahrende Fahrrad befestigt ist.

Eine wichtige abgeleitete Wellencharakteristik ist die Steilheit  $H/L$ : die Wellenhöhe  $H$  geteilt durch die Wellenlänge  $L$ . Die Werte der Steilheit werden gewöhnlich als Stammbruch geschrieben, z.B.  $1/20$  statt  $0,05$ .

Die Theorie lehrt, dass Wasserwellen mit einer Steilheit größer als  $1/7$  instabil sind: steilere Wellen werden zu Sturzbrechern, wie wir am Strande beobachten können. Wellen, die mit der Windgeschwindigkeit im Gleichgewicht sind, haben eine Steilheit von etwa  $1/25$  (Anmerkung 4); Wellen die noch wachsen sind steiler. Ausgewachsene Wellen nennt man Seegang. Wenn der Wind nachlässt, laufen die früher gebildeten Wellen weiter als die Dünung, wobei die Steilheit dauernd abnimmt und die Wellen immer glatter werden. Für eine Steilheit kleiner als  $1/40$  ist das Wellenprofil nahezu symmetrisch und nicht mehr zu unterscheiden von einer Sinuswelle. Für weitere Einzelheiten, siehe [4-6]. Die Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen der Steilheit  $H/L$  und dem Winkel, die der Wendepunkt zur horizontalen Ebene bildet. Die Werte sind berechnet für eine Sinuswelle (Anmerkung 5)

Wellensteilheit	Neigung, Wendepunkt
$1/\pi \approx 1/3^*$	$45^\circ$
$1/7^{**}$	$24^\circ$
$1/1$	$17^\circ$
$1/12$	$15^{***}$
$1/25^{****}$	$7^\circ$
$1/40$	$4,5^\circ$
$1/60$	$3^\circ$

\* Standard Sinusfunktion ( $y = \sin x$ ). Diese Steilheit wird von Wasserwellen nie erreicht.

\*\* Theoretisch höchste Werte für Wasserwellen.

\*\*\* Nach Minnaert [2].

\*\*\*\* Ausgewachsene Wellen.

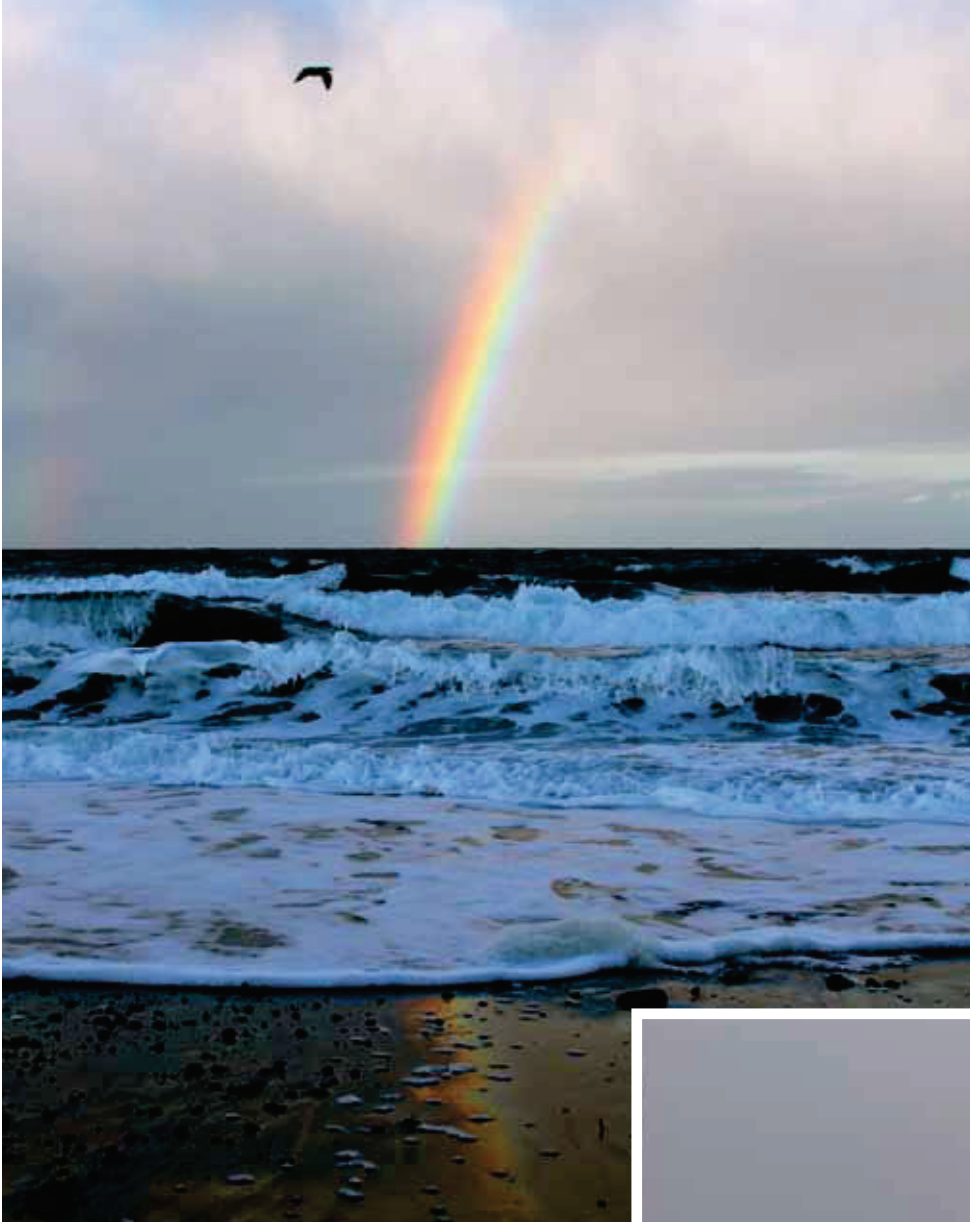
Teilen von G.P. Können, 'Halovlek bij ons schaduwpunt', Zenit 35, 545-547 (2008). Die Deutsche Übersetzung ist von Wolfgang Hinz.

### Anmerkungen der Autoren:

1. Das Wort „Wendepunkt“ ist hier im mathematische Sinne gemeint: ein Punkt  $x$  auf einer (Wellen-) Funktion  $f(x)$  wo die zweite Ableitung  $f''(x)$  null ist.
2. Eigentlich beginnt die Neigung schon bei einer weniger streifenden Schaulichtung als welche Abbildung und Text suggerieren, da die Vorderseiten der Wellen das Licht effektiver reflektieren als die Hinterseiten, da

die Effektivität proportional ist mit dem Sinus des Winkels zwischen dem Lichtstrahl und (dem Wendepunkt) einer Welle, und dieser Winkel ist kleiner an der Hinterseite der Wellen. Diesen Effekt lassen wir hier außer Beachtung.

3. Selbstverständlich kann man Abbildung 4 und 5 direkt ineinander umrechnen über eine Transformation der horizontalen Achse: wenn  $d$  der Abstand in Metern ist und die Augenhöhe zwei Meter beträgt, dann ist unter Vernachlässigung der Krümmung der Erdkugel der Zusammenhang zwischen  $d$  und dem Winkelabstand  $\alpha$  gegeben durch  $\tan(\alpha) = 2/d$ .



**7** **Regenbogen an der Küste des Pazifik.** Die Meereswellen am Horizont sind zu wild um eine Widerspiegelung zu erzeugen. Nur die dünne Wasserschicht auf dem nassen Sand in der Nähe der Wasserlinie zeigt ein Spiegelbild. Photo: Jamie Heeringa, NW Küste von Amerika, 31 Oktober 2009. Quelle: Flickr.

4. Diese Zahl ist eine Konstante, da sowohl die Höhe wie auch die Länge von ausgewachsenen Wellen quadratisch abhängt von der Windgeschwindigkeit.
5. Die Beziehung zwischen der Neigung des Wendepunkts  $s$  und der Wellensteilheit  $H/L$  lautet  $H/L = \tan(s)/\pi$

**8** **Ein Regenbogen und seine Reflexion im Wasser.** Wie in Abbildung 1 krümmt sich das Spiegelbild nahe des Horizonts nach innen. Photo: Peter Shanks, Hobart, Tasmanien, Australien, 18 Juli 2010. Quelle: Flickr.

Literatur- und Internethinweise:

- [1] *Astronomical Applications: Naval Oceanography Portal*, <http://www.usno.navy.mil/USNO/astronomical-applications>
- [2] M. Minnaert, 1992: „Licht und Farbe in der Natur“, Birkhäuser Verlag, Bern, ISBN: 3-7643-2496-1, Abschnitt 23
- [3] D.K. Lynch and W. Livingston, 1995: „Color and Light in Nature“, Cambridge University Press New York, ISBN: 0-521-43431-9, Abschnitt 3.15
- [4] P. Groen, 1974: „De wateren van de wereldzee“, De Boer Maritiem Handboeken, Bussum, ISBN 9022813010 (in Holländisch)
- [5] P. Groen, und R. Dorrestein, 1976: „Zeegolven“, KNMI opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied No 11, Staatsdrukkerij,



- UDC 5514663/4 (in Holländisch)
- [6] A.K. Laing, (Editor), 1998: „Guide to wave analysis and forecasting“, Second Edition, WMO rapport 702, WMO Switzerland, ISBN 92-63-12702-6. Elektronisch verfügbar von <http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/WMO%20No%20702/WMO702.pdf>
- [7] W. Tape and G.P. Können: „A general setting for halo theory“, *Appl. Opt.* 38 1552-1625 (1999), statement on p. 1579
- [8] Siehe zum Beispiel die Websites „Atmospheric Optics“, „Ice crystal halos“ und „Atmospheric Phenomena“, bzw. <http://www.ursa.fi/blogit/haloreports/index.php>, <http://www.atoptics.co.uk/> und <http://blog.meteoros.de/>
- [9] G.P. Können, 1985: „Polarized Light in Nature“, Cambridge University Press.
- [10] W. Tape, 1994: „Atmospheric halos“ (Vol. 64 of the Antarctic Research Series, American Geophysical Union, Washington DC).

Anzeige

## 6. Ravensburger Teleskoptreffen RATT

**14.–16.09.2012**

bei 88263 Horgenzell  
(Nähe 88214 Ravensburg)

**Programm und Infos unter:**  
[www.ratt-rv.de](http://www.ratt-rv.de)

**Ansprechpartner:**

Jochen Herrmann  
[sternwarte-ratt@online.de](mailto:sternwarte-ratt@online.de)

## Ausmessung der Regenbogenreflexion

Die Bestimmung der Neigung der spiegelnden Oberfläche, die die Krümmung des Spiegelbildes des Regenbogens verursacht, findet statt durch die Messung des Abstands zwischen einem Punkt des Regenbogens und seinem Spiegelbild im Wasser. Die Methode wird vereinfacht, wenn wir verstehen, dass Abbildung 4 für alle Richtungen gilt; daher hat die effektiv spiegelnde Oberfläche die Form eines Suppentellers, mit dem Beobachter in der Mitte. Die Spiegelfläche ist also nicht seitwärts geneigt. Dies bedeutet, dass die Verbindungslinie zwischen einem Regenbogenpunkt und seiner Reflexion immer senkrecht zum Horizont steht.

Die Abbildung zeigt wie eine Messung ausgeführt wird. Die Mitte der Verbindungslinie Regenbogen/Reflexion markiert den Punkt der den gewählte Regenbogenpunkt spiegelt. Ist der spiegelnde Punkt gerade auf dem Horizont, dann ist die effektive Spiegelfläche horizontal orientiert; ist er oberhalb des Horizonts, dann neigt sich der Spiegel zum Beobachter.

Der rechte Balken in der Abbildung zeigt, was man von einem horizontalen Spiegel erwarten kann: die Mitte ist genau auf den Horizont. Dies ist aber nicht der Fall beim linken Balken, dessen Mitte klar oberhalb des Horizonts platziert ist. Nach den Eichungen wie im Anfang dieses Artikels beschrieben, stellt sich heraus, dass die Mitte des Balkens sich  $1,0^\circ$  oberhalb des Horizonts befindet. Dies bedeutet, dass an der Unterseite des Balkens (ca.  $0,7^\circ$  unter dem Horizont) der Spiegel  $1^\circ$  geneigt ist. Der mittlere Balken hat seine Mitte wieder ungefähr dort, wo man es erwartet, also auf den Horizont. Es stellt sich aber heraus, dass der Balken ein zweites Spiegelbild durchkreuzt, nämlich in das Gebiet nahe dem Horizont, wo der reflektierte Regenbogen stark nach innen gekrümmt ist. Am Horizont ist die Neigung der spiegelnden Oberfläche maximal.



9

Jeder vertikale Balken verbindet einen Punkt im grünen Teil des Regenbogens mit seiner Reflexion. Die Mitte eines Balkens ist der Spiegelpunkt. Wenn der Spiegelpunkt oberhalb des Horizontes ist, ist die spiegelnde Oberfläche schief. Man beachte, dass der mittlere Balken zwei Spiegelungen lokalisiert: eine an der Unterseite der Balken, die zweite gerade unter dem Horizont.